

ISA: Immissionsschutz beim Abbruch

- Minimierung von Umweltbelastungen (Lärm, Staub, Erschütterungen) beim Abbruch von Hoch-/Tiefbauten und Schaffung hochwertiger Recyclingmöglichkeiten für Materialien aus Gebäudeabbruch - (Phase 3)

Abschlussbericht des Forschungsprojekts,
gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt
unter dem Az: 29014/03

28.01.2016

von

Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung (DFIU),
Karlsruher Institut für Technologie (KIT):
Dipl.-Wirtsch.-Ing. Anna Kühlen
Prof. Dr. rer. pol. Frank Schultmann

Institut für Technologie und Management im Baubetrieb (TMB),
Karlsruher Institut für Technologie (KIT):
Dipl.-Ing. Markus Reinhardt
Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Shervin Haghsheno

Brandenburgische Technische Universität Cottbus - Senftenberg (BTU)
Fakultät Umweltwissenschaften und Verfahrenstechnik
Fachgruppe Bauliches Recycling:
apl. Prof. PD Dr.-Ing. habil. Angelika Mettke
Dipl.-Ing. Stephanie Schmidt

Jean Harzheim GmbH & Co. KG (Harzheim GmbH):
Dipl.-Ing. Johannes Harzheim

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



| | | | | | | |
|------------------------------|---|---|--------------|--------------------|---|--|
| AZ | 29014/03 | Referat | 23 | Fördersumme | 229.174 € | |
| Antragstitel | | Minimierung von Umweltbelastungen (Lärm, Staub, Erschütterungen) beim Abbruch von Hoch-/Tiefbauten und Schaffung hochwertiger Recyclingmöglichkeiten für Materialien aus Gebäudeabbruch (3. Phase) | | | | |
| Stichworte | | Verfahren, Bau, Rückbau, Baustoff, Umwelt, Immissionsschutz | | | | |
| Laufzeit | Projektbeginn | Projektende | Projektphase | | | |
| 15 Monate | 01.08.2014 | 31.10.2015 | 3 | | | |
| Zwischenberichte | 2 | | | | | |
| Bewilligungsempfänger | Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung (DFIU) | | | Tel 0721/608-44569 | | |
| | Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Hertzstr. 16, Geb. 06.33 76187 Karlsruhe | | | Fax 0721/608-44682 | | |
| | | | | | Projektleitung Prof. Dr. F. Schultmann | |
| | | | | | Bearbeiterin Dipl.-Wirtsch.-Ing. A. Kühlen | |
| Kooperationspartner | <ul style="list-style-type: none"> • Institut für Technologie und Management im Baubetrieb (TMB), Karlsruher Institut für Technologie (KIT) • Fachgruppe Bauliches Recycling, Brandenburgische Technische Universität Cottbus - Senftenberg (BTU), Cottbus • Jean Harzheim GmbH & Co. KG (Harzheim GmbH), Köln | | | | | |

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Der Abbruch von Bestandsgebäuden wird in Zukunft weiterhin erforderlich sein, denn viele ältere Gebäude lassen sich in der Regel nicht oder nur teilweise an veränderte Nutzungsbedingungen und geltende hohe energetische Standards anpassen. Von einem Teil der in den Abbruchprozess involvierten Akteure werden Lärm-, Staub- und Erschütterungsemissionen und -immissionen sowie Schadstoffe und Abbruchabfälle nur unzureichend berücksichtigt. Das Forschungsprojekt zielte primär auf die Verminderung von Emissionen und Immissionen auf Mensch und Umwelt beim Gebäudeabbruch ab, um somit einen verbesserten Umwelt- und Gesundheitsschutz zu erreichen. Übergeordnete Zielsetzung der 1., 2. und 3. Projektphase war daher die Analyse der Einflussfaktoren von Lärm-, Staub- und Erschütterungsemissionen und -immissionen bei Abbruchvorgängen und die Integration des Immissionsschutzes in den Projektlauf. Dies erfolgte konkret mit der Entwicklung von neuen Instrumenten: einer Datenbank, einem prototypischen Planungsunterstützungswerkzeug und einem Immissionserfassungssystem. In diesem Zusammenhang wurden beeinflussbare und nicht beeinflussbare Ursachen der Emissionen und Immissionen erfasst, modelliert und analysiert. Die höherwertige Verwertung von Abbruchabfällen wurde hierbei als Rahmenbedingung der Modellierung vorgegeben und mögliche Schadstoffe wurden über die Materialien der Gebäudehülle zugeordnet.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Zur Zielerreichung wurden im Rahmen des Projekts drei Instrumente erarbeitet, die in Teilen in den beiden vorherigen Projektphasen bearbeitet wurden und in der 3. Phase wie folgt vervollständigt und abgeschlossen wurden:

1. Erweiterung der Datenbank um Daten zum Ressourceneinsatz, zu Schutzmaßnahmen, zu Emissionsabnahmeeffekten abhängig vom Umfeld des Abbruchobjekts sowie um Erkenntnisse aus Expertenbefragungen und Immissionsmessungen unter Versuchsbedingungen.
2. Erweiterung des prototypischen softwaregestützten Entscheidungsunterstützungswerkzeugs für die Abbruchplanung um die Bereiche der Datenbankerweiterung und Test des Werkzeugs für die Planung eines realen Abbruchvorhabens.
3. Erweiterung des prototypischen Immissionserfassungssystems um ein Programm zur Auswertung der Immissionen und Test des Systems für Abbrucharbeiten unter Versuchs- und Praxisbedingungen.

Weiter wurden akteurspezifische Handlungsempfehlungen für die Integration des Immissionsschutzes in der Praxis von Rückbauprojekten abgeleitet. Die Ergebnisse des Projekts wurden relevanten Akteuren in der Praxis unterbreitet und abschließend in einem Enderbericht zusammengefasst.

Ergebnisse und Diskussion

Sowohl das Planungsunterstützungswerkzeug mit Datenbank als auch das Immissionserfassungssystem wurden mit Abschluss der 3. Phase prototypisch umgesetzt. Die Eignung beider Systeme zur Lösung der Problemstellung konnte nachgewiesen werden. Instrumente, wie sie hier prototypisch entwickelt wurden, können in Zukunft eine umfassende Unterstützung von Bauherren, Planern, ausführenden Unternehmen und Behörden in Fragen des Immissionsschutzes ermöglichen. Zusätzlich ist eine Sicherstellung der Einhaltung der Immissionsgrenzwerte zur Minderung von Konfliktpotenzialen unerlässlich, um auch zukünftig einen für die Unternehmen, Behörden und Bürger reibungslosen, ordnungsgemäßen und rechtskonformen Ablauf der Baumaßnahme zu ermöglichen.

Zur Übertragung der Forschungsergebnisse in die Praxis und zur Sensibilisierung relevanter Akteure für das Thema des Immissionsschutzes bei Abbrucharbeiten, wurden zum einen diverse Aktivitäten zur Ergebnisverbreitung durchgeführt und zum anderen akteurspezifische Handlungsempfehlungen erstellt. Diese Empfehlungen enthalten unter anderem Hinweise, wo die drei Instrumente, die im Rahmen des Projekts prototypisch entwickelt wurden, in Zukunft möglicherweise um- und einzusetzen sind.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Die Ergebnisse des Forschungsprojekts wurden den relevanten Akteuren in der Praxis (Bauherr, Planungsingenieur und Abbruchunternehmer) sowie Interessierten aus Wissenschaft und Forschung unterbreitet. Die Ergebnisverbreitung zielte darauf ab, einen größeren Interessentenkreis für die Problematik zu gewinnen und die Integration der im Rahmen des Forschungsprojekts erarbeiteten Ergebnisse in der Praxis anzustoßen. Neben den akteurspezifischen Handlungsempfehlungen, wurden die Projektergebnisse ausgewählten mittelständischen Unternehmen und Institutionen vorgestellt. Weiter erfolgten Projektvorstellungen vor nationalem und internationalem Fachpublikum aus Forschung und Industrie im Rahmen von Workshops, Konferenzen, Fachtagungen und Messen. Darüber hinaus wird das Forschungsthema von den universitären Projektpartnern regelmäßig in die Lehre eingebunden. Abschließend werden/wurden alle Projektergebnisse in Endberichten im Detail beschrieben und sowohl über die DBU als auch auf den Internetseiten der Projektpartner veröffentlicht.

Fazit

In erster Linie erfordert die Berücksichtigung von Immissionen als integraler Bestandteil in Planung und Durchführung von Abbrucharbeiten eine Verankerung des Immissionsschutzes in der Ausschreibung. Hier müssten neben technischen Anforderungen auch immissionsschutzrelevante Anforderungen im Detail spezifiziert werden. In diesem Zusammenhang wäre es erstrebenswert den Einsatz von Instrumenten für die Planung und Durchführung von Abbrucharbeiten, wie sie im Projekt prototypisch umgesetzt wurden, vorzuschreiben und ein entsprechendes Budget wäre in der Ausschreibung anzusetzen. Insbesondere der öffentliche Bauherr sollte hierbei eine Vorreiterrolle einnehmen und seine Ausschreibungen entsprechend ergänzen/anpassen. Um jedoch die beiden prototypisch umgesetzten Systeme zur Praxistauglichkeit weiterzuentwickeln, bedarf es noch Zeit und weiteren Anstrengungen. Die größten Herausforderungen sind hier die Steigerung der Nachfrage nach solchen Instrumenten und das Finden von Partnern mit denen die Systeme weiterentwickelt werden können. Erst wenn gefordert wird, dass Immissionsanforderungen in Leistungsbeschreibungen zu integrieren sind, wird die Nachfrage nach solchen Instrumenten akut. Die Grundlagen dafür sind im Rahmen des vorliegenden Projektes gelegt. Dennoch sind weitere Entwicklungen notwendig, damit eine Überführung der Systeme aus der universitären Forschung in die Praxis erfolgen kann.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Inhaltsverzeichnis..... | 4 |
| Abbildungsverzeichnis..... | 6 |
| Tabellenverzeichnis..... | 7 |
| Begriffe und Definitionen..... | 8 |
| Abbruch, Rückbau und Recycling..... | 8 |
| Emissionen und Immissionen..... | 11 |
| Zusammenfassung..... | 16 |
| 1. Einleitung..... | 18 |
| 1.1. Ausgangssituation..... | 18 |
| 1.2. Zielsetzung..... | 20 |
| 1.3 Aufbau des Berichts..... | 21 |
| 2. Primärdatenerhebung für die Datenbank..... | 22 |
| 2.1. Expertenbefragung..... | 22 |
| 2.1.1. Allgemeine Informationen..... | 23 |
| 2.1.2. Materialsortieren und -zerkleinern..... | 24 |
| 2.1.3. Bewertung der Emissionen..... | 27 |
| 2.1.4. Einfluss von Abbruchhöhe und Maschinengröße..... | 28 |
| 2.2. Immissionsmessungen unter Versuchsbedingungen..... | 28 |
| 2.2.1. Versuchsaufbau..... | 28 |
| 2.2.2. Versuchsdurchführung..... | 30 |
| 2.2.3. Versuchsergebnisse..... | 32 |
| 3. Werkzeug zur IT-basierten Planungsunterstützung..... | 37 |
| 3.1. Nutzereingabe..... | 37 |
| 3.1.1. Gebäudeeigenschaften..... | 38 |
| 3.1.2. Baustellenrahmen- und Umgebungsbedingungen..... | 39 |
| 3.1.3. Entscheiderpräferenzen..... | 42 |
| 3.2. Analyseprozess..... | 43 |
| 3.2.1. Abbruchabfolge auf Basis eines digitalen Modells des Abbruchobjekts..... | 43 |
| 3.2.2. Technisch mögliche Abbruchtechniken..... | 44 |
| 3.2.3. Ökonomische Ausprägungen..... | 45 |
| 3.2.4. Ökologische Ausprägungen..... | 47 |
| 3.2.5. Technikbewertung..... | 52 |
| 3.3. Werkzeugausgabe..... | 52 |
| 3.4. Werkzeugtest: Planung eines realen Abbruchvorhabens..... | 52 |
| 3.4.1. Vorhabenbeschreibung..... | 52 |
| 3.4.2. Nutzereingabe..... | 52 |

| | |
|---|----|
| 3.4.3. Werkzeugausgabe | 54 |
| 3.4.4. Vergleich der Ergebnisse und Schlussfolgerungen..... | 59 |
| 4. Immissionserfassungssystem | 60 |
| 4.1. Systemaufbau..... | 60 |
| 4.2. Datenerfassung und Auswertung..... | 62 |
| 4.3. Verknüpfung mit dem Werkzeug zur Planungsunterstützung..... | 63 |
| 4.4. Systemtest | 64 |
| 4.4.1. Weiter bestehende Herausforderungen..... | 64 |
| 4.4.2. Erkenntnisse | 65 |
| 4.4.3. Fazit | 66 |
| 5. Hineintragen der Ergebnisse in die Praxis..... | 67 |
| 5.1. Beitrag zur Erreichung des übergeordneten Projektziels..... | 67 |
| 5.2. Beitrag zur Zielerreichung und praktischer Nutzen – Integration des Immissionsschutzes | 67 |
| 5.2.1. Planungsunterstützungswerkzeug mit Datenbank | 68 |
| 5.2.2. Maßnahmen zur Einführung des Immissionserfassungssystems..... | 68 |
| 5.3. Akteurspezifische Handlungsempfehlungen..... | 69 |
| 5.3.1. Allgemeine Empfehlungen | 70 |
| 5.3.2. Handlungsempfehlungen für Bauherren und Planungsingenieure..... | 71 |
| 5.3.3. Handlungsempfehlungen für Bau- und Abbruchunternehmer..... | 72 |
| 5.3.4. Handlungsempfehlungen für Behörden..... | 73 |
| 5.4. Weitere Maßnahmen zur Ergebnisverbreitung | 74 |
| 5.4.1. Veröffentlichung in Fachzeitschriften und Journals..... | 74 |
| 5.4.2. Projektvorstellungen vor Fachpublikum | 75 |
| 5.4.3. Vorstellung der Systeme bei einzelnen mittelständischen Unternehmen | 76 |
| 5.4.4. Integration in die Lehre | 76 |
| 6. Fazit | 77 |
| 6.1. Zusammenfassung der Ergebnisse | 77 |
| 6.2. Ausblick | 77 |
| Danksagung | 78 |
| Literaturverzeichnis..... | 79 |
| Gesetz-, Normen- und Richtlinienverzeichnis | 81 |
| Gesetze, Verordnungen und Vorschriften | 81 |
| Technische Regeln..... | 82 |
| VDI-Richtlinien und Merkblätter | 82 |
| Anhang | 84 |
| Anhang A: Ausgewählte Auswertungen der Online-Umfrage für die Experteneinschätzung | 84 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1: Konventionen definierter Staubfraktionen..... | 15 |
| Abbildung 2: Mögliche Emissionsquellen bei Arbeitsprozessen auf Abbruchbaustellen | 19 |
| Abbildung 3: Konzept Rückbauplanung vom Objekt über die Planung zur Abbruchdurchführung..... | 20 |
| Abbildung 4: Häufigkeitsverteilung der verwendeten Abbruchtechniken | 23 |
| Abbildung 5: Häufigkeitsverteilungen der Abschätzung des Nachsortierungsaufwandes der Technik Abgreifen abhängig von verschiedenen Materialien | 25 |
| Abbildung 6: Häufigkeitsverteilungen der Abschätzung des Materialzerkleinerungsaufwandes der Technik Abgreifen abhängig von verschiedenen Materialien | 25 |
| Abbildung 7: Normalverteilung der Nachsortierungsaufwandsabschätzung der Technik Abgreifen von Ziegel..... | 26 |
| Abbildung 8: Normalverteilung der Materialzerkleinerungsaufwandsabschätzung der Technik Abgreifen von Ziegel..... | 26 |
| Abbildung 9: Normalverteilung der Staubemissionshöhenbewertung der Technik Abgreifen von Ziegel | 27 |
| Abbildung 10: Versuchsaufbau und Durchführung der ersten Versuchsreihe | 29 |
| Abbildung 11: Erfassung und Darstellung der Messwerte während der Versuche | 30 |
| Abbildung 12: Zweite Versuchsreihe: Abbruch von verputzten Ziegelsteinwänden | 31 |
| Abbildung 13: Dritte Versuchsreihe: Abbruch von Stahlbetonteilen..... | 32 |
| Abbildung 14: Erste Versuchsreihe: Sägen von Ziegelmauerwerk..... | 34 |
| Abbildung 15: Dritte Versuchsreihe: Pressschneiden von Stahlbeton..... | 36 |
| Abbildung 16: Ausgewählte Eingabe- und Ausgabeinformationen des Planungsunterstützungswerkzeugs | 37 |
| Abbildung 17: Maske für die Eingabe der Gebäudeabmessungen/der Gebäudebasisdaten | 38 |
| Abbildung 18: Maske für Eingabe der Bauteileigenschaften je Geschoss | 39 |
| Abbildung 19: Eingabe der Baustellenrahmen- und Umgebungsbedingungen | 40 |
| Abbildung 20: Exemplarische Eingabe der Kriteriengewichtungen | 43 |
| Abbildung 21: Rückbauprojekttablaufplan der Phase 1 des realen Abbruchvorhabens inklusive Technikauswahltabelle | 55 |
| Abbildung 22: Zeitliche Verteilung und Anzahl der Ressourcen sowie Höhe der Immissionsauslastungen (0-1) am angrenzenden Gebäude der Phase 1 des realen Abbruchvorhabens | 56 |
| Abbildung 23: Rückbauprojekttablaufplan der Phase 2 des realen Abbruchvorhabens inklusive Technikauswahltabelle | 57 |
| Abbildung 24: Zeitliche Verteilung und Anzahl der Ressourcen sowie Höhe der Immissionsauslastungen (0-1) am angrenzenden Gebäude der Phase 2 des realen Abbruchvorhabens | 58 |
| Abbildung 25: Aufbau des Immissionserfassungssystems um die Abbruchbaustelle herum (links) mit dem Koordinator zwischen dem Zigbee Funknetz und der Auswerteeinheit (rechts) und mit der Rückkopplung (Mitte, unten) | 61 |
| Abbildung 26: Aufbau eines Messknotens mit Schall- (grün), Staub- (gelb) und Erschütterungssensoren (rot), die an die Funkeinheit (blau) angeschlossen werden. ... | 62 |
| Abbildung 27: Schematische Darstellung der Immissionsverläufe für die Auswertung | 63 |
| Abbildung 28: Ansatz der Verknüpfung zwischen Immissionserfassungssystem und Planungsunterstützungswerkzeug | 64 |
| Abbildung 29: Nutzen der Instrumente in den einzelnen Phasen eines Abbruchprojekts | 68 |
| Abbildung 30: Übersicht über die wesentlichen Handlungs- und Entscheidungsabläufe bei der Planung und Durchführung einer Rückbaumaßnahme | 70 |
| Abbildung 31: RAL Gütezeichen Abbrucharbeiten..... | 72 |
| Abbildung 32: Möglichkeiten der Staubbekämpfung bei Abbrucharbeiten | 73 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|--|----|
| Tabelle 1: Grobstruktur der Gebäudetypologie und Hauptmaterialien der Bauteile | 9 |
| Tabelle 2: Abbruchtechniken - Abbruchverfahren-und-Maschinen-Kombinationen | 10 |
| Tabelle 3: Merkmale diffuser und definierter Staubquellen | 12 |
| Tabelle 4: Anzahl auswertbarer Versuche der 1. Versuchsreihe | 30 |
| Tabelle 5: Auswertung der Messergebnisse des KIT-Systems bezüglich der Schallemissionen verschiedener Abbruchverfahren und Mauerwerksmaterialien..... | 32 |
| Tabelle 6: Auswertung der Messergebnisse des KIT-Systems bezüglich der Staubemissionen verschiedener Abbruchverfahren und Mauerwerksmaterialien..... | 33 |
| Tabelle 7: Auswertung der Messergebnisse bezüglich der Wirkung von Staubminderungsmaßnahmen (siehe 2.2.2.) | 34 |
| Tabelle 8: Auswertung der Messergebnisse des KIT-Systems bezüglich der Schallemissionen verschiedener Abbruchverfahren angewandt auf Stahlbeton..... | 35 |
| Tabelle 9: Auswertung der Messergebnisse bezüglich der Staubemissionen verschiedener Abbruchverfahren angewandt auf Stahlbeton..... | 35 |
| Tabelle 10: Auswertung der Messergebnisse bezüglich der Erschütterungsemissionen verschiedener Abbruchverfahren angewandt auf Stahlbeton..... | 35 |
| Tabelle 11: Technische Eignung von Abbruchtechniken bezogen auf die Platzverhältnisse vor Ort um das Abbruchobjekt herum..... | 41 |
| Tabelle 12: Gebietsnutzungskategorien | 41 |
| Tabelle 13: Mögliche Schutzmaßnahmen und deren Minderungswirkung | 42 |
| Tabelle 14: Schallimmissionsrichtwerte abhängig von der Gebietsnutzungskategorie..... | 45 |
| Tabelle 15: Bauteilvolumenbezogene, materialabhängige Dauerkennwerte von Abbruchtechniken in h/m ³ für einen 40-Tonnen-Bagger | 46 |
| Tabelle 16: Materialbezogene Lärmemissionskennzahlen von Abbruchtechniken..... | 48 |
| Tabelle 17: Materialbezogene Staubemissionskennwerte von Abbruchtechniken..... | 49 |
| Tabelle 18: Materialbezogene Erschütterungsemissionskennwerte von Abbruchtechniken | 50 |
| Tabelle 19: Siedlungstypen/Umfeldtypen und immissionsbeeinflussende Eigenschaften | 51 |
| Tabelle 20: Auszug der qualifizierten Stückliste der einzelnen Gebäudeelemente der Phase 1 | 53 |
| Tabelle 21: Auszug der qualifizierten Stückliste der einzelnen Gebäudeelemente der Phase 2 | 53 |
| Tabelle 22: Gesamtprojektinformationen..... | 54 |

Begriffe und Definitionen

Abbruch, Rückbau und Recycling

Abbruch: Planvolle Teilung eines vorherigen Ganzen in zwei oder mehrere Teile bei Anwendung geeigneter Verfahren zum ganzen oder teilweisen Zerlegen von baulichen oder technischen Anlagen (vgl. VDI 6210 E). Der Rückbau ist eine Sonderform des Abbruchs (s. gesonderte Definition).

- **Selektiver Abbruch:** Abbruch mit vorhergehender Beräumung unter Berücksichtigung von Forderungen zum sortenspezifischen Erfassen und Entsorgen des Abbruchmaterials (vgl. DA (2015)).
- **Vollständiger Abbruch (Totalabbruch):** Restlose Beseitigung einer technischen oder baulichen Anlage, zumeist bis zur Gründungssohle (vgl. DA (2015)).
- **Teilweiser Abbruch (Teilabbruch):** Beseitigung von vorbestimmten Anlagen- oder Bauwerksabschnitten oder deren Teilen mit Erhaltung der Standsicherheit verbleibender Teile, oftmals nach Herstellen eines Trennschlitzes (vgl. DA (2015)).
- **Abbruchhöhe:** ab Oberkante Gelände oder Rampe gemessene Höhe des abzubrechenden Objektes, die in Abhängigkeit vom Abbruchgeschehen veränderbar ist (vgl. DA (2015)).

Demontage: Die Demontage ist eine besondere Verfahrensweise des Abbruchs. Gemäß DIN 18007:2009-03 wird der Begriff wie folgt definiert: „Die Bauteile werden durch Lösen der Verbindungen“ u./o. Herstellen von Trennschlitz „voneinander getrennt und zerstörungsfrei ausgebaut“. Das Verfahren kommt hauptsächlich dann zum Einsatz, wenn Schadstofffreisetzungen zu verhindern oder zu vermindern sind oder technologisch bedingt Demontagen realisiert werden müssen, um die verbleibende Bausubstanz bei Teilrückbau nicht zu beschädigen. Die Sicherstellung von Bauteilen zur sekundären Nutzung wird derzeit meist nur flankierend betrachtet. In der DIN 6210 E kommt auch zum Ausdruck, dass es sich um den zerstörungssarmen Rückbau von Bauteilen handelt. Durch das Lösen von Verbindungen und/oder Herstellen von Trennschlitz und Abheben der Bauelemente von baulichen oder technischen Anlagen können zum einen die verbleibenden Bauteile erhalten bleiben und zum anderen besteht die Möglichkeit, die ausgebauten Bauelemente in originärer Form nach zu nutzen (Mettke (2010)).

Entkernung: Beseitigung von am Abbruchobjekt befestigten oder eingebauten Anlagen und Gegenständen, die keinen Einfluss auf die Standsicherheit des Bauwerks oder die Anlage ausüben, z. B. Fenster, Öfen, Rohrleitungen und nicht tragende Wände (vgl. DA (2015)).

Rückbau: Ist eine Abbruchmethode, die meist in umgekehrter Reihenfolge der Errichtung erfolgt und die das Ziel der Weiterverwendung und Verwertung von Bau- und Konstruktionsteilen hat (Schultmann (1998)). Der Begriff Rückbau wird in der Praxis vielfach verwendet, wenn ein Gebäude oder eine bauliche Anlage vorwiegend selektiv abzubrechen ist und das Baumaterial oder die Bauteile nach Materialgruppen gesondert einer Aufbereitungsanlage zuzuführen sind. Die sortenreine Aufbereitung ist eine Voraussetzung, um Bauabfälle hochwertig verwerten zu können (Mettke (2010)).

Abbruchobjekt: Das im Rahmen dieses Forschungsprojekts jeweilig betrachtete Abbruchobjekt ist ein Gebäuderohbau, da beim Abbruch des Rohbaus mess- und spürbare Einwirkungen auf die Umwelt durch Lärm, Staub und Erschütterungen zu erwarten sind. Die nachstehend aufgeführten Prozessschritte werden hier nicht betrachtet:

- Entrümpelung und Entkernung des Gebäudes,
- Ausbau von verwertbaren Bauteilen und nicht mehr verwertbaren Einrichtungsgegenständen (bspw. Fenster, Türen, Möbel und Geräte),
- Entfernung von Innenausbauten und Raumauskleidungen sowie der Gebäudehülle (bspw. Fassade, Dachbelag) und
- Entfernung der technischen Gebäudeausrüstung.

Der Gebäuderohbau wird grob an Hand der horizontalen (Decke, Balken, Riegel, Dachkassenplatten) und vertikalen Bauteile (Wand, Stütze) in Typen unterteilt (vgl. Klauß et al. (2009); Grünthal (1998) und HAZUS (2003)). Für die Untersuchung von Lärm-, Staub- und Erschütterungsemissionen bei Abbrucharbeiten werden, wie in Tabelle 1 dargestellt, die eingesetzten Hauptmaterialien dieser Bauteile betrachtet.

Tabelle 1: Grobstruktur der Gebäudetypologie und Hauptmaterialien der Bauteile¹

| Konstruktionsart/ Gebäudetypen | | Vertikale Tragstruktur | | Horizontale Tragstruktur | |
|-----------------------------------|--------------------------------|------------------------|---|--------------------------------------|------------------------------------|
| | | Bauteil | Materialtyp des Bauteils | Bauteil | Materialtyp des Bauteils |
| A | Stahl-Skelettbau | Stütze | Stahl | Träger | Stahl |
| B | Mauerwerk-Stahlbetondecke | Wand | Mauerwerk: <ul style="list-style-type: none"> ● Naturstein ● Ziegel ● Kalksandstein ● Porenbeton ● Betonstein | Deckenplatte | Stahlbeton |
| C | Mauerwerk-Holzträgerdecke | Wand | Mauerwerk: <ul style="list-style-type: none"> ● Naturstein ● Ziegel ● Kalksandstein ● Porenbeton ● Betonstein | Träger/Platte | Holz |
| D | Holz-Fachwerk | Stütze | Holz | Träger | Holz |
| E | Stahlbeton-Montagebau | Wand | Stahlbetonfertigteile | Decken-/Dachkassenplatte/Trogträger | Stahlbeton-, Spannbetonfertigteile |
| F | Stahlbeton-Skelettbau | Stütze | Stahlbetonfertigteile | Träger/Riegel/Unterzüge/Deckenplatte | Stahlbeton-, Spannbetonfertigteile |
| G | Kellergeschoss-Beton-Massivbau | Wand | Unbewehrter Beton, Mauerwerk | Bodenplatte | Stahlbeton |

Abbruchtechniken: Der Abbruch mit Hydraulikbagger und entsprechenden Anbaugeräten ist mit 83% die am häufigsten angewandte Technik beim Abbruch von Gebäuden (Weimann et al. (2013); DA (2015); Expertenbefragung (vgl. Kapitel 2.1.)). Daher liegt der Fokus des Forschungsprojekts, für die Untersuchung der Umwelteinwirkungen, auf diesen Techniken mit Hydraulikbagger, die in Anlehnung an die in der DIN 18007:2009-03 normierten Abbruchverfahren weiter unterteilt werden in Kombination mit den in der Regel hierfür eingesetzten Anbaugeräten. Ergänzend werden der Handabbruch, der Abbruch mit Seilbagger sowie Techniken der Materialhandhabung auf der Baustelle ebenfalls mit einbezogen (vgl. Tabelle 2).

¹ Vgl. Kühlen et al. (2014).

Tabelle 2: Abbruchtechniken - Abbruchverfahren-und-Maschinen-Kombinationen²

| Abbruchtechniken | | | |
|------------------|---|--------------------------------|------------------------------|
| # | Maschinen | | Verfahren |
| | Trägergerät | Anbaugerät | |
| 1 | Hydraulikbagger ³ | Abbruch-/Sortiergreifer | Abgreifen |
| 2 | Seilbagger | Stahlmasse | Einschlagen |
| 3 | Hydraulikbagger | Abbruchstiel/ Tieflöffel | Eindrücken |
| 4 | Hydraulikbagger | Stahlseil | Einziehen |
| 5 | Hydraulikbagger | Abbruchstiel/ Aufbruchgerät | Reißen |
| 6 | Hydraulikbagger | Hydraulikhammer | Stemmen |
| 7 | Hydraulikbagger | Abbruchzange | Pressschneiden |
| 8 | Hydraulikbagger | Stahl-/Schrottschere | Scherschneiden |
| 9 | Handwerkzeug (Elektrohammer, Metalltrennsäge) | | Handabbruch mit Handwerkzeug |
| 10 | Hydraulikbagger | Hydraulikhammer/ Pulverisierer | Materialzerkleinerung |
| 11 | Hydraulikbagger | Abbruch-/Sortiergreifer | Materialsortierung |

Recycling: Unter Zugrundelegung des §3 Abs.25 KrWG (2012) ist Recycling “jedes Verwertungsverfahren, durch das Abfälle zu Erzeugnissen, Materialien oder Stoffen entweder für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke aufbereitet werden; es schließt die Aufbereitung organischer Materialien ein, nicht aber die energetische Verwertung und die Aufbereitung zu Materialien, die für die Verwendung als Brennstoff oder zur Verfüllung bestimmt sind”.

Höherwertige Verwertung: Ist hier in Anlehnung an §3 Abs.23 KrWG (2012) “jedes Verfahren, als dessen Hauptergebnis die Abfälle innerhalb der Anlage oder in der weiteren Wirtschaft einem sinnvollen Zweck zugeführt werden, indem sie entweder andere Materialien ersetzen, die sonst zur Erfüllung einer bestimmten Funktion verwendet worden wären, oder indem die Abfälle so vorbereitet werden, dass sie diese Funktion erfüllen”.

Wiederverwendung: Ist hier in Anlehnung an §3 Abs.21 KrWG (2012) “jedes Verfahren, bei dem Erzeugnisse oder Bestandteile, die keine Abfälle sind, wieder für denselben Zweck verwendet werden, für den sie ursprünglich bestimmt waren”.

² Vgl. DIN 18007:2009-03, DA 2015.

³ Hydraulikbagger beschreibt hier das Trägergerät mit und ohne Longfrontausleger.

Emissionen und Immissionen

Emissionen: Emissionen sind „die von einer Anlage [und anderen Quellen] ausgehenden Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen, Licht, Wärme, Strahlen und ähnlichen Erscheinungen“ (§ 3 Abs.3 BImSchG vom 15. März 1974 (BGBl. I S. 721), in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Mai 2013 (BGBl. I S. 1274), das durch Artikel 1 des Gesetzes vom 2. Juli 2013 (BGBl. I S. 1943) geändert worden ist).

Bezüglich der betrachteten Abbrucharbeiten sind zu unterscheiden:

- **Diffuse Emissionsquellen:** lassen sich hinsichtlich des Ortes, an dem Emissionen auftreten, im Allgemeinen nicht scharf eingrenzen, zumeist ist ein flächenhaftes Auftreten ohne definierte Zuordnung und Begrenzungen von Staub- / Lärmkonzentrationen festlegbar (bspw. Überlagerung mehrerer Tätigkeiten Geräte und Maschinen). Bei diffusen Emissionsquellen ist eine messtechnische Bestimmung vergleichsweise mit großen Ungenauigkeiten behaftet und meist nur schwer ermittelbar (vgl. VDI 3790 Blatt 3 (2010)),
- **Definierte Emissionsquellen:** lassen sich weitestgehend örtlich eingrenzen („punktförmig“) und auf Einzelvorgänge beschränken (z.B. Maschinen auf Abbruchbaustellen, Abbruchvorgang am Gebäude bzw. der baulichen Anlage).

Weiter unterscheidet man für die Modellierung von diffusen sowie definierten Emissionsquellen zwischen den folgenden Quelltypen in Abhängigkeit von der räumlichen Ausdehnung der Quelle relativ zu den Abmessungen des Betrachtungsraums (VDI 3782 Blatt 1, Anhang 2) bzw. relativ zum Abstand zwischen dem Mittelpunkt der Emissionsquelle und dem Messpunkt bzw. Immissionsort⁴:

- Punktquelle: keine/relativ geringe Ausdehnung
- Linienquelle: Länge in m
- Flächenquelle: Fläche in m²
- Volumenquelle: Volumen in m³

Bei geringer Entfernung zwischen Emissionsquelle und Immissionsort kann bspw. der Motor einer Bau- und Abbruchmaschine als punktförmige Emissionsquelle angesehen werden, während die Abbruchaktivität an einer Wand oder Decke als flächen- oder volumenförmige Emissionsquelle abgebildet werden kann.

Die messtechnische Ermittlung von Emissionen, die allein durch den Betrieb von Bau- und Abbruchmaschinen verursacht werden, werden in der Regel mit mehreren, kreisförmig um die Maschine angeordneten Sensoren ermittelt und finden sich in Datenblättern der Maschinenhersteller.

Die messtechnische Ermittlung von diffusen Emissionen aus Abbruchvorgängen ist hingegen mit größeren Herausforderungen verbunden. Die Emissionen werden nicht nur allein vom Abbruchvorgang (als Kombination aus der Abbruchtechnik und den Eigenschaften des Abbruchobjekts), sondern auch von meteorologischen Bedingungen stark beeinflusst und unterliegen daher zumeist starken Schwankungen. Um verlässliche Immissionswerte eruiieren bzw. Emissionskenngrößen bestimmen zu können, bedarf es genauer Messungen, bei denen dennoch mit Ungenauigkeiten zu rechnen ist, da der/die Emissionsort(e)/die –quelle(n) oft nur grob eingegrenzt werden kann/können. Hinzu kommt, dass Abbruchvorgänge häufig diskontinuierliche Aktivitäten sind, in ihren Intensitäten verschieden und (prozessbedingt) im Regelfall zeitlichen Schwankungen unterliegen.

Nachfolgend sind in Tabelle 3 am Beispiel von Staubemissionen Merkmale diffuser und definierter Quellen hinsichtlich relevanter Kriterien nach VDI 3790 Blatt 3 aufgelistet.

⁴ Nach DIN 18005-1:2002-07, ISO 9613-2:1999-10 kann von einer Punktschallquelle ausgegangen werden, wenn die größte Ausdehnung der Emissionsquelle kleiner als die Hälfte des Abstandes zwischen dem Mittelpunkt der Schallquelle und dem Ort der Messung ist (siehe hierzu auch Kapitel 5.1.4).

Tabelle 3: Merkmale diffuser und definierter Staubquellen⁵

| Kriterium | Diffuse Emissionsquelle | Definierte Emissionsquelle |
|---|--|--|
| Räumliche Quellenstruktur abhängig vom Ausdehnungsmaß | Im Allgemeinen große räumliche Ausdehnung mit niedriger Quellhöhe → i.d.R. Flächen- oder Volumenquelle (Abhängig von der Größe des Betrachtungsraums ist eine Annahmen als Punkt- oder Linienquelle möglich) | Eindeutig definierter Quellort aus meist größeren Quellhöhen → i.d.R. Punktquelle |
| Emissionsmechanismus | Gase und Partikel gelangen durch Einwirkung äußerer Kräfte oder als Folge physikalischer Stoffeigenschaften unkontrolliert in die Atmosphäre | Gase und Partikel werden mit einem Abgasstrom zwangsgeführt in die Atmosphäre abgegeben |
| Zeitverhalten der Emission | Emissionsmassenstrom unterliegt häufig starken Schwankungen | Emissionsmassenstrom meist konstant |
| Abhängigkeit der Emissionen von Umgebungseinflüssen | Meist stark | Weitgehend unabhängig |

Eine Unterscheidung hinsichtlich des Auftretens am Beispiel diffuser Luftverunreinigungen kann in:

- natürliche und anthropogene (Grundbelastung, die zur natürlichen Zusammensetzung der Luft gezählt werden kann),
- primäre oder sekundäre und
- mobile und stationäre (ortsfeste)

Quellen erfolgen.

Im Zuge der Betrachtung der Immissionen bei Abbrucharbeiten spielen primäre u./o. sekundäre Quellen sowie mobile und stationäre Quellen eine entscheidende Rolle. Primäre Quellen für Lärm und Staub sind hier bspw. die allgemein durchgeführten Tätigkeiten auf der Baustelle, Maschinen- und Geräteinsatz, mechanische Beanspruchungen des Abbruchmaterials und der eingesetzten Technik, Baustellenverkehr etc. Hierbei werden bspw. die partikelförmigen Stäube direkt freigesetzt.

Immissionen: Immissionen sind „auf Menschen, Tiere und Pflanzen, den Boden, das Wasser, die Atmosphäre sowie Kultur- und sonstige Sachgüter einwirkende Luftverunreinigungen (z.B. Staub, Gase oder Geruchsstoffe), Geräusche, Erschütterungen, Licht, Wärme, Strahlen und ähnliche Umwelteinwirkungen“ (§ 3 Abs.2 BImSchG vom 15. März 1974 (BGBl. I S. 721), in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Mai 2013 (BGBl. I S. 1274), das durch Artikel 1 des Gesetzes vom 2. Juli 2013 (BGBl. I S. 1943) geändert worden ist). Relevante Beurteilungspunkte für die Messung von Immissionen beim Abbruch werden je nach Schutzgut, Situation und Rahmenbedingungen bestimmt.

Beim Bauwerksabbruch sind Arbeitnehmer und Anwohner sowie die angrenzenden baurechtlichen Gebiete und Nachbarbauwerke als relevante Schutzgüter zu bezeichnen, die je nach Gebietstyp im Bebauungsplan unterschiedliche Schutzanforderungen haben. Die bei der Immissionsmessung von Lärm, Staub und Erschütterungen relevanten Beurteilungspunkte, Richtwerte und Schutzbedürftigkeit der Immissionsorte sowie Gesetze, Normen und Richtlinien werden in Kapitel 3.1 erläutert.

Bei der Beurteilung und Messung von Immissionen sind die lokalen Rahmenbedingungen zu beachten und zu dokumentieren. Denn Vorbelastungen, meteorologische Bedingungen, Abbruchverfahren, Größe von Maschine(n) und Anbaugerät(en), Höhe der Emissionsquelle(n) über der Geländeoberkante, Umfeld (Nachbarbebauung, Bewuchs etc.) und Zeitdauer haben Einfluss auf die Messergebnisse. Für die Messung von Immissionen an Abbruchbaustellen kann durch Schutzmaßnahmen eine Minderung ermittelt, herbeigeführt und dokumentiert werden.

⁵ Vgl. hierzu VDI 3790 Blatt 1:2005-01, Tabelle 1 und 2.

Erschütterungen und Vibrationen: Nach DIN 4150-1 (2001) sind Erschütterungen mechanische Schwingungen fester Körper mit potenziell schädigender oder belastender Wirkung. Erschütterungen breiten sich durch das Einleiten dynamischer Energie in den Boden und die Übertragung durch Bodenwellen aus. Immissionen auf die Umwelt können insbesondere in den Boden (Lithosphäre), auf Menschen und auf bauliche Anlagen (benachbarte Bauwerke, Rohrleitungen und Kabel) einwirken. Kurzzeitige Erschütterungen, wie etwa bei einer Sprengung oder beim Massenaufprall, haben eine kurze Auftrittshäufigkeit. Dauererschütterungen treten beispielsweise beim Fräsen und Stemmen auf (vgl. DA (2015)).

Lärm: Die Begriffe Schall und Lärm werden oft synonym verwendet, wie auch in diesem Bericht. Die Begriffe stellen streng genommen jedoch unterschiedliche Betrachtungsebenen dar. Schall ist eine messbare physikalisch-akustische Größe und Lärm beschreibt eher die Wirkung. Mit Lärm wird in der Regel jegliche Schalleinwirkung definiert, die belästigt, stört oder gesundheitliche Schäden hervorruft (UBA (2011b)). Nach TA Lärm können Geräuschimmissionen abhängig von Art, Ausmaß oder Dauer, Gefahren, erhebliche Nachteile oder erhebliche Belästigungen für die Allgemeinheit oder die Nachbarschaft herbeiführen (TA Lärm, 2.1). Diese Geräuschimmissionen sind als Schalldruck beziehungsweise als Schalldruckpegel eines Geräusches und als Geräuschspektrum messbar (TA Lärm (1998)). Laut DIN 18007:2009-03 können insbesondere bei den folgenden Abbruchverfahren Lärmemissionen auftreten: Einschlagen, Stemmen, Sprengen, Vollbohren, Sägen (Wand und Boden), Schneiden (Brenn- und Hochdruckwasserschneiden) und Hochdruckwasserstrahlen. Die Abbruchverfahren Abgreifen, Eindrücken, Einziehen und Einreißen weisen nach DIN 18007:2009-03 keine relevanten Lärmemissionen auf. Aber zum Beispiel zeigen die Ergebnisse des vorliegenden Forschungsprojekts (vgl. bspw. Kapitel 3.2.4) Abweichungen zu dieser Einstufung von Abbruchverfahren hinsichtlich Lärmemissionen nach DIN.

Schadstoffe: sind neben Gefahrstoffen (GefStoffV) und biologischen Arbeitsstoffen (BiostoffV) auch Stoffe oder Stoffgemische (Reinstoff, Produkt, Erzeugnis, Rückstand, Reststoff, Abfall), die zu einer Gefährdung der Nutzer oder der am Abbruch Beteiligten führen können (vgl. VDI/GVSS 6202 (2013)) oder die bei Eintrag in Ökosysteme oder Aufnahme durch lebende Organismen oder an Sachgütern nachteilige Veränderungen hervorrufen können (z. B. korrosiv wirkende Stoffe) (vgl. DA (2015)). Es wird zwischen primären, sekundären und nutzungsbedingten Belastungen unterschieden (vgl. VDI/GVSS 6202 (2013)). Primäre Belastungen entstehen herstellungsbedingt durch gefährliche Stoffe in Bauprodukten, sekundäre Belastungen entstehen durch Verunreinigung von vorher nicht belasteten Bauprodukten durch Schadstoffe (wenn bspw. das Ausgasen einer PCB Fugenmasse langfristig zu einer flächenhaften Belastung des Fußbodenbelags führt). Nutzungsbedingte Belastungen sind Verunreinigungen der Bausubstanz, die durch den Umgang mit Gefahrstoffen oder Arbeitsmitteln in der Nutzungsphase des Gebäudes entstehen (vgl. VDI/GVSS 6202 (2013) und DA (2015)).

Schutzgut: Der Begriff Schutzgut umfasst alles, „was aufgrund seines ideellen oder materiellen Wertes vor einem Schaden bewahrt werden soll“ (BKK (2012)). Nach dem Bayerischen Lebensministerium (stmug (2012)) sind „Schutzgüter von der Rechtsordnung geschützte Güter des Einzelnen (z.B. Leben, Gesundheit, Eigentum) oder der Allgemeinheit (z.B. Reinheit der Gewässer)“. Im Rahmen dieses Projekts liegt der Fokus auf den beim Bauwerksabbruch relevanten Schutzgütern, wie den Arbeitnehmern und Anwohnern sowie den angrenzenden baurechtlichen Gebieten, Nachbarbauwerken. Für die jeweiligen Schutzgüter gelten unterschiedliche Schutzanforderungen hinsichtlich der Höhe von Lärm, Staub- und Erschütterungsimmissionen. Nähere Informationen sind unter anderem Kühlen et al. 2014 zu entnehmen.

Staub: Staub ist eine Zerstreuung fester Stoffe in der Luft durch mechanische Prozesse oder durch Aufwirbelungen. Man unterscheidet zwischen den folgenden Arten von Stäuben: organisch (z. B. Holzstaub), mineralisch (z. B. Steinstaub), metallisch (z. B. Aluminiumstaub). Nach § 3 Abs. 4 BImSchG ist Staub, neben Rauch, Ruß, Gasen, Aerosolen, Dämpfen oder Geruchsstoffen, eine Form der Luftverunreinigungen. Luftverunreinigungen sind Veränderungen der natürlichen Zusammensetzung der

Luft und haben schädliche Einwirkungen auf die Umwelt, wenn sie nach Art, Ausmaß oder Dauer geeignet sind, Gefahren, erhebliche Nachteile oder erhebliche Belästigungen für die Allgemeinheit oder die Nachbarschaft herbeizuführen (vgl. § 3 Abs. 1 BImSchG). Im Rahmen des Forschungsprojekts liegt der Fokus auf Staub durch Abbruchaktivitäten als eine Form der Luftverunreinigung. Auf Abbruchbaustellen handelt es sich hauptsächlich um mineralischen Staub oder Mischstaub. Die Korngröße und die Staubinhaltsstoffe sind maßgeblich für die Gefährlichkeit eines Staubes. Auswirkungen auf die Gesundheit kann vor allem Feinstaub haben. Als gesundheitlich besonders gefährlich ist Quarzstaub zu bewerten, der aus Mischstaub mit einem Anteil an Quarzfeinstaub besteht (vgl. TRGS 559, Abschnitt 2.4).

- **Diffuse Staubemissionen:** sind Staubemissionen, wie sie durch Abbruchtätigkeiten hervorgerufen werden, die über einen nicht definierten/erfassbaren Luftvolumenstrom in die Umgebungsluft emittiert werden (vgl. BMWFI (2013)).
- **A-Staub oder PM4** (Korngröße $\leq 4 \mu\text{m}$) (vgl. Abbildung 1): Alveolengängige Fraktion. Im Arbeitsschutz wird die Bezeichnung A-Staub für den Massenanteil der einatembaren Partikel, der bis in die nicht cilierten Luftwege vordringen kann, verwendet. Diese Fraktion entspricht den im Umweltschutz mit PM4 bezeichneten Partikeln, die einen aerodynamischen Durchmesser $\leq 4 \mu\text{m}$ haben. Unter diese Fraktion fällt auch „Quarzfeinstaub“ (Mattenklott und Höfert (2009)).
- **E-Staub** (Korngröße $> 10 \mu\text{m}$) (vgl. Abbildung 1): Einatembare Fraktion. Im Arbeitsschutz wird die Bezeichnung E-Staub für den Massenanteil aller Schwebstoffe, der durch Mund und Nase eingeatmet werden kann, verwendet. Die Schwebstoffe schlagen sich an den Schleimhäuten der oberen Atemwege nieder.
- **Feinstaub:** Wurde im Arbeitsschutz früher für die jetzt mit A-Staub bezeichnete alveolengängige Fraktion verwendet (TRGS 900 bis 1993). Im Umweltschutz ist es kein definierter Begriff. Er wird hier jedoch im Zusammenhang mit PM10 und PM2,5 im Rahmen der Umsetzung der EU-Richtlinie 2008/50/EG durch das 22. BImSchV verwendet (Mattenklott und Höfert (2009)).
- **PM2,5** (Korngröße $\leq 2,5 \mu\text{m}$) (vgl. Abbildung 1): Alveolengängige Fraktion „Risikogruppe“. Im Umweltschutz entspricht die mit PM2,5 bezeichnete Staubfraktion Partikel, die einen aerodynamischen Durchmesser $\leq 2,5 \mu\text{m}$ haben. Seit 2010 wurde im Umweltschutz für diese Fraktion, auch Feinstaub genannt, ein Grenzwert eingeführt (EU-Richtlinie 2008/50/EG und 39. BImSchV) (Mattenklott und Höfert (2009), UBA, 2011a). Im Arbeitsschutz gibt es hierzu keine Definition und derzeit jedoch keinen Grenzwert.
- **Thorakaler Staub oder PM10** (Korngröße $\leq 10 \mu\text{m}$) (vgl. Abbildung 1): Diese Staubgröße entspricht den im Umweltschutz mit PM10 bezeichneten Partikeln, die einen aerodynamischen Durchmesser $\leq 10 \mu\text{m}$ haben. Im Arbeitsschutz wird die Bezeichnung thorakaler Staub für den Massenanteil der einatembaren Partikel, der über den Kehlkopf hinaus vordringen kann, verwendet. Hier gibt es im Arbeitsschutz derzeit jedoch keinen Grenzwert. Seit 2005 wurde im Umweltschutz für diese Fraktion der zuvor genannte Grenzwert eingeführt, der häufig auch als „Feinstaub-Grenzwert“ bezeichnet wird (EU-Richtlinie 2008/50/EG und 22. BImSchV) (Mattenklott und Höfert (2009)).

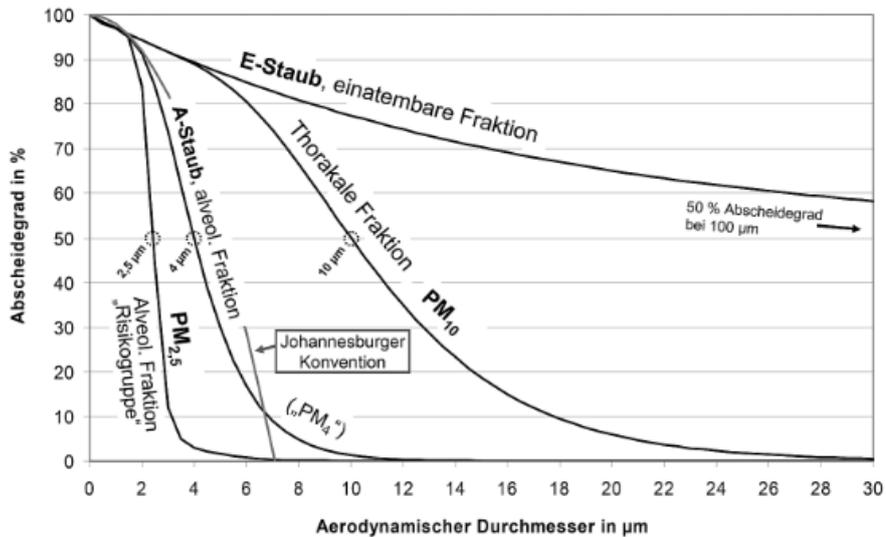


Abbildung 1: Konventionen definierter Staubfraktionen⁶

Vorbelastung: Der Begriff der Vorbelastung wird beispielsweise in der TA Luft (2002) und TA Lärm (1998) definiert. Hier wird zwischen Vorbelastung, Zusatzbelastung und Gesamtbelastung differenziert. Im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojekts wird die Vorbelastung als die vorhandenen Lärm-, Staub- und Erschütterungsimmissionen definiert, die auf ein Schutzgut einwirken, ohne den Immissionsbeitrag der Abbruchaktivität. Die Lärm-, Staub- und Erschütterungsimmissionen, die durch die Abbruchaktivitäten hervorgerufen auf ein Schutzgut einwirken, werden als Zusatzbelastung bezeichnet. Und die Gesamtbelastung ist im Rahmen dieses Projekts die Lärm-, Staub- und Erschütterungsimmissionen, die insgesamt zu einem Zeitpunkt bzw. innerhalb einer bestimmten Zeitspanne auf ein Schutzgut einwirken.

⁶ Mattenklott und Höfert (2009).

Zusammenfassung

In Zukunft wird der Abbruch von Bauwerken zwingend erforderlich werden auf Grund baulicher Veränderungen in Innenstädten, des begrenzten Platzes und der hohen Dichte an baulichen Anlagen. Der Rückbau als spezifische Form des Abbruchs ist somit ein wesentlicher Bestandteil des Gebäudelebenszyklus. Er verursacht jedoch Lärm, Staub und Erschütterungen, die auf die Umwelt und insbesondere den Menschen, belästigende und (gesundheits-)schädigende Auswirkungen haben können.

Durchgeführte Untersuchungen, Entwicklungen mit Angabe des Ziels

Als Beitrag zu einer nachhaltig lebenswerten Gestaltung von Städten und zur Steigerung der Akzeptanz von Rück- und somit auch von Bauprojekten insbesondere in Innenstädten, ist **das Ziel des Forschungsprojekts**, den Immissionsschutz als integralen Bestandteil der Planung und Durchführung von Abbrucharbeiten zu etablieren. Nur so können Lärm-, Staub- und Erschütterungsimmissionen effektiver reduziert und ein verbesserter Umwelt- und Gesundheitsschutz erreicht werden. **Zur Zielerreichung wurden** im Projekt drei neue Instrumente entwickelt. Dies sind:

1. eine Datenbank mit ökonomischen, ökologischen und technischen Kennwerten für den Abbruchprozess,
2. ein IT-basiertes Planungsunterstützungswerkzeug, das auf die Datenbank zugreift,
3. ein Immissionserfassungssystem zur permanenten Immissionsüberwachung.

1. Die Datenbank wurde auf Basis von MS Access mit Tabellen von technischen, ökonomischen und ökologischen Kennwerten/Kennzahlen erstellt. Der vorliegende Endbericht sowie der Projektbericht der 2. Phase (Kühlen et al. 2014) beschreiben die Struktur und enthalten die Tabellen der Datenbank. Da in der Literatur die für die Kennwerte der Datenbank notwendigen Informationen kaum vorhanden sind, wurden im Rahmen des Projekts Primärdaten auf Basis von Versuchen und Expertenbefragungen erhoben.
2. Das IT-basierte Planungsunterstützungswerkzeug wurde in Visual Basic for Applications (VBA) prototypisch umgesetzt und mit der Planung eines realen Vorhabens verifiziert. Mit dem Werkzeug kann der Immissionsschutz bereits in die Planung von Abbrucharbeiten integriert werden. Das Werkzeug liefert Vorschläge zu Abbruchtechniken hinsichtlich der Minderung von Immissionen auf die lokale Umwelt und der Einhaltung von Immissionsrichtwerten. Die Umgebungsbedingungen und technischen Möglichkeiten werden bei der Entscheidung berücksichtigt und auch ökonomische Faktoren können in die Entscheidung eingebunden werden. Das Werkzeug kann zukünftig bspw. den Bauherrn, Planer, Abbruchunternehmer und Behörden bei der Planung und in ihren Entscheidungen bei Abbruchprojekten unterstützen.
3. Das Immissionserfassungssystem wurde messtechnisch prototypisch umgesetzt und unter Versuchsbedingungen getestet. Mit dem System kann der Immissionsschutz bei der Durchführung von Abbrucharbeiten integriert werden. Das System misst die Immissionshöhen von Lärm, Staub und Erschütterungen permanent mittels Sensoren und an bis zu 10 Messpunkten. Weiter werden die Messwerte gespeichert und über die Zeit ausgewertet. Das Erfassungssystem könnte in Zukunft bspw. vom Bauherrn, Planer, Abbruchunternehmer und Behörden zur Dokumentation und Kontrolle von Immissionen durch Abbrucharbeiten verwendet werden.

Akteurspezifische Handlungsempfehlungen für die Integration des Immissionsschutzes in der Praxis von Rückbauprojekten wurden abgeleitet. Diese Empfehlungen enthalten unter anderem Hinweise, von wem die drei Instrumente, die im Rahmen des Projekts entwickelt wurden, in Zukunft möglicherweise um- und einzusetzen sind.

Erzielte Ergebnisse und Erkenntnisse

Sowohl das Planungsunterstützungswerkzeug mit Datenbank als auch das Immissionserfassungssystem wurden prototypisch getestet respektive umgesetzt. Die Eignung beider Systeme zur Lösung der Problemstellung konnte nachgewiesen werden. Instrumente, wie sie hier prototypisch entwickelt wurden, können in Zukunft eine umfassende Unterstützung von Bauherren, Planern, ausführenden Unternehmen und Behörden in Fragen des Immissionsschutzes ermöglichen. Zusätzlich ist eine Sicherstellung der Einhaltung der Immissionsgrenzwerte zur Minderung von Konfliktpotenzialen unerlässlich, um auch zukünftig einen für die Unternehmen, Behörden und Bürger reibungslosen, ordnungsgemäßen und rechtskonformen Ablauf der Baumaßnahme zu ermöglichen.

Empfehlungen für weiteres Vorgehen

In erster Linie erfordert die Berücksichtigung von Immissionen als integraler Bestandteil in Planung und Durchführung von Abbrucharbeiten **eine Verankerung des Immissionsschutzes in der Ausschreibung**. Hier müssten neben technischen Anforderungen auch immissionsschutzrelevante Anforderungen im Detail spezifiziert werden. In diesem Zusammenhang wäre es erstrebenswert den Einsatz von Instrumenten für die Planung und Durchführung von Abbrucharbeiten, wie sie im Projekt prototypisch umgesetzt wurden, vorzuschreiben und ein entsprechendes Budget wäre in der Ausschreibung anzusetzen. Insbesondere der öffentliche Bauherr sollte hierbei eine Vorreiterrolle einnehmen und seine Ausschreibungen entsprechend ergänzen/anpassen. Um jedoch die beiden prototypisch umgesetzten Systeme zur Praxistauglichkeit weiterzuentwickeln, bedarf es noch weiterer Anstrengungen. Die größten Herausforderungen sind hier die Steigerung der Nachfrage nach solchen Instrumenten und das Finden von Partnern mit denen die Systeme weiterentwickelt werden können. Erst wenn gefordert wird, dass Immissionen in Leistungsbeschreibungen zu integrieren sind, wird die Nachfrage nach solchen Instrumenten akut. Die Grundlagen dafür sind im Rahmen des vorliegenden Projektes gelegt. Dennoch sind weitere Entwicklungen notwendig, damit eine Überführung der Systeme aus der universitären Forschung in die Praxis erfolgen kann.

Kooperationspartner/Institutionen

- Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung (DFIU), Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
- Institut für Technologie und Management im Baubetrieb (TMB), Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
- Fachgruppe Bauliches Recycling, Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg (BTU)
- Jean Harzheim GmbH & Co. KG (Harzheim GmbH)

Das diesem Bericht zugrunde liegende Forschungsprojekt AZ 29014 wurde von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) gefördert.

1. Einleitung

1.1. Ausgangssituation

Umweltsituation: Der Abbruch und/oder (Teil-) Rückbau⁷ bestehender, nicht weiter nutzbarer Bauwerke, wird in Zukunft zunehmend erforderlich sein, denn viele ältere Gebäude lassen sich in der Regel nur teilweise oder gar nicht an veränderte Nutzungsbedingungen und hohe energetische Standards anpassen. Nachhaltigkeitszielsetzungen fordern die Begrenzung des Flächenverbrauchs sowie die Schaffung umwelt- und sozialverträglicher Siedlungsstrukturen (vgl. EK-SMU (1998) und (1999)). Zudem führen demografische und wirtschaftliche Veränderungen, wie der Bevölkerungsrückgang und die Verlagerung von Industrie- und Gewerbestandorten in Deutschland dazu, dass im Rahmen von Stadtumbaumaßnahmen Abbruch und Neubau von Gebäuden und baulichen Anlagen notwendig und sinnvoll sind (vgl. Görg (2001)). Daher ist der Abbruch wesentlicher Bestandteil des Gebäudelebenszyklus und kann sowohl Ende als auch Anfang (Materialquelle für den Neubau und Schaffung freier Fläche) eines Lebenszyklus darstellen. Oft wird der Abbruch jedoch mit untergeordneter Wichtigkeit am Lebenszyklusende eines Bauwerks wahrgenommen (vgl. DA (2015)). Im Rahmen der aktuellen Entwicklungen im Bereich des nachhaltigen Bauens wird die Abbruchphase meist hinsichtlich Verwertung und Beseitigung von Abbruchmaterialien, also der Abbruchnachbereitung, beleuchtet. Der zentrale Teil des Abbruchprozesses (Planung und Ausführung) mit seinen Auswirkungen auf Mensch und Umwelt spielt, wenn überhaupt, eine untergeordnete Rolle.

Spezifische Umweltrelevanz: Der Abbruch von Bauwerken verursacht Emissionen. Diese können maßgeblich die auf Schutzgüter, wie beispielsweise den Menschen, einwirkenden Immissionen⁸ beeinflussen (Haltenorth et al. (2007); DA (2015); SBUV (2005)), die wiederum z.B. gesundheitliche Auswirkungen haben können (vgl. Kühlen et al. 2014, Abbildung 2). Insbesondere Lärm⁹, Staub¹⁰ und Erschütterungen sind relevante Emissionen des Abbruchprozesses (vgl. DA (2015), DIN 18007:2009-03) und bieten entsprechend Immissionsminderungspotenziale. Nach § 22 BImSchG müssen die nach dem Stand der Technik vermeidbaren Emissionen verhindert und die unvermeidbaren minimiert werden. Verantwortlich für die Einhaltung dieser immissionschutzrechtlichen Anforderungen ist in erster Linie der Baustellenbetreiber, d.h. in der Regel der Bauherr oder der von ihm beauftragte Planungsingenieur, und der Abbruchunternehmer (vgl. Strobusch (2011); Kummer (2013)). Die Einhaltung der Anforderungen kann durch die zuständigen Behörden kontrolliert werden. Auf Grund der vielen Parameter, die den Abbruchprozess mit seinen einzelnen Abbruchvorgängen¹¹ und die damit verbundenen Einwirkungen auf die lokale Umwelt bestimmen, ist derzeit eine qualitative und quantitative Charakterisierung der Umwelteinwirkungen von Abbruchvorgängen, in Form von Lärm, Staub und Erschütterungen, sehr schwierig. Beispielsweise können die Staubemissionen aus diffusen Quellen, wie sie beim Abbruch auftreten, bis jetzt nicht in dem Maße gemindert werden, wie etwa Staubemissionen aus definierten Quellen, bspw. der industriellen Produktion (vgl. BMWFI

⁷ Im Folgenden wird der Begriff Abbruch wie im Titel des Forschungsprojekts auch für den Begriff Rückbau verwendet. Die Begriffe Abbruch und Rückbau werden heute fast synonym verwendet. Beide Begriffe beschreiben das teilweise oder umfassende Entfernen von technischen oder baulichen Anlagen. Beim Rückbau werden in der Regel ökologische Gesichtspunkte, wie das Wiederverwerten von Baustoffen und eine weitere Nutzung der freiwerdenden Fläche, explizit berücksichtigt. Jedoch verpflichten Vorschriften auch beim Abbruch dazu, Materialien zu trennen und Immissionsbelastungen zu minimieren, sodass insbesondere im innerstädtischen Bereich eine Abgrenzung der beiden Begriffe nur begrenzt möglich ist.

⁸ Im Folgenden wird der nicht wertende Begriff „Immission“ statt des im Titel des Forschungsprojekts verwendeten Begriffs „Umweltbelastung“ verwendet. Weitere Begriffserklärungen finden sich im Glossar (vgl. Anhang A).

⁹ Im Folgenden wird der Begriff „Lärm“ statt des Begriffs „Geräusche“ verwendet, wodurch implizit von als lästig empfundenen Geräuschen ausgegangen wird.

¹⁰ Im Folgenden wird der Begriff „Staub“ statt des Begriffs „Luftverunreinigungen“ verwendet. Weitere Begriffserklärungen finden sich im Glossar (vgl. Anhang A).

¹¹ Im Folgenden wird der Begriff Abbruchvorgang zur Beschreibung eines bestimmten Geschehens (vgl. DIN 69900:2009-01) im Abbruchprozess verwendet. Ein Vorgang ist somit im Rahmen des Projekts eine Kombination aus Abbruchtechnik, Abbruchmaterial und Abbruchhöhe über Geländeoberkante.

(2013)). Abbruchbaustellen stellen sich hinsichtlich ihrer Lage und Dauer der Arbeiten, der Komplexität im Betrieb sowie der verwendeten Baumaterialien, der Technologien, des Maschinen- und Geräteeinsatzes und insbesondere der Umwelteinwirkungen (Lärm-, Staub- und Erschütterungsemissionen bzw. -immissionen) sehr unterschiedlich dar. In Abbildung 2 sind **mögliche Emissionsquellen** aufgeführt, welche zu Beeinträchtigungen (Immissionen) und ggf. Belästigungen der Anwohner und in der Nachbarschaft, aber auch zu Auswirkungen auf die direkt auf der Baustelle tätigen Arbeitskräfte beitragen.



Abbildung 2: Mögliche Emissionsquellen bei Arbeitsprozessen auf Abbruchbaustellen

Stand der Technik: Bei einem Teil der in Deutschland in den Abbruchprozess involvierten Akteure sind die Betrachtung von Lärm-, Staub- und Erschütterungsimmissionen bereits integraler Bestandteil der Abbruchplanung, Abbruchdurchführung und Abbruchnachbereitung. Oft wird der Immissionsschutz derzeit jedoch nur unzureichend berücksichtigt und entsprechende Schutzmaßnahmen zur Minderung der Immissionen werden selten in die Ablaufplanung und –durchführung einbezogen (vgl. Haltenorth et al. (2007)). Gründe hierfür sind u.a. unvollständige Ausschreibungsunterlagen (beispielsweise ohne Differenzierung des bauplanungsrechtlichen Umfeldes), mangelnder Kenntnisstand hinsichtlich Ursachen und zielgerichteter Beeinflussung zur Eindämmung der Emissionen und Immissionen, unvollständiges Messkonzept (bspw. ohne Berücksichtigung der Vorbelastung) und Wirtschaftlichkeitsaspekte (vgl. DA (2015) (bspw. unzureichender Arbeits- und Gesundheitsschutz)). Beispielsweise orientiert sich die Zielstellungen der Auftraggeber bei der Abbruchplanung derzeit im Wesentlichen an kurzen Abbruchdauern und niedrigen Kosten. Auch in der Abbruchdurchführung wird aus Wirtschaftlichkeitsgründen der Immissionsschutz in vielen Fällen ungenügend betrachtet.

fehlungen enthalten unter anderem Hinweise, wo die drei Instrumente, die im Rahmen des Projekts prototypisch entwickelt wurden, in Zukunft möglicherweise um- und einzusetzen sind.

1.3 Aufbau des Berichts

Zwecks besserer Lesbarkeit des Berichtes ist dieser nicht nach Arbeitspaketen sondern inhaltlich nach **den** einzelnen Bestandteilen des Gesamtkonzepts, in Form der neu entwickelten **Instrumente und erzielte Projektergebnisse**, strukturiert.

Der Stand der Technik sowie rechtliche Rahmenbedingungen und Regelwerke, Hilfsmittel zur Unterstützung der Abbruchplanung und derzeitige Messtechniken werden ausführlich im Kapitel 3 des Endberichts zur 2. Projektphase (Kühlen et al. 2014) dargelegt.

In **Kapitel 2** werden zunächst die zur Primärdatenerhebung durchgeführten Untersuchungen/eingesetzten Methoden für die Erstellung der Kennwerte/Kennzahlen der Datenbank beschrieben. In **Kapitel 3** wird der Aufbau, die Bedienung und der Test des IT-basierten prototypischen Planungsunterstützungswerkzeugs vorgestellt. Der Aufbau mit den zur Verifikation erfolgten Versuchen/Untersuchungen sowie die Bedienung des Immissionserfassungssystems werden in **Kapitel 4** erläutert. In **Kapitel 5** werden die Ergebnisse/die Instrumente im Hinblick auf die Zielsetzung des Projekts diskutiert. Weiter werden die Instrumente hinsichtlich deren praktischer Nutzens bewertet. Es wird die durch die Ergebnisse mögliche Umweltentlastung ausgewiesen. Es werden auch die erfolgten (und geplanten) Maßnahmen zur Verbreitung der Ergebnisse und zum Hineintragen der Instrumente in die Praxis dargelegt. **Kapitel 6** fasst die Ergebnisse mit einer kritischen Würdigung abschließend zusammen und gibt einen Ausblick auf zukünftig nötige Arbeiten, Forschungsthemen und Untersuchungen.

2. Primärdatenerhebung für die Datenbank

Im Projekt wurden **Kennwerte/Kennzahlen** für eine technische, ökonomische und ökologische Bewertung des Abbruchprozesses auf der Baustelle erstellt und in einer **Datenbank** zusammengeführt. Die für die Erstellung der Kennwerte/Kennzahlen und für die weiteren Stammdaten der Datenbank notwendigen Daten wurden auf Basis von **Literatur**, und vor allem auf Basis von im Rahmen des Projekts primär erhobenen Daten aus **Expertenbefragungen (siehe Kapitel 2.1.), Versuchen (siehe Kapitel 2.2.) und Messungen auf Abbruch- und Rückbaubaustellen (Kühlen et al. (2014)) erhoben**. Für die Erhebung der Daten und deren Strukturierung wurden die Abbruchvorgänge in Anlehnung an die in der DIN 18007:2009-03 normierten und die am häufigsten angewandten Abbruchverfahren (Weimann et al. (2013), Expertenbefragung (Kapitel 2.1.)) definiert (siehe Tabelle 2 in Kapitel „Begriffe und Definitionen“ (DIN 18007:2009-03, DA (2015))). Weiter wurden hierfür die Bestandsgebäude in Deutschland anhand von Baumaterialien und Konstruktionsweisen (Bauart bestimmende Merkmale) in Anlehnung an Klauß et al. (2009); Grünthal (1998) und HAZUS (2003) typisiert (siehe Tabelle 1 in Kapitel „Begriffe und Definitionen“ (Kühlen et al. (2014))).

Ergänzend zu den in der Phase 1 und 2 erhobenen Daten und verwendeten Datenquellen (Kühlen et al. 2014) wurde die Datenbank in der 3. Phase insbesondere um folgende Daten und Datenquellen ergänzt:

vorwiegend **auf Basis von Literatur** um Daten

- **zum Ressourceneinsatz,**
- **zu Schutzmaßnahmen und**
- **zu umfeldbezogenen Emissionsabnahmeeffekten**

sowie auf Basis von Expertenbefragungen und Versuchen um material- und abbruchtechnikbezogene **Primärdaten** zu

- **Lärm-,**
- **Staub- und**
- **Erschütterungsemissionen.**

Details zu diesen in der 3. Phase erhobenen Daten und Datenbank-Tabellen mit erstellten Kennwerten enthält Kapitel 3. Hier werden im Rahmen der Erläuterung des prototypischen IT-basierten Planungsunterstützungswerkzeugs, das auf die Informationen der Datenbank zugreift, die Art, Anzahl und Kosten des Ressourceneinsatzes (siehe Kapitel 3.2.3.), die ausgewählten Schutzmaßnahmen (siehe Kapitel 3.1.2., Tabelle 13), die Berechnung von Immissionen auf Basis von umfeldbezogenen Emissionsabnahmeeffekten sowie die aktualisierten und erweiterten Emissionskennwerte (siehe Kapitel 3.2.4.) beschrieben.

Die zwei Vorgehensweisen zur Primärdatenerhebung, „Expertenbefragung“ und „Immissionsmessungen unter Versuchsbedingungen“, werden im Folgenden näher erläutert.

2.1. Expertenbefragung

Um Literaturquellen durch Primärdaten aus Expertenwissen zu ergänzen, wurde zur Bewertung verschiedener Abbruchtechniken hinsichtlich der zu erwartenden Emissionen (Lärm, Staub und Erschütterung) eine Befragung von Experten der Abbruchbranche durchgeführt. Die Befragung erfolgte als Online-Umfrage unter den Abbruch- und Recyclingunternehmen, die Mitglied des Deutschen Abbruchverbandes sind, über einen Zeitraum von 7 Wochen (12.01.2015 - 03.03.2015). Von den 84 (100%) Unternehmen, die angeschrieben wurden, haben 57 Experten die Umfrage begonnen. Von diesen 57 haben 18 Experten (21%) die Umfrage beendet. Möglicher Abbruchgrund für die 39 der 57 Experten war der zeitliche Umfang der Befragung von ca. 25 Minuten. Die folgenden Ergebnisse, die

auch in das Planungsunterstützungswerkzeug integriert wurden, basieren auf den 18 abgeschlossenen Umfragen.

2.1.1. Allgemeine Informationen

Alle Befragten haben mindestens 14 Jahre Erfahrung in der Abbruchbranche und 50% können mehr als 20 Jahre **Berufserfahrung** in der Abbruchbranche vorweisen. Der Großteil der Befragten arbeitet in für die Branche relativ großen Unternehmen mit 35 bis 950 Mitarbeitern (> 50% der Befragten).¹²

Für die Durchführung des Abbruchs ist der Hydraulikbagger, das am häufigsten verwendete Trägergerät, mit über 55% aller Nennungen (Mehrfachnennungen möglich). Über 50% der hier eingesetzten Hydraulikbagger hat eine Größe zwischen 25 und 30 Tonnen. Ein Hydraulikbagger dieser Größe sowie die Abbruchzange, der Abbruchhammer, der Pulverisierer und Abbruchgreifer als Anbaugerät werden bei über 80% der Befragten eingesetzt. Mit jeweils über 15% der Gesamtnennungen (Mehrfachnennungen möglich) werden diese Anbaugeräte am häufigsten genutzt.

Die Einsatzhäufigkeit der Anbaugeräte spiegelt sich auch in den am häufigsten verwendeten/angewandten Abbruchtechniken wider. Unter den Befragten werden die Techniken Abgreifen (78%), Stemmen (72%), Scherschneiden (61%) und Eindrücken (56%) am häufigsten beim Abbruch eingesetzt. Bei den Befragten werden von jenen in der DIN 18007:2009-03 normierten Abbruchverfahren Lockerungssprengung und Spalten nicht und Kernbohren, Seilsägen, Wasserstrahlschneiden und Schleifen nur in einem geringen Umfang eingesetzt (Abbildung 4).¹³

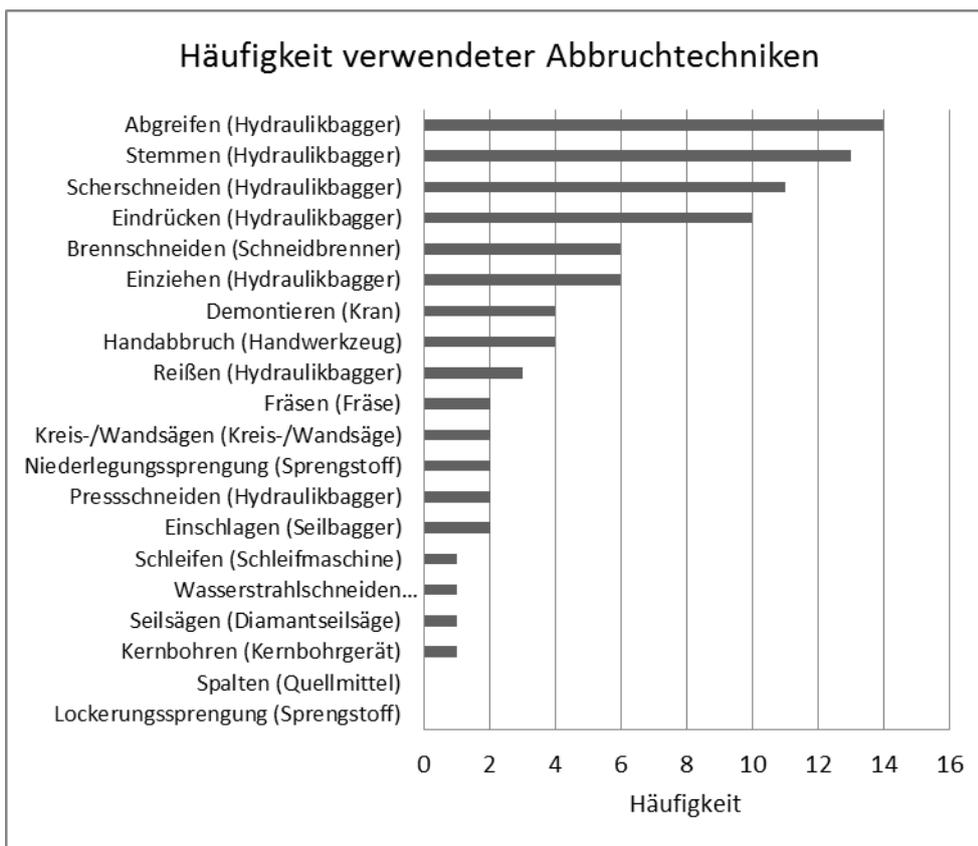


Abbildung 4: Häufigkeitsverteilung der verwendeten Abbruchtechniken

¹² Die Ergebnisse basieren auf der freiwilligen Angabe von 17 der 18 Befragten (siehe auch Anhang A).

¹³ Mehrfachnennungen waren möglich, aber waren auf max. 5 Techniken beschränkt.

Wie auch in Tabelle 2 gelistet, wird der Abbruchgreifer, neben Abgreifen und teilweise für das Eindrücken, zum Materialsortieren eingesetzt und der Pulverisierer kommt vor allem beim Materialzerkleinern zum Einsatz.

Nachdem die Befragten, die häufigsten Abbruchtechniken benannt hatten, sollten sie diese hinsichtlich des Aufwands zum Materialsortieren und –zerkleinern sowie hinsichtlich der Höhe von Lärm-, Staub- und Erschütterungsemissionen in die lokale Umwelt bewerten.

2.1.2. Materialsortieren und -zerkleinern

Für die Bewertung der Techniken wird eine gute Recyclingfähigkeit der Materialien angenommen (vgl. Kühlen et al. 2014). Das Abbruchmaterial muss nach Abschluss des Abbruchs/Rückbaus eines Bauteils inklusive Nachsortierung auf der Baustelle eine Sortenreinheit von 95-98% (d.h. im Bauschutt sind nur 2-5% Fremdstoffe, wie Holz und Reste aus Kunststoff und von Dämmmaterialien, enthalten) aufweisen. Hierzu ist ein Nachsortierungsaufwand (Minuten Nachsortierung pro m³-Bauschutt) notwendig. Weiter wird die maximale Größe der Abbruchstücke mit ca. 80x80cm vorgegeben, d.h. dass eine gewisse Materialvorzerkleinerung stattgefunden hat.

Somit mussten die Befragten die ausgewählten Abbruchtechniken zunächst hinsichtlich des nachgelagerten Aufwands zur Materialtrennung und –zerkleinerung bewerten.

Die Aufwendungen für die Nachsortierung und Materialzerkleinerung wurden für die einzelnen Techniken in Abhängigkeit von unterschiedlichen Abbruchmaterialien abgefragt. Den Befragten standen hierbei die folgenden diskreten Beurteilungskategorien als Wahlmöglichkeiten zur Verfügung:

1. Kein Aufwand: 0 Min/m³
2. Geringer Aufwand: <5 Min/m³
3. Hoher Aufwand: 5-10 Min/m³
4. Sehr hoher Aufwand: >10 Min/m³

Die Kategorien 2-4 repräsentieren jeweils ein zeitliches Intervall mit Ober- und Untergrenze, in dem der Aufwand für das Nachsortieren/Zerkleinern pro 1 m³ Material liegt.

Die Umfrageergebnisse sind Verteilungen von diskreten Werten (1, 2, 3, 4) je Technik und Material (Abbildungen 5 und 6).

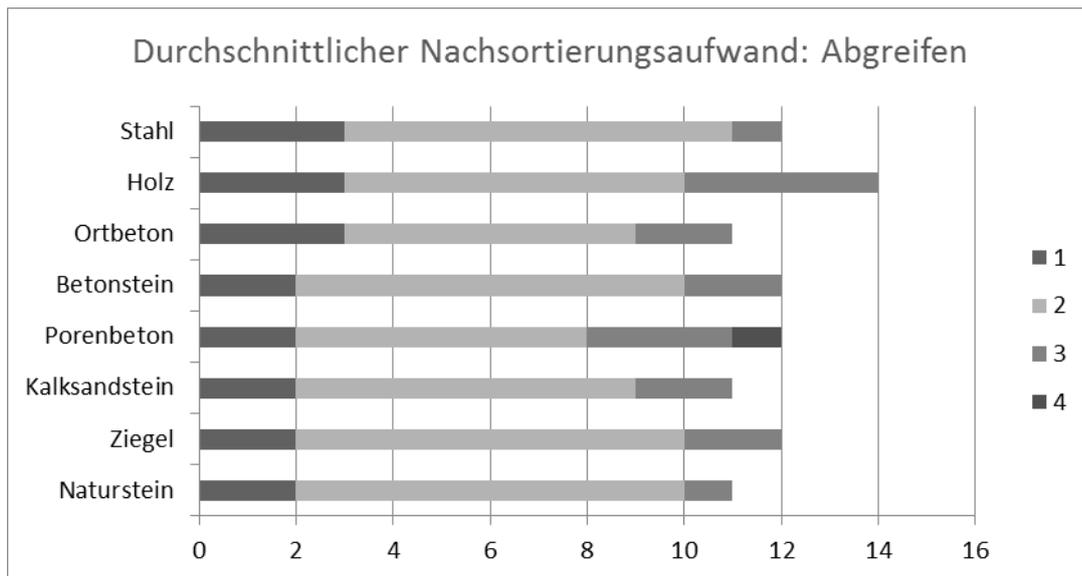


Abbildung 5: Häufigkeitsverteilungen der Abschätzung des Nachsortierungsaufwandes der Technik Abgreifen abhängig von verschiedenen Materialien

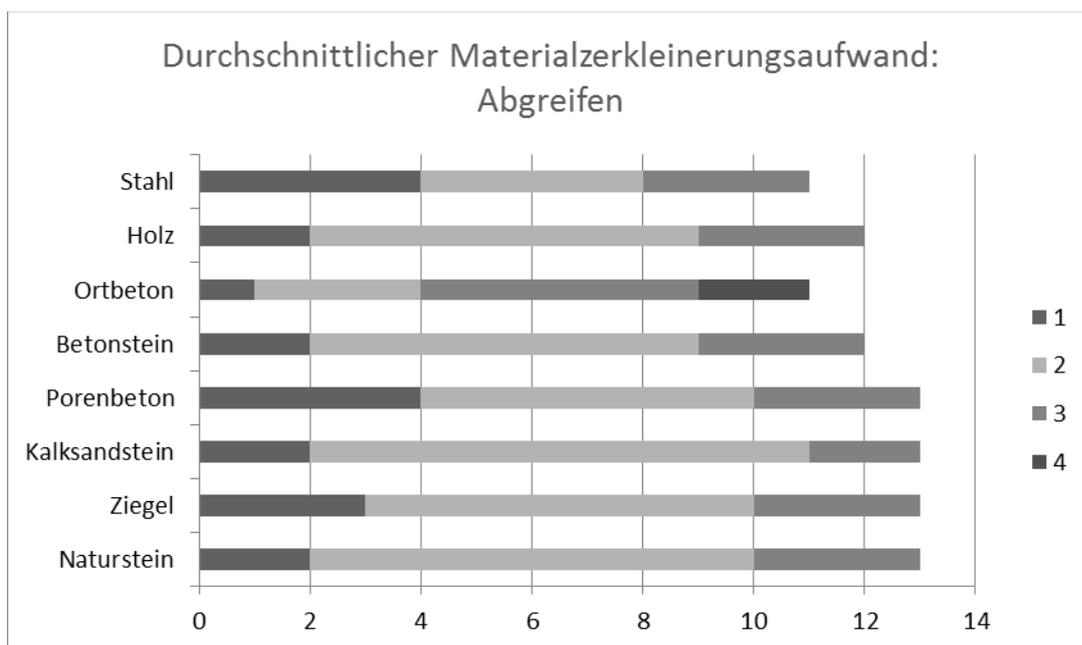


Abbildung 6: Häufigkeitsverteilungen der Abschätzung des Materialzerkleinerungsaufwandes der Technik Abgreifen abhängig von verschiedenen Materialien

Um aus diesen Umfrageergebnissen einen Kennwert für den Nachsortierungs-/Zerkleinerungsaufwand je Technik und Material zu erhalten, wurde unter der Annahme einer Normalverteilung über die Umfrageergebnisse der Mittelwert als mittlerer Aufwand berechnet (siehe bspw. Abbildungen 7 und 8).

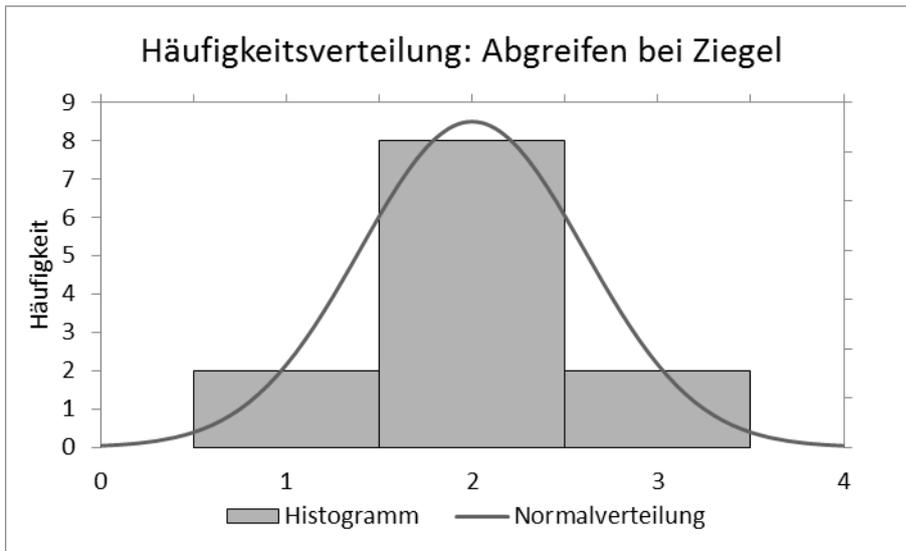


Abbildung 7: Normalverteilung der Nachsortierungsaufwandsabschätzung der Technik Abgreifen von Ziegel

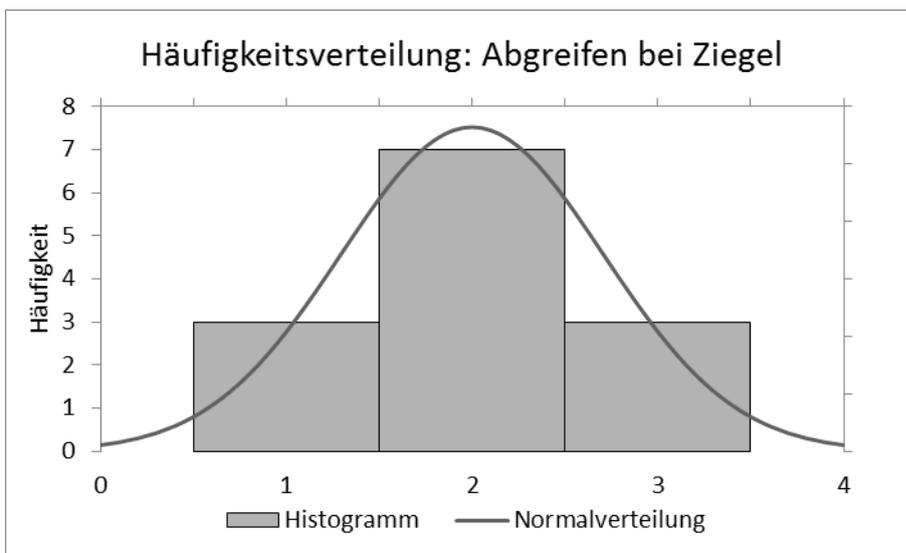


Abbildung 8: Normalverteilung der Materialzerkleinerungsaufwandsabschätzung der Technik Abgreifen von Ziegel

Entsprechend der obigen Aufwandskategorien (1-4) wurde jedem Mittelwert ein zeitliches Intervall zugeordnet. Als repräsentative Kennzahl zur Abbildung des durchschnittlichen Nachsortierungs- bzw. Materialzerkleinerungsaufwands wurde die jeweilige Obergrenze des ermittelten Intervalls (in Min/m^3) gewählt (bspw. der Mittelwert 2,0 ergibt die Kennzahl $5 \text{ Min}/\text{m}^3$).

2.1.3. Bewertung der Emissionen

Des Weiteren mussten die Experten die Höhen der Lärm-, Staub- und Erschütterungsemissionen der ausgewählten Abbruchtechniken in Abhängigkeit von unterschiedlichen Abbruchmaterialien bewerten. Den Befragten standen hierbei die folgenden diskreten Beurteilungskategorien als Wahlmöglichkeiten zur Verfügung:

- 0 = nicht störend
- 1 = kaum störend
- 2 = teilweise störend
- 3 = störend
- 4 = schmerzhaft störend

Um die Ergebnisse dieser Bewertung zu verifizieren, wurden für jeden Emissionstyp Vergleichsfragen gestellt, mittels der die Wahrnehmung der Teilnehmer mit in den in der Literatur definierten Emissionshöhen verglichen werden konnte. Die Wahrnehmung aller Befragten entsprach den Werten aus der Literatur, sodass die Bewertungen aller Experten in die Auswertung einfließen konnten. Unter Annahme der Ergebnisse als normalverteilt konnte auch hier der Mittelwert der Emissionshöhe je Technik und Material berechnet werden (siehe bspw. Abbildungen 9).

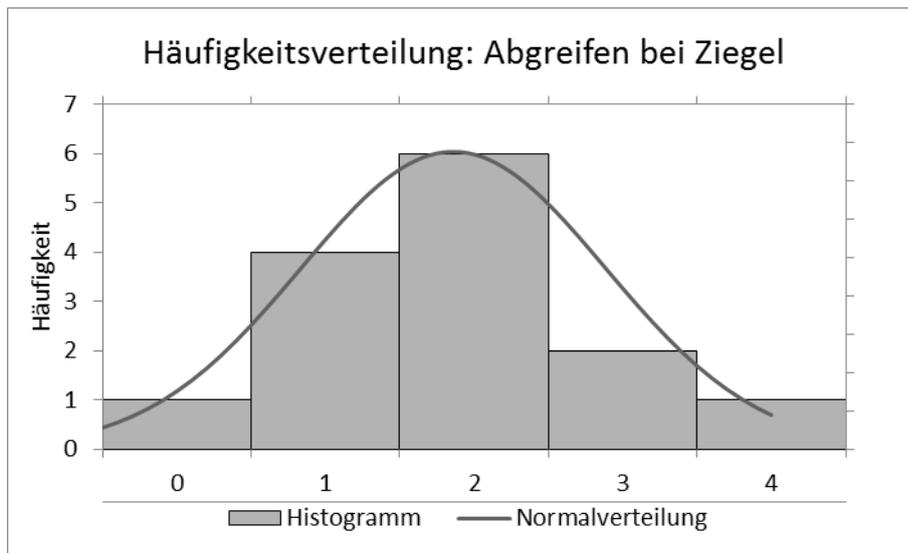


Abbildung 9: Normalverteilung der Staubemissionshöhenbewertung der Technik Abgreifen von Ziegel

Um aus diesen Umfrageergebnissen eine Kennzahl für die Emissionshöhe je Technik und Material zu erhalten, wurden mittels der diskreten Beurteilungskategorien, 9 Emissionsklassen gebildet (0, 0,5, 1, 1,5, 2, ..., 4). Die berechneten Mittelwerte wurden der nächsten Emissionsklasse durch Auf-/Abrunden zugeordnet. Die mittels der Befragung sowie den Versuchen erstellten Kennzahlen der Datenbank können den Tabellen in Kapitel 3.2.4. entnommen werden.

2.1.4. Einfluss von Abbruchhöhe und Maschinengröße

Weiter war von den Experten der Einfluss der Abbruchhöhe über Geländeoberkante sowie der Maschinengröße auf die Emissionswirkung je Emissionsart abhängig von Material und Technik abzuschätzen. Den Befragten standen hierbei die folgenden diskreten Beurteilungskategorien als Wahlmöglichkeiten zur Verfügung:

- 1 = Kein Einfluss auf die Emissionshöhe
- 1,5 = Erhöhung der Emissionshöhe um 1,5
- 2 = Verdopplung der Emissionshöhe
- 3 = Verdreifachung der Emissionshöhe

In diesem Fall bilden die Werte direkt den Faktor (k) der Erhöhung der Emissionshöhe (Verdopplung, Verdreifachung,...) durch Änderung der Abbruchhöhe bzw. der Maschinengröße. Unter Annahme einer Normalverteilung konnten die erwarteten Mittelwerte berechnet werden. Der berechnete Mittelwert entspricht dem durchschnittlichen Faktor der Erhöhung.

Für die Anpassung der Emissionshöhen an Abbruchhöhen- bzw. Maschinengrößenänderungen und die Erstellung entsprechender Kennzahlen waren 3 Berechnungsschritte notwendig. Erstens wurden den in der Umfrage ermittelten Emissionshöhenkennzahlen (siehe Kapitel 2.1.3. und 3.2.4.) allgemeine Emissionshöhenwerte aus der Literatur unter Berücksichtigung der menschlichen Wahrnehmung zugeordnet (Emissionshöhenwerte: Lärmemissionen in [dB(A)], Staubemissionen in [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] und Erschütterungsemissionen in [mm/s]). Zweitens wurde jeder Emissionshöhenwert um den Faktor k angepasst. Hierbei erfolgte die Anpassung des Emissionshöhenwertes im Fall von Staub- und Erschütterungsemissionen durch Multiplikation mit k. Im Fall der Lärmemissionen hingegen erfolgte die Anpassung an die Abbruchhöhe bzw. Maschinengröße in Anlehnung an das menschliche Lautstärke-Empfinden durch folgende Formel¹⁴:

$$\text{Angepasster Emissionshöhenwert} = \text{ursprünglicher Emissionshöhenwert} + (10 * \log_2(k)) [\text{dB(A)}]$$

Drittens wurde der resultierende angepasste Emissionshöhenwert wieder einer der 9 Emissionsklassen zugeordnet, die somit die angepasste Emissionshöhenkennzahl darstellt.

2.2. Immissionsmessungen unter Versuchsbedingungen

2.2.1. Versuchsaufbau

Grundlegendes Ziel der Versuche war die Erhebung von relativ vergleichbaren Werten für die Bewertung

- von Abbruchtechniken bezüglich der zu erwartenden Emissionen (Immissionen in unmittelbarer Nähe der Emissionsquelle)¹⁵ und
- der Eignung der Sensorik des Immissionserfassungssystems (im Folgenden auch KIT-System genannt)

unter Berücksichtigung der eingesetzten Materialien.

¹⁴ Schallpegeländerung auf Grund der psychoakustischen (empfundenen) Größe: <http://www.sengpielaudio.com/Rechner-Lautheit.htm>.

¹⁵ Im Folgenden wird von der Messung/Aufnahme/Untersuchung der „Emissionen“ gesprochen, da im Rahmen der Versuche die Immissionen in unmittelbarer Nähe der Emissionsquelle erfasst wurden und die Bedingungen für die Versuche konstant gehalten wurden, so dass eine qualitative Aussage über die Emissionen getroffen werden kann.

Zu diesem Zweck mussten für die Versuche immissionsbeeinflussende Parameter, wie Wind, Nässe, Temperatur, Bodeneinflüsse und Umgebungsbedingungen, möglichst gleichbleibend konstant gehalten werden. Die Versuche wurden in einer Halle auf dem Versuchsgelände des TMB durchgeführt, wodurch lediglich die Temperatur leicht schwankend war. Verschiedene Versuchsreihen wurden zur Untersuchung des Einflusses von Material und Abbruchtechniken auf die Emissionshöhe durchgeführt. Für die Analyse des Einflusses verschiedener Abbruchtechniken wurden als Werkzeuge zum einen ein 14t Kettenbagger der Firma Hitachi (KX135) mit Crusher („Pressschneiden“), Abbruch-/Sortiergreifer („Abgreifen“) und Hydraulikmeißel („Stemmen“) und zum anderen ein Winkelschleifer mit einem 235mm Diamantschneideblatt („Sägen“) eingesetzt. Für die Analyse des Einflusses von unterschiedlichen Materialien wurden zum einen Mauerwerksteine aus Kalksandstein, Ziegel, Beton und Porenbeton verwendet. Alle Steine hatten die gleichen Dimensionen von ca. 240mm x 250mm x 300mm. Zum anderen wurden für eine vergleichbare Versuchsdurchführung mit dem Material Stahlbeton kleine Platten aus einer großen Stahlbetonfertigteilplatte gesägt. Zusätzlich, zur Untersuchung der Wirkung von Staubminderungsmaßnahmen, wurden kleine transportable Mauern mit einer Fläche von je. 1m² aus Ziegelsteinen mit einem Fertigmörtel der Gruppe IIa und einem Kalk-Zement-Fertigputz gefertigt.

Für die Messung der Emissionen wurden neben dem KIT-System verschiedene Messsysteme eingesetzt. Zur Erschütterungsmessung kamen ein ZEB / SM-3C der Firma ZEB-Maxam und ein 8-kanaliges Schwingungsmesssystem vom Typ SM 9800 der Firma Beitzler- Messtechnik zum Einsatz. Die Staubbemessung wurde mit 3 Geräten des Typs IAQ-11-A der Firma Grimm und einem CEL-712 Microdust Pro der Firma CAS unterstützt.

Die Abbildungen 10 und 11 zeigen den Versuchsaufbau, die Durchführung und die permanente Erfassung und Darstellung der Messwerte über die Dauer der Versuche hinweg.



Abbildung 10: Versuchsaufbau und Durchführung der ersten Versuchsreihe

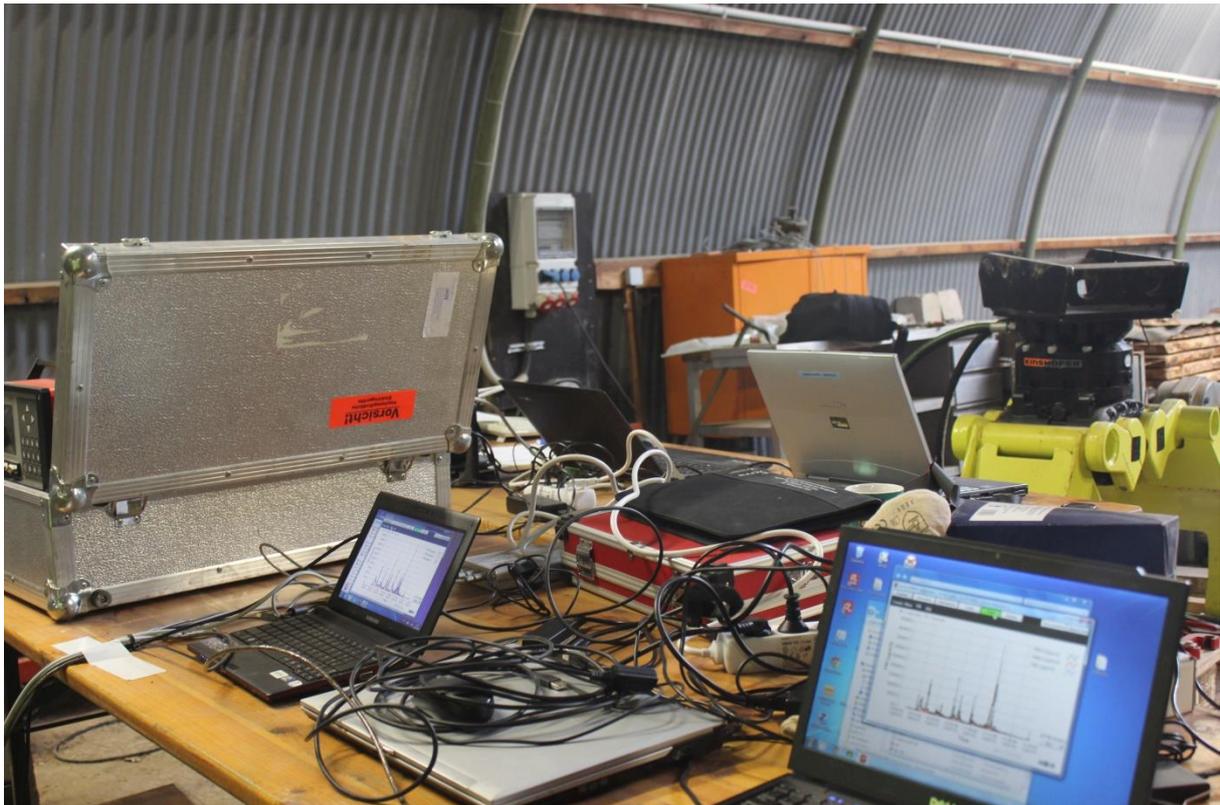


Abbildung 11: Erfassung und Darstellung der Messwerte während der Versuche

2.2.2. Versuchsdurchführung

In der ersten Versuchsreihe (Tabelle 4) konnten unter Verwendung verschiedener einzelner Mauerwerkssteine insbesondere die **Staub- und Lärmemissionen** bei der Zerstörung der Materialien untersucht werden (siehe Abbildung 10). Es wurden die einzelnen Mauerwerksteine verwendet, um den Effekt des Mörtels nicht als einheitliche Größe/Grundbelastung auf die Staubemissionen zusätzlich zu den Materialien mitzuführen. Es wurden alle Werkzeuge und somit alle vorhandenen Verfahren angewendet, wobei der Hydraulikmeißel auf den weichen/instabilen Steinen (Porenbeton, Mauerwerkziegel und Kalksandstein) nicht genau angesetzt werden konnte und der Abbruch-/Sortiergreifer die harten/stabilen Steine (Kalksandstein, Betonstein) nicht zerstören konnte. Versuche ohne Ergebnis oder mit eingeschränkter Aussagefähigkeit sind mit „-“ markiert.

Tabelle 4: Anzahl auswertbarer Versuche der 1. Versuchsreihe

| Verfahren/Material | Crusher | Greifer | Meißel | Winkelschleifer |
|--------------------|---------|---------|--------|-----------------|
| Porenbeton | 4 | 4 | - (3) | 1 (3 Messungen) |
| Ziegelstein | 4 | 3 | - (2) | 1 (3 Messungen) |
| Kalksandstein | 4 | - | 3 | 1 (3 Messungen) |
| Betonstein | 4 | - | 4 | 2 (3 Messungen) |

Die zweite Versuchsreihe bestand aus dem Abbruch der verputzten Ziegelsteinwände (Abbildung 12). Ziel dieser Versuche war es, die **Staubemissionen** hinsichtlich der Wirkung (Staubfreisetzung und Staubbindung) von **verschiedenen Staubminderungsmaßnahmen** unter Wassereinsatz zu untersuchen. Ohne Minderungsmaßnahme (1.) und zu jeder Minderungsmaßnahme (2.-4.) wurden jeweils 2 Versuche durchgeführt:

1. **Ohne Wasser:** ohne Einsatz von Wasser vor und während des Abbruchs
2. **Staubbekämpfung:** Wassereinsatz zur reinen Staubbekämpfung während des Abbruchs, d.h. der Wasserstrahl ist auf den entstehenden Staub gerichtet
3. **C-Schlauch:** Wassereinsatz zur Staubbekämpfung am Emissionsort während des Abbruchs, d.h. der Wasserstrahl ist direkt auf den Emissionsort gerichtet
4. **Vorwässern:** Vorwässerung der Wand über Nacht ohne Wassereinsatz während des Abbruchs

Die Wände wurden mit dem Crusher („Pressschneiden“) mit je 6 Aktionen abgebrochen, sodass jeder einzelne Stein vom Crusher zerstört wurde.



Abbildung 12: Zweite Versuchsreihe: Abbruch von verputzten Ziegelsteinwänden

In der dritten Versuchsreihe wurden Stahlbetonteile abgebrochen (Abbildung 13). Aufgrund des Materials kamen Crusher („Pressschneiden“), Hydraulikhammer („Stemmen“) und Winkelschleifer („Sägen“) zum Einsatz. Die bessere Anbindung der Versuchskörper an den Untergrund durch das hohe Eigengewicht und den hohen Kraftaufwand, der zum Zerstören der Versuchskörper benötigt wird, konnten neben Staub- und Lärmemissionen hier auch Erschütterungsemissionen untersucht werden. Ausgewertet werden konnten 3 Versuche mit Hydraulikhammer, 5 mit Crusher und 3 mit Winkelschleifer.



Abbildung 13: Dritte Versuchsreihe: Abbruch von Stahlbetonteilen

2.2.3. Versuchsergebnisse

Erste Versuchsreihe

Für den relativen¹⁶ Vergleich der Emissionshöhen von Lärm und Staub abhängig von verschiedenen Mauerwerksmaterialien und Abbruchverfahren wurden die Messwerte der einzelnen Sensoren des KIT-Systems ausgewertet und in den Tabellen 5 und 6 zusammengefasst.

Tabelle 5: Auswertung der Messergebnisse des KIT-Systems bezüglich der Schallemissionen verschiedener Abbruchverfahren und Mauerwerksmaterialien

| Material/ Verfahren | Höhe der durchschnittlichen Schallemissionen (Schallpegel dB(A)) | | | |
|------------------------|--|------------|------------|---------------|
| | Ziegel | Porenbeton | Betonstein | Kalksandstein |
| Abgreifen | 82 | 83 | --- | --- |
| Pressschneiden | 84 | 82 | 83 | 82 |
| Stemmen | 84 | 87 | 92 | 84 |
| Sägen | 98 | 92 | 109 | 103 |

Wie aus Tabelle 5 ersichtlich, variiert die Höhe der Schallemissionen bei den untersuchten Abbruchtechniken und Materialien zwischen 82 und 109 dB(A). Hinsichtlich allgemeiner Angaben zur Wahrnehmung von Schallimmissionen aus der Literatur (BG Bau (2015), Wikipedia-1 (2014)) können diese

¹⁶ Insbesondere bei den Staubmessungen, stellen die Messwerte keine absoluten Emissionswerte dar. Bspw. ist eine Aussage wie, „das Stemmen von Porenbeton verursacht durchschnittlich Staubemissionen ausgedrückt in der Konzentration von einatembarem Staub von 1142 mg/m³“, nicht möglich. Sondern wie unter 2.2.3 beschrieben, ermöglichen die Versuchsergebnisse einen relativen Vergleich der Emissionshöhen der untersuchten Technik-Material-Kombinationen.

Schallpegel den Beurteilungskategorien (Kapitel 2.1.3.) 2 (teilweise störend) bis 4 (schmerzhaft störend) zugeordnet werden. Beim Vergleich der verschiedenen Materialien, untermauern die Versuchsergebnisse, die geläufige Wahrnehmung, dass Betonstein beim Stemmen und Sägen, das Material mit den höchsten Schallemissionen ist. Beim Vergleich der verschiedenen Verfahren, ist ein definierender Einfluss einzelner Verfahren erkennbar. Beim Sägen mit dem Winkelschleifer treten über alle Materialien hinweg die höchsten Schallemissionen auf, verglichen mit den anderen drei Verfahren. Die Schallemissionen beim Stemmen liegen abhängig vom Material zwischen 5-20 dB(A) niedriger als beim Sägen. Die Verfahren Pressschneiden und Abgreifen verursachen unabhängig von den untersuchten Materialien gleichhohe Schallemissionen.

Tabelle 6: Auswertung der Messergebnisse des KIT-Systems bezüglich der Staubemissionen verschiedener Abbruchverfahren und Mauerwerksmaterialien

| Material/ Verfahren | Höhe der durchschnittlichen Staubemissionen (Maß der Staubkonzentration (relative Bezugsgröße)) | | | |
|------------------------|---|------------|------------|---------------|
| | Ziegel | Porenbeton | Betonstein | Kalksandstein |
| Abgreifen | 207 | 382 | --- | --- |
| Pressschneiden | 190 | 243 | 184 | 337 |
| Stemmen | 993 | 1142 | 693 | 960 |
| Sägen | 1927 | 6659 | 3813 | 6061 |

Staubemissionen sind generell schwer zu erfassen. Dies sollte man bei den aus den Messergebnissen gezogenen Schlussfolgerungen berücksichtigen. Aus den in Tabelle 6 aufgeführten einheitslosen Maßen (relative Bezugsgröße) der durchschnittlich erfassten Staubkonzentrationen an der Emissionsquelle lässt sich gut ableiten, dass die Verfahren Abgreifen und Pressschneiden relativ ähnliche Staubemissionen verursachen. Dies ist auch nachvollziehbar, da Greifer und Crusher das Material auf ähnliche Weise zerstören. Der Hammer gibt punktuell mehr Energie in das Werkstück, sodass über alle Materialien hinweg höhere Staubemissionen beim Stemmen vorliegen. Wie bereits bei den Schallemissionen, treten beim Sägen mit dem Winkelschleifer im Vergleich zu den anderen Verfahren über alle Materialien hinweg die höchsten Staubemissionen auf. Beim Sägen zeigt sich weiterhin deutlich, dass die Größe der Schnittfläche einen Einfluss auf die Emissionshöhe hat. Bei den Materialien Ziegel (Abbildung 14) und Betonstein haben die Kammern im Stein (aufgrund des dadurch geringeren Materialquerschnitts) dazu geführt, dass weniger Material emittiert wurde. Da beim Sägen nahezu das komplette Material der Fuge zu Staub wird, ist bei Porenbeton und Kalksandstein erwartungsgemäß auch der höchste Emissionswert gemessen worden.



Abbildung 14: Erste Versuchsreihe: Sägen von Ziegelmauerwerk

Zweite Versuchsreihe

Für den relativen Vergleich der Staubemissionshöhen abhängig von verschiedenen Staubminderungsmaßnahmen unter Wassereinsatz wurden die Messwerte der einzelnen Sensoren des KIT-Systems sowie der beiden konventionellen Staubmessgeräte (Grimm) ausgewertet und in Tabelle 7 zusammengefasst.

Tabelle 7: Auswertung der Messergebnisse bezüglich der Wirkung von Staubminderungsmaßnahmen (siehe 2.2.2.)

| Messsysteme/ Minderungsmaßnahmen | KIT-System | Grimm | Grimm absolut PM 10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) |
|-------------------------------------|------------|-------|---|
| Ohne Wasser | 100% | 100% | 14807 |
| Staubbekämpfung | 103% | 95% | 14058 |
| Vorwässern | 55% | 57% | 8420 |
| C-Schlauch | 37% | 24% | 3485 |

Wie unter Kapitel 2.2.2. beschrieben wurden für den Vergleich der Staubminderungsmaßnahmen verputzte Ziegelsteinwände durch „Pressschneiden“ abgebrochen. Verglichen mit dem Abbruch der Wand „ohne Wasser“ ist der Vorteil der Minderungsmaßnahme „Staubbekämpfung“ nicht belegbar. Hier ist anzumerken, dass keine Vernebelung zur Verfügung stand. Das „Vorwässern“ bewirkte eine Staubemissionsminderung von ca. 45% gegenüber den Emissionen beim Abbruch „ohne Wasser“. Die Wirkung der Maßnahme ist jedoch von der Wasseraufnahmefähigkeit des Materials abhängig. Die Maßnahme „C-Schlauch“ bewirkte den größten Minderungseffekt von bis zu 76%, so wurden 24% (35%) der Staubemission des Abbruchs „ohne Wasser“ gemessen. Die abweichenden %-Werte der

Messsysteme beim Abbruch mit „C-Schlauch“ resultieren aus den unterschiedlichen Messmethoden. So werden beim Grimm-System bei zu vielen Partikeln, wovon in diesem Fall auszugehen ist, weniger aber größere Partikel erfasst, die aber insgesamt schwerer sind. Dadurch ist die Bezugsbasis höher als beim KIT-System. Theoretisch sollte die Reduzierung der Staubemission durch Kombination der beiden Verfahren (Vorwässern und C-Schlauch) noch verbessert werden können. Die Messwerte der Emissionen von Lärm und Erschütterungen waren bei dieser Versuchsreihe ähnlich und werden hier nicht weiter analysiert.

Dritte Versuchsreihe

Für den relativen Vergleich der Emissionshöhen von Lärm, Staub und Erschütterungen abhängig von verschiedenen Abbruchverfahren angewandt auf das Material Stahlbeton wurden die Messwerte der einzelnen Sensoren des KIT-Systems und der konventionellen Staub- und Erschütterungsmesssysteme (ZEB, HLA, Grimm) ausgewertet und in den Tabellen 8, 9 und 10 zusammengefasst.

Tabelle 8: Auswertung der Messergebnisse des KIT-Systems bezüglich der Schallemissionen verschiedener Abbruchverfahren angewandt auf Stahlbeton

| Verfahren | Höhe der durchschnittlichen Schallemissionen (Schallpegel dB(A)) |
|----------------|--|
| Stemmen | 107 |
| Pressschneiden | 92 |
| Sägen | 107 |

Pressschneiden (Abbildung 15) ist das Abbruchverfahren mit den geringsten Lärmemissionen von den untersuchten Verfahren angewandt auf Stahlbeton. „Stemmen“ und „Sägen“ können hier als gleichlaut (ohne Berücksichtigung des Einflusses der Frequenz) eingestuft werden.

Tabelle 9: Auswertung der Messergebnisse bezüglich der Staubemissionen verschiedener Abbruchverfahren angewandt auf Stahlbeton

| Messsysteme/ Verfahren | Relative Höhe der durchschnittlichen Staubemissionen (% bezüglich Pressschneiden) | |
|---------------------------|---|-------|
| | KIT-System | Grimm |
| Pressschneiden | 100% | 100% |
| Stemmen | 97% | 94% |

Bezüglich der Staubemissionen liegen nur Werte für den Vergleich der Verfahren „Pressschneiden“ und „Stemmen“ vor. Beide Verfahren weisen bei einem ähnlichen Zerstörungsgrad ähnliche Staubemissionen auf.

Tabelle 10: Auswertung der Messergebnisse bezüglich der Erschütterungsemissionen verschiedener Abbruchverfahren angewandt auf Stahlbeton

| Messsysteme/ Verfahren | KIT System [mV] | KIT Prozent | ZEB [mm/s] | ZEB Prozent | HLA [mm/s] | HLA Prozent |
|---------------------------|--------------------|----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|
| Stemmen | 306 | 100% | 563 | 100% | 10 | 100% |
| Pressschneiden | 53 | 17% | 59 | 10% | 2 | 18% |
| Sägen | 9 | 3% | 8 | 1% | 0 | 0% |

Die Versuche zeigen, dass wie zu erwarten, „Stemmen“ das erschütterungsreichste und „Sägen“ das erschütterungsärmste Abbruchverfahren von den untersuchten Verfahren angewandt auf Stahlbeton ist.



Abbildung 15: Dritte Versuchsreihe: Pressschneiden von Stahlbeton

3. Werkzeug zur IT-basierten Planungsunterstützung

Für eine nachhaltige Abbruchplanung mit Berücksichtigung des Immissionsschutzes, neben technischer Anwendbarkeit und ökonomischer Verhältnismäßigkeit wurde im Rahmen des Projekts ein prototypisches Planungsunterstützungswerkzeug erstellt. Der Prototyp wurde softwaretechnisch in Access und mit Visual Basic for Applications (VBA) umgesetzt. Das Werkzeug greift auf die Daten der Datenbank zurück und die Verknüpfung der einzelnen Teilbereiche des Systems, **Nutzereingabe** (Kapitel 3.1.), **Analyseprozess** (Kapitel 3.2.) und **Werkzeugausgabe** (Kapitel 3.3.), können durch die zentrale Datenerhaltung in der Datenbank gewährleistet werden. Abbildung 16 (Kühlen et al. 2015) zeigt ausgewählte Eingabe- und Ausgabeinformationen des Planungsunterstützungswerkzeugs, die im Folgenden näher dargelegt werden. Um die Aussagekraft der Ergebnisse des Planungswerkzeugs zu überprüfen, wurde der Prototyp bei einem Abbruchvorhaben unter Realbedingungen getestet (Kapitel 3.4.).

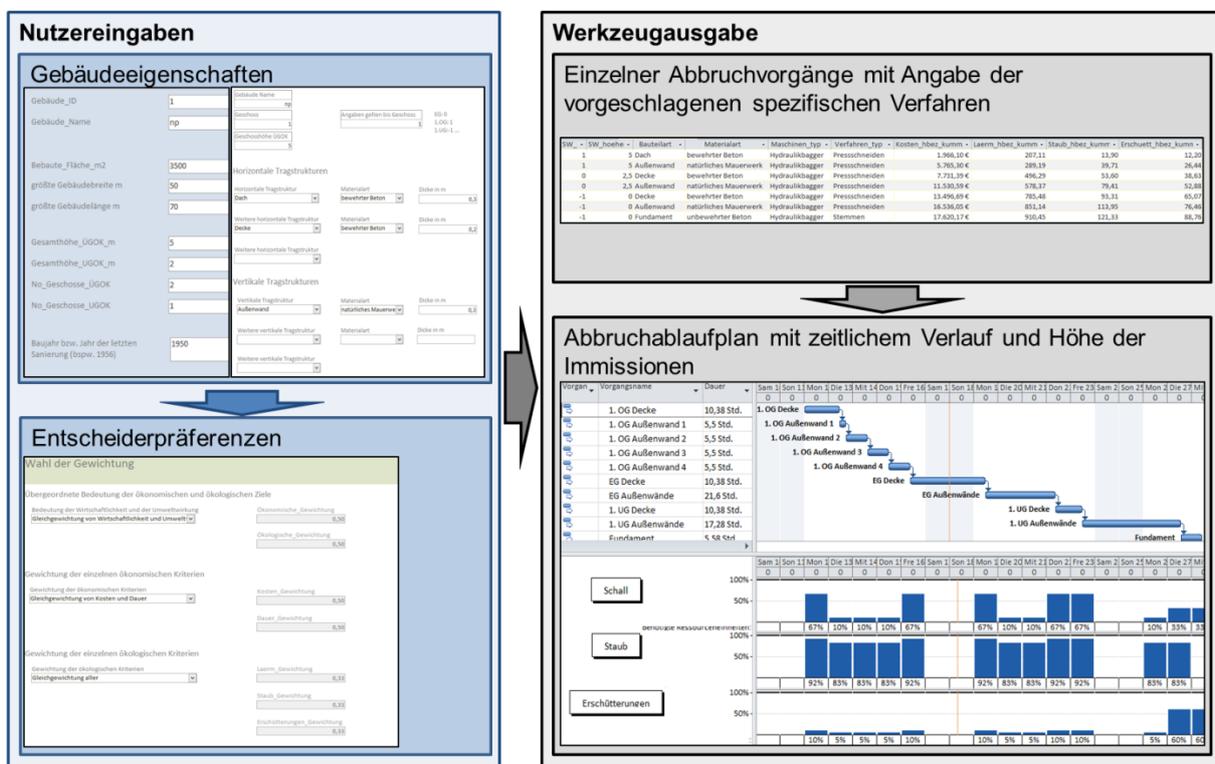


Abbildung 16: Ausgewählte Eingabe- und Ausgabeinformationen des Planungsunterstützungswerkzeugs¹⁷

3.1. Nutzereingabe

Die für die Planungsunterstützung seitens des Nutzers notwendigen Daten zum Abbruchvorhaben, d.h. Beschreibung des Abbruchobjekts/der Gebäudeeigenschaften und der Baustellenumgebung, sowie die Präferenzen des Nutzers hinsichtlich der ökonomischen und ökologischen Kriterien können computergestützt über Eingabemasken des Werkzeugs eingegeben werden.

¹⁷ Kühlen et al. 2015.

3.1.1. Gebäudeeigenschaften

Der Bauherr, Planer oder Abbruchunternehmer muss als Nutzer des Werkzeugs die Eigenschaften des abzubrechenden Gebäudes beschreiben. Hierfür sind in der ersten Maske (Abbildung 17) die folgenden Angaben zu den Abmessungen des Abbruchobjekts erforderlich:

- bebaute Grundfläche (m²)
- größte Gebäudelänge und –breite (m)
- Gesamthöhe des Bauwerks über und unter der Geländeoberkante (GOK) (m) sowie
- Anzahl der Geschosse über und unter GOK.

Weiter ist für den Hinweis auf mögliche baustoffbedingte Schadstoffe das Baujahr bzw. das Jahr der letzten Sanierung anzugeben.

| Eingabe der Gebäudebasisdaten | |
|--|------|
| Gebäude ID | 4 |
| Gebäudename | sa |
| Gründungsfläche in m ² | 150 |
| größte Gebäudebreite in m | 10 |
| größte Gebäudelänge in m | 15 |
| Gesamthöhe über Geländeoberkante (GOK) in m | 7 |
| Gesamthöhe unter GOK in m | 2 |
| Anzahl der Geschosse über GOK | 3 |
| Anzahl der Geschosse unter GOK | 1 |
| Baujahr bzw. Jahr der letzten Sanierung (bspw. 1956) | 1970 |

Daten übernehmen

Gebäudeeingabe frühere Gebäudedaten übernehmen alle Daten von Gebäuden in diesem System löschen

Abbildung 17: Maske für die Eingabe der Gebäudeabmessungen/der Gebäudebasisdaten

Darauf hat der Nutzer die Gebäudeeigenschaften näher zu spezifizieren. Dies erfolgt in der zweiten Maske des Planungswerkzeugs (Abbildung 18) auf Basis der einzelnen Bauteile/Bauteilgruppen der horizontalen und vertikalen Tragstruktur eines Geschosses. Das Werkzeug verwendet für jedes Bauteil Voreinstellungen für die Materialart und die Abmessungen, wenn diese Angaben vom Nutzer nicht spezifiziert wurden.

Eingabe der Bauteileigenschaften je Geschoss

| | | | | |
|-------------------|---|-----------------------------|---|-------------|
| Gebäude ID | 4 | Angaben gelten bis Geschoss | 2 | EG: 0 |
| Geschoss | 2 | | | 1.OG: 1 |
| Geschosshöhe ÜGOK | 7 | | | 1.UG:-1 ... |

Horizontale Tragstrukturen

| | | | |
|---|-------------|------------|--------------|
| Horizontale Tragstruktur | Materialart | Dicke in m | Fläche in m2 |
| Dach | Holz | 0,3 | 170 |
| Weitere horizontale Tragstruktur | Materialart | Dicke in m | Fläche in m2 |
| Decke | Stahlbeton | 0,2 | 150 |
| Weitere horizontale Tragstruktur | | | |
| <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;"> Decke Traeger Fundament </div> | | | |

Vertikale Tragstrukturen

| | | | |
|--------------------------------|------------------|------------|--|
| Vertikale Tragstruktur | Materialart | Dicke in m | |
| Aussenwand | Ziegel-Mauerwerk | 0,3 | |
| Weitere vertikale Tragstruktur | Materialart | Dicke in m | |
| Innenwand | Ziegel-Mauerwerk | 0,2 | |
| Weitere vertikale Tragstruktur | | | |

Abbildung 18: Maske für Eingabe der Bauteileigenschaften je Geschoss

3.1.2. Baustellenrahmen- und Umgebungsbedingungen

Neben der Beschreibung des Abbruchobjekts/Gebäudes hat der Nutzer die Möglichkeit die Baustellenrahmen- und Umgebungsbedingungen über eine Maske zu spezifizieren (Abbildung 19).

Abbruchbaustelle

Maschinen

| | | | | |
|--|-----------------------------------|--|----------------------------------|--|
| Anzahl einsetzbarer Hydraulikbagger | <input type="text" value="1"/> | Motorleistung (kW) | <input type="text" value="160"/> | Bereich der möglichen Werte: 50 - 300 kW |
| Anzahl einsetzbarer Longfrontbagger | <input type="text" value="1"/> | Motorleistung (kW) | <input type="text" value="160"/> | Bereich der möglichen Werte: 50 - 300 kW |
| Anzahl einsetzbarer Seilbagger | <input type="text" value="1"/> | max_Lastmoment_tm | <input type="text" value="600"/> | Bereich der möglichen Werte: 400 - 1000 tm |
| Berichtsjahr der Kosten | <input type="text" value="2014"/> | Bereich der möglichen Berichtsjahre: 2000 bis 2014 | | |
| Treibstoff-/Dieselpreis (Euro pro Liter) | <input type="text" value="1,26"/> | | | |

Umgebung

| | | | | | |
|--|--|--|--------------------------------|--|--------------------------------|
| Platzverhältnisse um das Abbruchobjekt | <input type="text" value="begrenzt"/> | | | | |
| Siedlungstyp der Umgebung | <input type="text" value="Streusiedlung"/> | Min. Distanz von der Abbruchbaustelle zum nächsten Gebäude (m) | <input type="text" value="5"/> | Anzahl der Reflexionsflächen um das Abbruchgebäude | <input type="text" value="3"/> |
| Nutzungstyp der Umgebung | <input type="text" value="Gewerbegebiet"/> | | | | |

Schutzmaßnahmen

| | |
|---|-------------------------------------|
| Auswahl der Schutzmaßnahme | Kosten der ausgewählten Maßnahme |
| <div style="border: 1px solid #ccc; padding: 2px;"> <input type="text" value="Keine_Schutzmaßnahme"/> </div> <ul style="list-style-type: none"> <li style="background-color: #f0f0f0; padding: 2px;">Keine_Schutzmaßnahme <li style="padding: 2px;">Schallschirm_Holz_o_Metall <li style="padding: 2px;">Aufblasbarer_Schallschirm_zweischalig <li style="padding: 2px;">Aufblasbarer_Schallschirm_einschalig <li style="padding: 2px;">Folienmembran_daemmwoollegefüllt_am-Gerues <li style="padding: 2px;">Aluwandkassette_am-Geruest <li style="padding: 2px;">Aluwandkassette_mit-Daemmmatte_am-Geruest <li style="padding: 2px;">Schallkapselung_Maschine <li style="padding: 2px;">Schallschutzzelt <li style="padding: 2px;">C_Schlauch <li style="padding: 2px;">Schlauch_mit-Turbojetduese <li style="padding: 2px;">Spruehkanone <li style="padding: 2px;">Spruehanlage_am-Geraet <li style="padding: 2px;">Staubabsauger | <input type="text" value="0"/> Euro |

Datensatz: 1 von 1 | Kein Filter | Suchen

Abbildung 19: Eingabe der Baustellenrahmen- und Umgebungsbedingungen

Die Wahl einer geeigneten Abbruchtechnik hängt unter anderem von den Platzverhältnissen vor Ort sowie von den vorhandenen Ressourcen/der vorhandenen Maschinen- und Gerätetechnik (siehe Tabelle 2) ab. Der Nutzer kann die verfügbaren Ressourcen definieren indem er die Anzahl der Trägergeräte je Typ (mögliche Anzahl zwischen 0 und 2) und deren Größe kW (Bagger) bzw. tm (Seilbagger) eingibt. Bezüglich der Platzverhältnisse auf Abbruchbaustellen bezieht sich die mögliche Auswahl im Werkzeug auf den innerstädtischen Bereich. In Anlehnung an DA (2015) heißt das, dass die „örtlichen Bedingungen der Baustelle“ immer „begrenzt“ sind und der Nutzer zwischen „relativ freien“ („3“), „begrenzen“ („2“) und „sehr begrenzten“ („1“) Platzverhältnissen um das Abbruchobjekt herum wählen kann. Die Eignung von Abbruchtechniken bezogen auf diese Platzverhältnisse werden in Tabelle 11 definiert.

Tabelle 11: Technische Eignung von Abbruchtechniken bezogen auf die Platzverhältnisse vor Ort um das Abbruchobjekt herum

| Abbruchtechnik | | Eignung bzgl. der Platzverhältnisse vor Ort/um das Abbruchobjekt |
|----------------|------------------------------|--|
| # | Verfahren | |
| 1 | Abgreifen | 3 |
| 2 | Einschlagen | 3 |
| 3 | Eindrücken | 2 |
| 4 | Einziehen | 3 |
| 5 | Reißen | 3 |
| 6 | Stemmen | 2 |
| 7 | Pressschneiden | 2 |
| 8 | Scherschneiden | 2 |
| 9 | Handabbruch mit Handwerkzeug | 1 |

1: geeignet bei sehr begrenzten Platzverhältnissen; 2: geeignet bei begrenzten Platzverhältnissen; 3: geeignet bei freien Platzverhältnissen
Quellen: DA (2015), ergänzt und bestätigt durch Experteneinschätzungen

Weiter kann, wie in Kapitel 3.2.2. beschrieben, die Wahl einer Abbruchtechnik vom Umgebungsnutzungstyp abhängen. Aus diesem Grund kann der Nutzer die Umgebungsnutzung in Anlehnung an die Gebietsnutzungskategorien der BauNVO (2013) definieren (Tabelle 12).

Tabelle 12: Gebietsnutzungskategorien ¹⁸

| Gebietsnutzungskategorie nach BauNVO (2013) |
|---|
| Industriegebiet |
| Gewerbegebiet |
| Kerngebiet, Dorf- und Mischgebiet |
| Allgemeines Wohngebiet und Kleinsiedlungsgebiet |
| Reines Wohngebiet |
| Kurgebiet, Krankenhäuser und Pflegeanstalten |

Zur Bestimmung der Emissionsabnahmeeffekte in Abhängigkeit von den Umfeldeigenschaften (siehe Kapitel 3.2.4.) hat der Nutzer die Möglichkeit, entweder **einen Siedlungstyp/Umfeldtyp** auszuwählen oder die minimale Distanz von der Abbruchbaustelle zum nächsten Gebäude und die Anzahl der Reflexionsflächen um das Abbruchobjekt herum individuell zu spezifizieren. Details zu den Siedlungstypen/Umfeldtypen und zu deren immissionsbeeinflussenden Eigenschaften werden in Kapitel 3.2.4. beschrieben. Weiter wird dem Nutzer die Option eingeräumt, aus einer Liste von ausgewählten Schutzmaßnahmen eine auszuwählen. Ein entsprechender durchschnittlicher Minderungseffekt wird derzeit angenommen und ist noch nicht wissenschaftlich verifiziert¹⁹ (Tabelle 13).

¹⁸ Vgl. BauNVO (2013).

¹⁹ Die wissenschaftliche Verifikation von Minderungseffekten durch verschiedene Schutzmaßnahmen stellt ein zukünftiges Forschungsfeld dar.

Tabelle 13: Mögliche Schutzmaßnahmen und deren Minderungswirkung

| Schutzmaßnahme | Angenommene durchschnittliche Minderungseffekte | | |
|--|---|-------|---------------|
| | Lärm | Staub | Erschütterung |
| Schallschirme aus Holz oder Metall | 10 dB(A) | 100% | - |
| Einschalige aufblasbare Schallschirme | 10 dB(A) | 100% | - |
| Zweischalige aufblasbare Schallschirme | 20 dB(A) | 100% | - |
| Mit Dämmwolle gefülltes Membran-Element aus Polyester-gewebe an Gerüsten | 20 dB(A) | 100% | - |
| Wandkassetten aus Aluminium an Gerüsten | 20 dB(A) | 100% | - |
| Wandkassetten aus Aluminium an Gerüsten mit Schall-dämmmatten | 25 dB(A) | 100% | - |
| Schallkapselung für Abbruchhämmer | 10 dB(A) | - | - |
| Schallkapselung für Maschinen | 20 dB(A) | - | - |
| Schallschutzzelte | 10 dB(A) | 100% | - |
| Feuerwehrschauch / C-Schlauch | - | 35% | - |
| Feuerwehrschauch mit Turbojetdüse | - | - | - |
| "Sprühkanonen / Staubbindemaschine (Wasservernebelung)" | - | 75% | - |
| Wassersprüh- und Wasservernebelungsanlagen an Geräten | - | 40% | - |
| Staubabsaugung / Luftreiniger | - | 75% | - |

3.1.3. Entscheiderpräferenzen

Für die Auswahl der jeweils „geeignetsten“ Abbruchtechnik/en je Bauteilart und Geschoss wird der Nutzer aufgefordert, seine Präferenzen bezüglich der ökonomischen (Kosten und Dauer) und ökologischen Kriterien (Lärm, Staub und Erschütterungen) über deren Gewichtung in einer Maske anzugeben (Abbildung 20). Die damit verbundene Bewertung und Auswahl der „geeignetsten“ Techniken wird in Kapitel 3.2.5. erläutert.

Entscheidungspräferenzen: Gewichtung der Zielkriterien

Übergeordnete Bedeutung der ökonomischen und ökologischen Ziele

| | |
|--|---|
| Bedeutung der Wirtschaftlichkeit und der Umweltwirkung <input type="text" value="Gleichgewichtung von Wirtschaftlichkeit und Umweltwirkung"/> | Ökonomische_Gewichtung <input type="text" value="0,50"/> |
| | Ökologische_Gewichtung <input type="text" value="0,50"/> |

Gewichtung der einzelnen ökonomischen Kriterien

| | |
|---|--|
| Gewichtung der ökonomischen Kriterien <input type="text" value="Gleichgewichtung von Kosten und Dauer"/> | Kosten_Gewichtung <input type="text" value="0,50"/> |
| | Dauer_Gewichtung <input type="text" value="0,50"/> |

Gewichtung der einzelnen ökologischen Kriterien

| | |
|--|---|
| Gewichtung der ökologischen Kriterien <input type="text" value="Gleichgewichtung aller Umweltkriterien"/> <ul style="list-style-type: none"> • Lärm alleiniges Kriterium • Staub alleiniges Kriterium • Erschütterungen alleiniges Kriterium • Gleichgewichtung aller Umweltkriterien • Eigene differenzierte Gewichtung der Umweltkriterien | Laerm_Gewichtung <input type="text" value="0,33"/> |
| | Staub_Gewichtung <input type="text" value="0,33"/> |
| | Erschütterungen_Gewichtung <input type="text" value="0,33"/> |

Abbildung 20: Exemplarische Eingabe der Kriteriengewichtungen

3.2. Analyseprozess

3.2.1. Abbruchabfolge auf Basis eines digitalen Modells des Abbruchobjekts

Bauteilbasiertes Modell des Abbruchobjekts: Wie in Kühlen et al. 2014 in Kapitel 5.1.1. beschrieben, wird über die vom Nutzer näher spezifizierten Gebäudeeigenschaften ein digitales Modell des Abbruchobjekts, der/des Gebäudetragstruktur/-rohbaus für die Planung der Abfolge des Abbruchprozesses erstellt. Jede Bauteilgruppe im Gebäudemodell wird hierbei durch die folgenden Eigenschaften beschrieben:

- Material,
- Bauteildicke,
- Bauteilmasse,
- Geschoss und
- Höhe des Bauteils/der Bauteilgruppe über GOK.

Abbruchabfolge: In Anlehnung an die mittlerweile den Ausschreibungen entsprechend zunehmend angewandten Herangehensweisen zum materialspezifischen Abbruch eines Bauwerks, dem selektiven Abbruch und Rückbau (vgl. Schiller und Deilmann (2010)), soll der Prozess für den Abbruch der Gebäudetragstruktur in umgekehrter Reihenfolge der Gebäudeerrichtung erfolgen (vgl. DA (2015), S.

358; Schultmann (1998), Mettke (1995)). Somit ist die Abbruchabfolge im Planungsunterstützungswerkzeug von oben nach unten (top-down) definiert. Weitere Details zur Abbruchabfolge können Kühlen et al. 2014, Kapitel 5.1.2. entnommen werden.

3.2.2. Technisch mögliche Abbruchtechniken

Für die Wahl der Abbruchtechnik bezogen auf die einzelnen abzubrechenden Bauteilgruppen wird in einem ersten Schritt die technische Eignung von Abbruchverfahren bzw. Abbruchtechniken geprüft. Die Abbruchtechnik ist, wie in „Begriffe und Definitionen“ definiert, die Kombination aus Abbruchverfahren und den in der Regel hierfür eingesetzten Maschinen (Träger- und Anbaugeräte (Tabelle 2)). Für die Eignungsprüfung eines Abbruchverfahrens werden im Forschungsprojekt folgende bauteilbezogene Kriterien herangezogen:

- Bauteilart,
- Bauteilmaterial/Materialart
- Materialdicke und
- Abbruchhöhe über GOK.

Weiter werden die Abbruchtechniken bezüglich der folgenden Eignungskriterien geprüft:

- Platzverhältnisse vor Ort,
- Ressourcenbedarf abhängig von den verfügbaren Ressourcen und
- Immissionsrichtwerte abhängig von der Gebietsnutzung der Baustellenumgebung

Vereinfachend wird für die Bestimmung der Eignung jeweils eine eindeutige Entscheidung für oder gegen eine bestimmte Technik auf Basis von Entscheidungen nach z.T. Boolescher Logik (wahr oder falsch) oder Vergleichen (i.d.R. kleiner-gleich) angenommen. Die Techniken werden nacheinander hinsichtlich der einzelnen Kriterien unter Anwendung des lexikographischen Ansatzes der mehrkriteriellen Entscheidungsfindung bewertet (vgl. Hanne (1998)). Die in diesem Zusammenhang in das Planungsunterstützungswerkzeug integrierten Eignungsmatrizen der Abbruchverfahren sowie der Abbruchtechniken bzgl. der Kriterien Abbruchhöhe und Platzverhältnisse werden ausführlich in Kühlen et al. 2014 in Kapitel 5.1.3. beschrieben.

Das Planungsunterstützungswerkzeug enthält die in Tabelle 2 („Begriffe und Definitionen“) gelisteten Abbruchtechniken. Neben den in Tabelle 2 ausgewiesenen **Maschinen** (Träger- und Anbaugerät) wird die **Anzahl der Arbeitskräfte (AK)**, als weitere **notwendige Ressourcen der jeweiligen Techniken** in Kapitel 3.2.3., Tabelle 15 ausgewiesen.

In Anlehnung an die in Tabelle 12 (Kapitel 3.1.2) aufgelisteten Gebietsnutzungskategorien der BauN-VO (2013) werden in der TA Lärm (1998) und AVV (1970) Tagesrichtwerte für den Beurteilungspegel von Schallimmissionen zwischen 6 und 22 Uhr (TA Lärm (1998)) bzw. 7 und 20 Uhr (AVV (1970)) definiert, die im Werkzeug für die Eignungsprüfung herangezogen werden (Tabelle 14).

Tabelle 14: Schallimmissionsrichtwerte abhängig von der Gebietsnutzungskategorie²⁰

| Gebietsnutzungskategorie nach BauNVO (2013) | Tagesrichtwerte für den Beurteilungspegel von Schallimmissionen nach AVV (1970) und TA Lärm (1998) [dB (A)] |
|---|---|
| Industriegebiet | 70 |
| Gewerbegebiet | 65 |
| Kerngebiet, Dorf- und Mischgebiet | 60 |
| Allgemeines Wohngebiet und Kleinsiedlungsgebiet | 55 |
| Reines Wohngebiet | 50 |
| Kurgebiet, Krankenhäuser und Pflegeanstalten | 45 |

Im zweiten Schritt werden die technisch möglichen Abbruchtechniken je Bauteilgruppe hinsichtlich deren ökonomischen (Dauer und Kosten) und ökologischen (Höhe der Lärm-, Staub- und Erschütterungsimmissionen) Ausprägungen analysiert. Die Ausprägungen für die einzelnen Abbruchvorgänge (Technik-Bauteil-Kombinationen) berechnet das Planungsunterstützungswerkzeug mit den Informationen aus dem Gebäudemodell und den im Folgenden definierten abbruchtechnischen- und materialbezogenen Kennzahlen der ökonomischen und ökologischen Kriterien.

3.2.3. Ökonomische Ausprägungen

Dauern: Zur ökonomischen aber auch zur ökologischen Bewertung von Abbruchtechniken sind die Dauern der Abbruchvorgänge relevant. Die Dauern der einzelnen Vorgänge beeinflussen neben der Gesamtprojektdauer die zeitabhängigen Kosten und die Einwirkzeit der Immissionen auf die lokale Umwelt. Grundlage für die Abschätzung der Vorgangsdauern sind Dauerkennwerte für die einzelnen Techniken bezogen auf das Volumen (m^3) der abzubrechenden Bauteilgruppe (h/m^3). Tabelle 15 enthält auch Angaben zur Anzahl der Arbeitskräfte (AK), die für die einzelnen Techniken zweckmäßig sind bzw. auf die sich die Dauerkennwerte beziehen (vgl. DA (2015), S. 429; Seemann (2003)). Die Anzahl der Arbeitskräfte ist auch für die Berechnung der Kosten im Folgenden relevant.

²⁰ Vgl. BauNVO (2013), TA Lärm (1998), AVV (1970).

Tabelle 15: Bauteilvolumenbezogene, materialabhängige Dauerkenwerte von Abbruchtechniken in h/m³ für einen 40-Tonnen-Bagger

| Abbruchtechnik | | Dauerkenwerte (h/m ³) (bezogen auf die in der letzten Spalte angegebene zweckmäßige Anzahl der AK) | | | | | | | | | | Anzahl der Arbeitskräfte (AK) |
|----------------|------------------------------|--|--------|---------------|------------|------------|------------|----------|-----------|-----------|--------|-------------------------------|
| # | Verfahren | Mauerwerk | | | | | Beton | | | Sonstiges | | |
| | | Naturstein | Ziegel | Kalksandstein | Porenbeton | Betonstein | Fertigteil | Ortbeton | unbewehrt | Holz | Stahl* | |
| 1 | Abgreifen | 0,03 | 0,03 | 0,04 | 0,03 | 0,04 | x | x | 0,04 | 0,03 | x | 2 |
| 2 | Einschlagen | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,07 | 0,07 | 0,05 | x | x | 2 |
| 3 | Eindrücken | 0,03 | 0,04 | 0,03 | 0,03 | 0,04 | 0,08 | x | x | 0,07 | x | 2 |
| 4 | Einziehen | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | x | x | 0,07 | 0,94 | 2 |
| 5 | Reißen | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | x | x | 2 |
| 6 | Stemmen | 0,03 | 0,03 | 0,04 | 0,03 | 0,04 | 0,06 | 0,06 | 0,04 | x | x | 2 |
| 7 | Pressschneiden | 0,03 | 0,03 | 0,04 | 0,03 | 0,04 | 0,06 | 0,06 | 0,04 | x | x | 2 |
| 8 | Scherschneiden | x | x | x | x | x | x | x | x | 0,08 | 1,56 | 2 |
| 9 | Handabbruch mit Handwerkzeug | 1,6 | 1,6 | 1,6 | 1,6 | 1,6 | 2 | 2 | 1,6 | 1,15 | 19,5 | 2 |
| 10 | Material zerkleinern | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,05 | 0,05 | 0,04 | 0,08 | 0,98 | 2 |
| 11 | Material sortieren | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,07 | 0,07 | 0,04 | 0,04 | 0,98 | 2 |

Quellen: Experteneinschätzung, ergänzt durch Weimann et al. (2013); ABW (2012); DA (2015); Seemann (2003); Rentz et al. (2002); Schultmann (1998); Rentz (1993); Willkomm (1990)

x bzw. dunkelgraue Felder: nicht/schlecht geeignet/nicht relevant für das Material

*Annahme einer Stahldichte von 7,6 t/m³

Der Dauerkenwert wird im Planungsunterstützungswerkzeug in Abhängigkeit von der durch den Nutzer definierten Größe des Baggers ermittelt. Und die Dauer eines Vorgangs wird auf Basis dieses maschinengrößenabhängigen Kennwerts berechnet. Die Gesamtdauer eines Vorgangs setzt sich zusammen aus der Dauer für den eigentlichen Abbruch und die Dauern für das Materialvorzerkleinern und –vorsortieren vor Ort auf der Baustelle.

Kosten: Das Planungsunterstützungswerkzeug berechnet als ökonomische Ausprägung die Einzelkosten der Teilleistung, das heißt die einzelnen Kosten eines Abbruchvorgangs. Es werden hierbei Lohn-, Gerätekosten und sonstige Kosten berücksichtigt. Kosten für den Transport und die Entsorgung des Abbruchmaterials sind nicht enthalten.

Die **Lohnkosten** für einen Vorgang werden abhängig von der Anzahl der Arbeitskräfte (vgl. Tabelle 15) und mit einem Mittelohn je Arbeiter nach Girmsheid und Motzko (2013) berechnet. Im Planungswerkzeug wird ein Mittelohn von 41,09 Euro/h als erste Annahme im Werkzeug hinterlegt. Dieser Stundensatz basierend auf dem Tariflohn der Lohngruppe 3 und 4 (BRTV (2014): Bundesrahmentarifvertrag für das Baugewerbe vom 4.07.2002 zuletzt angepasst am 10.12.2014). Der Mittelohn kann vom Nutzer individuell angepasst werden (siehe Kapitel 3.4.2).

Die **Gerätekosten** für einen Vorgang setzen sich zusammen aus den Vorhaltekosten (Abschreibung, Verzinsung und Reparatur) des jeweiligen Träger- und Anbaugeräts; abhängig von deren Art und Anzahl (vgl. Tabelle 2). Auf Basis der monatlichen Kostensätze für Abschreibung, Verzinsung und Reparatur der BGL (2007) und der Annahme von 170 Betriebsstunden pro Monat (Leimböck et al. (2011); BGL (2007)) wurden Stundensätze für die Geräte ermittelt. Abhängig von den Nutzereingaben zu Baggergrößen und dem Berichtsjahr berechnet das Planungsunterstützungswerkzeug unter Beachtung des Erzeugerpreisindex für Baumaschinen (ohne MwSt) des stat. Bundesamtes, 2014 die Gerätekosten für die Dauer eines Vorgangs. Die **sonstigen Kosten** beinhalten die Treib- und Schmierstoffkosten für den Betrieb des Trägergeräts. Die stündlichen Betriebskosten werden in Anlehnung an die BGL (2007) abhängig von der Größe der Trägermaschine kalkuliert. Hierbei werden ein Kraftstoffverbrauch von 137.5 g/kWh und der Umrechnungsfaktor für die Dichte von Dieseldieselkraftstoff von 0.84 kg/l angenommen. Weiter ist ein Dieselpreis von 1.26 €/l²¹ als erste Annahme im Werkzeug hinterlegt. Der Preis kann vom Nutzer individuell angepasst werden (siehe Kapitel 3.4.2). Der Schmierstoffverbrauch wird mit 11% der Kraftstoffkosten angesetzt. Kostenkennwerte, wie der Mittelohn, die Vorhaltekosten für Träger- und Anbaugeräte und der Treibstoffpreis können auch über die Nutzeroberfläche individuell angepasst werden.

Die Kosten werden (wie die Dauer) im Planungswerkzeug für die einzelnen Teilvorgänge (Abbruch, Materialvorsortieren und –vorzerkleinern) berechnet.

3.2.4. Ökologische Ausprägungen

Zur ökologischen Bewertung von Abbruchtechniken werden in erster Linie die ökologischen Ausprägungen herangezogen. Dies sind Kennzahlen der Immissionshöhen, die auf Basis der Emissionskennzahlen und den Emissionsabnahmeeffekten abh. vom Umfeld berechnet werden. (Neben diesen Ausprägungen kann der Nutzer aber auch die Einwirkzeit der Immissionen über die Dauer (siehe 3.2.3.) in seinen Präferenzen berücksichtigen.) Die folgenden Tabellen enthalten die durch Primärdaten **aktualisierten und erweiterten und auf Basis der 9 Emissionsklassen (0, 0,5, 1, 1,5, 2, ..., 4)** (siehe Kapitel 2.1.3.) gebildeten, **materialbezogenen Kennzahl für die Emissionshöhe** (im Folgenden auch Emissionskennzahlen genannt) der verschiedenen Abbruchtechniken für die Lärm, Staub und Erschütterungen.

²¹ Statistisches Bundesamt. Statistica: Durchschnittspreis basierend auf den monatlichen Preisen für 1 Liter Diesel in Deutschland innerhalb 1 Jahres von Juli 2014 bis Juli 2015. Online unter: <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/1691/umfrage/preis-fuer-einen-liter-diesel-monatsdurchschnittswerte/>. Abgerufen am: 24.08.2015.

Tabelle 16: Materialbezogene Lärmemissionskennzahlen von Abbruchtechniken

| Abbruchtechnik | | Lärmemissionskennzahlen | | | | | | | | | |
|----------------|------------------------------|-------------------------|--------|---------------|------------|------------|------------|----------|-----------|-----------|-------|
| # | Verfahren | Mauerwerk | | | | | Beton | | | Sonstiges | |
| | | Naturstein | Ziegel | Kalksandstein | Porenbeton | Betonstein | Fertigteil | Ortbeton | unbewehrt | Holz | Stahl |
| 1 | Abgreifen | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | | | 2,00 | 1,00 | |
| 2 | Einschlagen | 3,00 | 3,00 | 3,00 | 3,00 | 3,00 | 3,50 | 3,50 | 3,00 | | |
| 3 | Eindrücken | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,50 | | | 1,50 | |
| 4 | Einziehen | 1,50 | 1,50 | 1,50 | 1,50 | 1,50 | 2,00 | | | 1,50 | 2,50 |
| 5 | Reißen | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,50 | 2,50 | 2,00 | | |
| 6 | Stemmen | 2,50 | 2,50 | 2,50 | 2,00 | 2,50 | 3,50 | 3,50 | 3,00 | | |
| 7 | Pressschneiden | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,50 | 2,50 | 2,00 | | |
| 8 | Scherschneiden | | | | | | | | | 1,50 | 1,50 |
| 9 | Handabbruch mit Handwerkzeug | 2,50 | 2,50 | 2,50 | 2,00 | 2,50 | 3,50 | 3,50 | 3,00 | 2,00 | 3,50 |
| 10 | Material zerkleinern | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,50 | 3,00 | 3,00 | 2,50 | 1,50 | 1,50 |
| 11 | Material sortieren | 1,50 | 1,50 | 1,50 | 1,00 | 1,50 | 2,00 | 2,00 | 1,50 | 1,00 | 1,50 |

0: keine Lärmemissionen/nicht störend, 1: wenig Lärmemissionen/kaum störend, 2: mittlere Lärmemissionen/teilweise störend, 3: hohe Lärmemissionen/störend, 4: starke Lärmemissionen/sehr störend.

Quellen: Expertenbefragung, Versuche und Immissionsmessungen. Literaturangaben sind materialunabhängig, qualitativ und in der Regel binär (Emissionen vorhanden: ja/nein): ABW (2012); Kamrath und Hechler (2011); DIN 18007:2009-03; Mettke, A. (Hrsg.) (2008); DA (2015); Mettke (1995); Mur und Muzeau (1979).

Tabelle 17: Materialbezogene Staubemissionskennwerte von Abbruchtechniken

| Abbruchtechnik | | Staubemissionskennwerte | | | | | | | | | |
|----------------|------------------------------|-------------------------|--------|---------------|------------|------------|------------|----------|-----------|-----------|-------|
| # | Verfahren | Mauerwerk | | | | | Beton | | | Sonstiges | |
| | | Naturstein | Ziegel | Kalksandstein | Porenbeton | Betonstein | Fertigteil | Ortbeton | unbewehrt | Holz | Stahl |
| 1 | Abgreifen | 2,50 | 2,50 | 3,00 | 3,00 | 2,50 | | | 2,50 | 1,00 | |
| 2 | Einschlagen | 3,00 | 3,00 | 3,00 | 3,00 | 3,00 | 2,50 | 2,50 | 3,00 | | |
| 3 | Eindrücken | 2,50 | 2,50 | 2,50 | 2,50 | 2,50 | 2,50 | | | 1,00 | |
| 4 | Einziehen | 2,50 | 2,50 | 2,50 | 2,50 | 2,50 | 2,50 | | | 1,00 | 0,00 |
| 5 | Reißen | 3,00 | 3,00 | 3,00 | 3,50 | 3,00 | 2,50 | 2,50 | 3,00 | | |
| 6 | Stemmen | 3,50 | 3,50 | 3,50 | 3,50 | 3,00 | 3,00 | 3,00 | 3,00 | | |
| 7 | Pressschneiden | 2,50 | 2,50 | 3,00 | 3,00 | 2,50 | 3,00 | 3,00 | 2,50 | | |
| 8 | Scherschneiden | | | | | | | | | 0,50 | 0,50 |
| 9 | Handabbruch mit Handwerkzeug | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,50 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 1,00 | 0,50 |
| 10 | Material zerkleinern | 3,00 | 3,00 | 3,00 | 3,50 | 3,00 | 2,50 | 2,50 | 3,00 | 1,00 | 0,50 |
| 11 | Material sortieren | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 1,00 | 0,50 |

0: keine Staubemissionen/nicht störend, 1: wenig Staubemissionen/kaum störend, 2: mittlere Staubemissionen/teilweise störend und Atemschutz empfohlen, 3: hohe Staubemissionen/störend und Atemschutz notwendig; 4: starke Staubemissionen/sehr störend/Gesundheit beeinträchtigend/ohne Minderungsmaßnahmen. (z.B. Benetzung, C-Schlauch, Wasserkanone) kein Arbeiten möglich.

Quellen: Expertenbefragung, Versuche und Immissionsmessungen. Literaturangaben sind materialunabhängig, qualitativ und in der Regel binär (Emissionen vorhanden: ja/nein): ABW (2012); Kamrath und Hechler (2011); DIN 18007:2009-03; Mettke, A. (Hrsg.) (2008); DA (2015); Mettke (1995); Mur und Muzeau (1979).

Tabelle 18: Materialbezogene Erschütterungsemissionskennwerte von Abbruchtechniken

| Abbruchtechnik | | Erschütterungsemissionskennwerte | | | | | | | | | |
|----------------|------------------------------|----------------------------------|--------|---------------|------------|------------|------------|----------|-----------|-----------|-------|
| # | Verfahren | Mauerwerk | | | | | Beton | | | Sonstiges | |
| | | Naturstein | Ziegel | Kalksandstein | Porenbeton | Betonstein | Fertigteil | Ortbeton | unbewehrt | Holz | Stahl |
| 1 | Abgreifen | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | | | 1,00 | 0,50 | |
| 2 | Einschlagen | 2,50 | 2,50 | 2,50 | 2,50 | 2,50 | 3,50 | 3,50 | 2,50 | | |
| 3 | Eindrücken | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | | | 0,50 | |
| 4 | Einziehen | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | | | 0,50 | 1,50 |
| 5 | Reißen | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,50 | 2,50 | 2,00 | | |
| 6 | Stemmen | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 3,50 | 3,50 | 2,50 | | |
| 7 | Pressschneiden | 1,50 | 1,50 | 1,50 | 1,50 | 1,50 | 2,00 | 2,00 | 1,50 | | |
| 8 | Scherschneiden | | | | | | | | | 0,50 | 0,50 |
| 9 | Handabbruch mit Handwerkzeug | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,50 | 1,50 | 1,00 | 1,00 | 1,50 |
| 10 | Material zerkleinern | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,50 | 1,50 | 1,00 | 0,50 | 0,50 |
| 11 | Material sortieren | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 0,50 | 0,50 |

0: keine Erschütterungen spürbar,1: geringe Erschütterungen mit geringer Intensität,2: spürbare Erschütterungen/impulsarm,3: hohe Erschütterungsintensitäten/impulsstark,4: sehr hohe(s) Erschütterungsereignis(se)/sehr impulsstark.

Quellen: Expertenbefragung, Versuche und Immissionsmessungen. Literaturangaben sind materialunabhängig, qualitativ und in der Regel binär (Emissionen vorhanden: ja/nein): ABW (2012); Kamrath und Hechler (2011); DIN 18007:2009-03; Mettke, A. (Hrsg.) (2008); DA (2015); Mettke (1995); Mur und Muzeau (1979).

Berechnung der Immissionen (Emissionsabnahmeeffekte in Abhängigkeit vom Umfeld):

Für die Berechnung der Immissionen werden im Planungsunterstützungswerkzeug Emissionsabnahmeeffekte in Abhängigkeit von Umfeldeigenschaften berechnet. Insbesondere die Distanz zwischen Emissionsquelle und dem nächsten Schutzgut sowie die Anzahl an Flächen nahe der Emissionsquelle, die in Richtung des nächsten Schutzgutes ausgerichtet sind (und so den Schall dorthin reflektieren können), wurden als relevante Einflussfaktoren auf die Ausbreitung der Immissionen identifiziert (VDI 3783 Blatt 13:2010; DIN 18005-1:2002-07; ISO 9613-2:1996; DIN 4150-1:2001-06). Die Bodeneigenschaften in der nahen Umgebung der Baustelle, die bspw. eine dämpfende Wirkung auf die Ausbreitung der Erschütterungen haben können, wurden bei der Berechnung des Abnahmeeffekts im Werkzeug vernachlässigt. Das Ergebnis liegt mit dieser konservativen Annahme (keine Dämpfung) auf der sicheren Seite und allgemein kann bei Abbrucharbeiten in Innenstädten mit einer eher geringeren Distanz (<20m) zum nächsten Schutzgut ausgegangen werden. Als Annahme für die Distanz zwischen der Emissionsquelle und dem nächstgelegenen Schutzgut, wird vom Werkzeug die minimale Distanz von der Abbruchbaustelle zum nächstliegenden Gebäude (in Meter) vom Nutzer angefragt. Weiter muss der Nutzer die Anzahl der Reflexionsflächen um das Abbruchgebäude herum eingeben.

Für den Fall, dass der Nutzer keine Aussage über diese beiden umfeldabhängigen Einflussfaktoren zur Immissionsberechnung machen kann, wurden im Rahmen des Projekts Umfeldtypen und deren entsprechende immissionsbeeinflussende Eigenschaften in Anlehnung an Siedlungstypologien nach Neuffer et al. (2001), Blesl (2002) und Erhorn-Kluttig et al. (2011) definiert (Tabelle 19).

Tabelle 19: Siedlungstypen/Umfeldtypen und immissionsbeeinflussende Eigenschaften²²

| Siedlungstyp/Umfeldtyp | | Minimale Distanz von der Abbruchbaustelle zum nächstliegenden Gebäude | Reflexionsflächen um das Abbruchgebäude |
|---|--------|---|---|
| Name | Bez. | [m] | [Anzahl] |
| Lockere offene Bebauung | ST 1 | 5 | 3 |
| Einfamilienhäuser und Doppelhäuser | ST 2 | 5 | 5 |
| Städtischer Dorfkern | ST 3a | 5 | 5 |
| Ländlicher Dorfkern | ST 3b | 5 | 5 |
| Reihenhaussiedlung | ST 4 | 5 | 6 |
| Kleine Mehrfamilienhäuser | ST 5a | 7 | 4 |
| Zeilenbebauung mit kleinen und größeren Mehrfamilienhäusern | ST 5b | 7 | 4 |
| Zeilenbebauung mit großen hohen Mehrfamilienhäusern und Hochhäusern | ST 6 | 14,5 | 3 |
| Blockbebauung niedriger Dichte | ST 7a | 5 | 5 |
| Blockbebauung hoher Dichte | ST 7b | 5 | 6 |
| Citybebauung | ST 8 | 5 | 7 |
| Historische Altstadt | ST 9 | 5 | 7 |
| Öffentliche Sonderbauten | ST 10a | 9,5 | 3 |
| Gewerbebauten | ST 11b | 5 | 3 |

Über die Nutzeroberfläche des Planungswerkzeugs kann für jedes Abbruchprojekt ein Umfeldtyp ausgewählt werden. Die mit dem Umfeldtyp verbundene minimale Distanz von der Abbruchbaustelle zum nächsten Gebäude und die Anzahl der Reflexionsflächen um das Abbruchobjekt werden zur Berechnung des umfeldabhängigen Emissionsabnahmeeffekts übernommen (siehe Abbildung 13 in Kapitel 3.1.2).

²² Vgl. Neuffer et al. (2001), Blesl (2002) und Erhorn-Kluttig et al. (2011).

3.2.5. Technikbewertung

Aus den technisch möglichen Abbruchtechniken wird abhängig von den Präferenzen des Nutzers (siehe Kapitel 3.1.3) die „geeignetste“ Technik je Bauteilgruppe auf Basis der ökologischen und ökonomischen Ausprägungen der alternativen Abbruchvorgänge bestimmt. Die Bestimmung erfolgt unter Verwendung der „Multi-attribute value theory“ (MAVT), einer Methode der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung (Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA)).

3.3. Werkzeugausgabe

Die Werkzeugausgabe umfasst die folgenden Elemente:

- **Technikauswahl:** in Form einer Tabelle der vorgeschlagenen Techniken **je Bauteil/Vorgang**
- **Rückbauablaufplan:** Balken-/Zeitplan der Aktivitäten mit Histogrammen zur Immissionsauslastung, Kostenverteilung und Ressourcenverteilung über die Zeit
- **Gesamtprojektinformationen**

Abbildungen 21 und 24 und Tabelle 22 im Kapitel 3.4.3. veranschaulichen diese Elemente der Werkzeugausgabe am Beispiel des Testprojekts.

Weiter kann das Planungswerkzeug einen **Hinweis auf mögliche Schadstoffe** geben. Nähere Informationen zu den betrachteten Schadstoffen und deren material- und bauteilbezogenen Zuordnung, sind Kühlen et al. 2014, Kapitel 5.1.6. zu entnehmen.

3.4. Werkzeugtest: Planung eines realen Abbruchvorhabens

Der Prototyp des Entscheidungsunterstützungswerkzeugs wurde bei einem Abbruchvorhaben des Praxispartners getestet, um die Aussagekraft der Ergebnisse zu überprüfen. Das Vorgehen und die Ergebnisse werden im Folgenden erläutert.

3.4.1. Vorhabenbeschreibung

Das Abbruchvorhaben umfasst den Rückbau der Tragstruktur eines Wohngebäudes aus dem Jahr 1945 des Gebäudetyps C (vgl. Tabelle 1): Mauerwerkswände (Ziegel) mit Holzdecken und einer Dachtragkonstruktion aus Holz. Das Abbruchgebäude besteht aus drei Geschossen über GOK und einem Fundament aus Stahlbeton. Die inneren Trennwände sind massiv in Ziegelbauweise errichtet. Das nächstliegende Gebäude grenzt direkt an das Abbruchgebäude an und die Verhältnisse für den Rückbau sind sehr beengt (es stehen nur kleine Flächen für die Baustelleneinrichtung und für kleine Geräte zur Verfügung). Der Schall kann von 2 Flächen um das Abbruchobjekt herum zum angrenzenden Gebäude reflektiert werden. Auf Grund der hauptsächlich sehr beengten Platzverhältnisse auf der Abbruchbaustelle, ist der Rückbau von Dach und des 1. Obergeschosses nur mit Handabbruch durchführbar (1. Phase). Das Erdgeschoss mit Fundament wird mit einem 24-Tonnen-Hydraulikbagger mit Anbaugeräten (Schere bzw. Hammer) abgebrochen (Phase 2). Die Materialzerkleinerung und –sortierung erfolgt allgemein mit dem 24-Tonnen-Hydraulikbagger mit Sortiergreifer.

3.4.2. Nutzereingabe

In Anlehnung an die 2 Rückbauphasen, Handabbruch und Abbruch mit Hydraulikbagger, wird die Gebäudeeingabe unterteilt in den Rückbau von:

1. Dach und 1. Obergeschoss
2. Erdgeschoss mit Fundament.

Die **Abmessungen und Materialien** der einzelnen Gebäudeelemente der Phase 1 und 2 wurden auf Basis von Gebäudeplänen ermittelt und über die Eingabemasken des Planungsunterstützungswerkzeugs (Kapitel 3.1.1.: Abbildung 17 und Abbildung 18) entsprechend eingegeben. Tabelle 20 und Tabelle 21 stellen Auszüge der vom Werkzeug aus den Eingabedaten jeweils generierten (qualifizierten) Stücklisten der einzelnen Gebäudeelemente von Phase 1 und 2 dar.

Tabelle 20: Auszug der qualifizierten Stückliste der einzelnen Gebäudeelemente der Phase 1

| Geschoss # | Geschoss | Element | Material | Max. Elementdicke (m) | Materialvolumen (m3) | Höhe über GOK (m) |
|------------|----------------|-----------|------------------|-----------------------|----------------------|-------------------|
| 3 | Dachgeschoss | Dach | Holz | 0,02 | 0,80 | 10,30 |
| 3 | Dachgeschoss | Außenwand | Ziegel-Mauerwerk | 0,5 | 29,50 | 10,30 |
| 3 | Dachgeschoss | Innenwand | Ziegel-Mauerwerk | 0,13 | 2,70 | 10,30 |
| 2 | 1.Obergeschoss | Decke | Holz | 0,03 | 2,30 | 5,26 |
| 2 | 1.Obergeschoss | Außenwand | Ziegel-Mauerwerk | 0,5 | 37,70 | 5,26 |
| 2 | 1.Obergeschoss | Innenwand | Ziegel-Mauerwerk | 0,5 | 4,30 | 5,26 |

Tabelle 21: Auszug der qualifizierten Stückliste der einzelnen Gebäudeelemente der Phase 2

| Geschoss # | Geschoss | Element | Material | Max. Elementdicke (m) | Materialvolumen (m3) | Höhe über GOK (m) |
|------------|-------------|-----------|------------------|-----------------------|----------------------|-------------------|
| 1 | Erdgeschoss | Decke | Holz | 0,03 | 13,80 | 2,59 |
| 1 | Erdgeschoss | Außenwand | Ziegel-Mauerwerk | 0,5 | 42,40 | 2,59 |
| 1 | Erdgeschoss | Innenwand | Ziegel-Mauerwerk | 0,5 | 6,80 | 2,59 |
| 1 | Erdgeschoss | Fundament | Stahlbeton | 0,2 | 7,95 | 0 |

Die **Baustellenrahmen- und Umgebungsbedingungen** wurden dem Bebauungsplan der Umgebung des abzubrechenden Gebäudes und einer Beschreibung des Rückbauvorhabens entnommen. Die folgenden Daten wurden über die Eingabemaske des Werkzeugs zur Beschreibung der Baustellenrahmen- und Umgebungsbedingungen (Kapitel 3.1.2.: Abbildung 19) eingegeben:

- Anzahl der einsetzbaren Maschinen: 1 Hydraulikbagger (Handabbruchgeräte werden im Werkzeug allgemein als vorhanden angenommen)
- Größe der einsetzbaren Maschinen: 145 kW (24 Tonnen)
- Bezugsjahr für die Kosten: 2014
- Dieselpreis: 1,17 Euro/l²³
- Platzverhältnisse um das Abbruchobjekt herum: Phase 1: 1 = „sehr begrenzt“; Phase 2: 2 = „begrenzt“
- Minimale Distanz von der Abbruchbaustelle zum nächsten Gebäude: 0 m
- Anzahl der Reflexionsflächen um das Abbruchobjekt herum: 2
- Schutzmaßnahmen: keine

Zur **Berechnung der Kosten** wird ein Mittellohn von 26,15 Euro/h²⁴ angesetzt. Die vom Planungswerkzeug vorgeschlagenen maschinenbezogenen Stundenkostensätze werden übernommen.

²³ Nutzerspezifische Anpassung des im Werkzeug voreingestellten Dieselpreises (siehe Kapitel 3.2.3).

²⁴ Nutzerspezifische Anpassung des im Werkzeug voreingestellten Mittellohns (siehe Kapitel 3.2.3).

3.4.3. Werkzeugausgabe

Die Werkzeugausgabe umfasst die im Kapitel 3.3. beschriebenen Elemente Technikauswahl, Rückbauablaufplan und Gesamtprojektinformationen. Auf Grund der „sehr begrenzten“ Platzverhältnisse, ist in der **1. Phase** nur der Handabbruch möglich. In der **2. Phase** unter „begrenzten“ Platzverhältnissen und mit einer Präferenz für die minimalen Kosten bzw. der minimalen Dauer schlägt das Werkzeug den Rückbau mit Hydraulikbagger und entsprechenden Anbaugeräten in Form von Pressschneiden und Hämmern vor. Abbildung 21 bis 24 zeigen jeweils die vom Werkzeug generierten zeitbezogenen Ausgabeinformationen für die Phase 1 bzw. 2. In Tabelle 22 werden die Gesamtprojektinformationen über Phasen 1 und 2 gelistet.

Tabelle 22: Gesamtprojektinformationen

| Phase | Gesamtdauer (h) | Gesamtkosten (€) | Durchschnittliche Schallimmissionshöhe am Nachbargebäude | Durchschnittliche Staubimmissionshöhe am Nachbargebäude | Durchschnittliche Erschütterungsimmissionshöhe am Nachbargebäude | Ressourcen |
|--------------|--|------------------|---|--|--|---|
| 1 | 122 (244 Personenstunden) | 14.386 | Störend/ hohe Immissionen: durchschnittlicher Tages- Beurteilungspegel 100 dB(A) | Teilweise störend/ mittlere Immissionen und Atemschutz empfohlen: durchschnittliche Staubkonzentration von einatembarem Staub (E-Staub) 25 mg/m ³ | Kaum störend/ geringe Erschütterun- gen mit geringer Intensität: durchschnittliche Erschütterungsimmis- sion/ Schwingstärke 0,25 mm/s | <ul style="list-style-type: none"> • 2 Arbeiter • 2 Hand- abbruchgeräte |
| 2 | 13 (26 Personenstunden) | 2.321 | Sehr störend/ sehr hohe Immissionen: durchschnittlicher Tages- Beurteilungspegel 110 dB(A) | Teilweise störend/ mittlere Immissionen und Atemschutz empfohlen: durchschnittliche Staubkonzentration von einatembarem Staub (E-Staub) 25 mg/m ³ | Teilweise störend/ spürbare Erschütte- rungen, impulsarm durchschnittliche Erschütterungs- immission/ Schwing- stärke 0,4 mm/s | <ul style="list-style-type: none"> • 2 Arbeiter • 1 Hydraulik- bagger • Anbaugeräte: Sortiergreifer, Hammer, Schiere |
| Summe | 135 (270 Personen- stunden) | 16.707 | | | | |

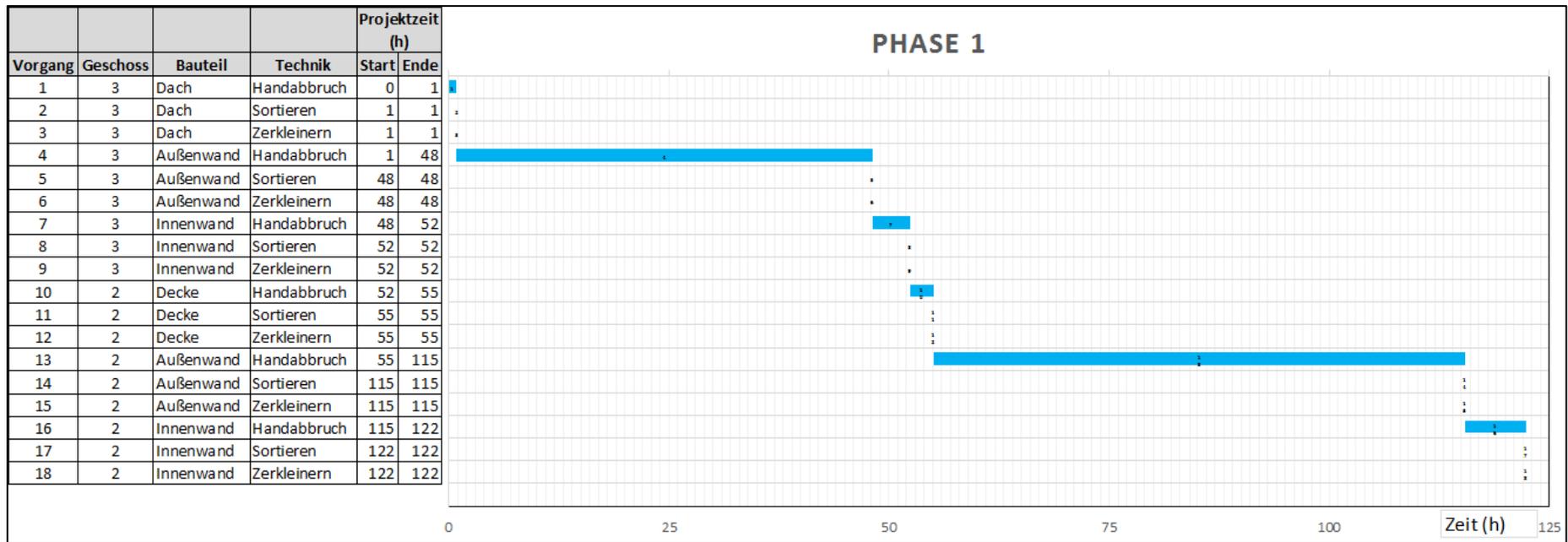


Abbildung 21: Rückbauprojekttafelplan der Phase 1 des realen Abbruchvorhabens inklusive Technikauswahltable

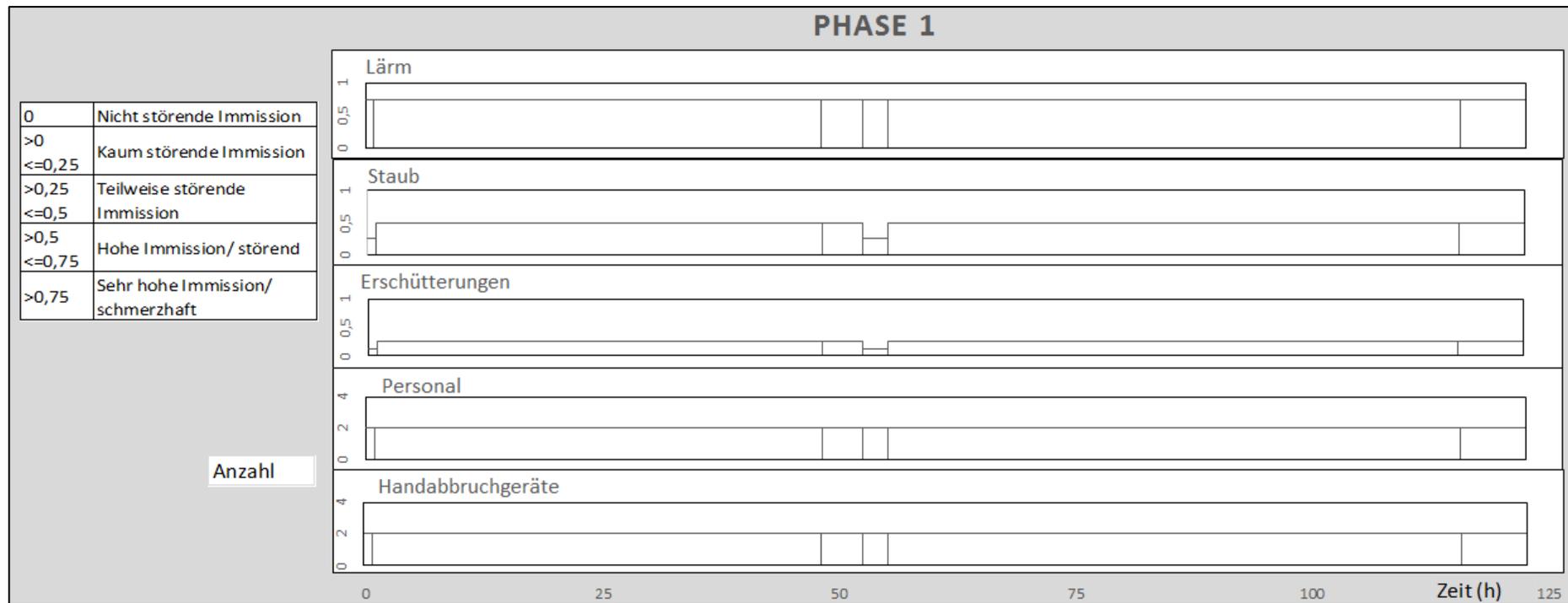


Abbildung 22: Zeitliche Verteilung und Anzahl der Ressourcen sowie Höhe der Immissionsauslastungen (0-1) am angrenzenden Gebäude der Phase 1 des realen Abbruchvorhabens

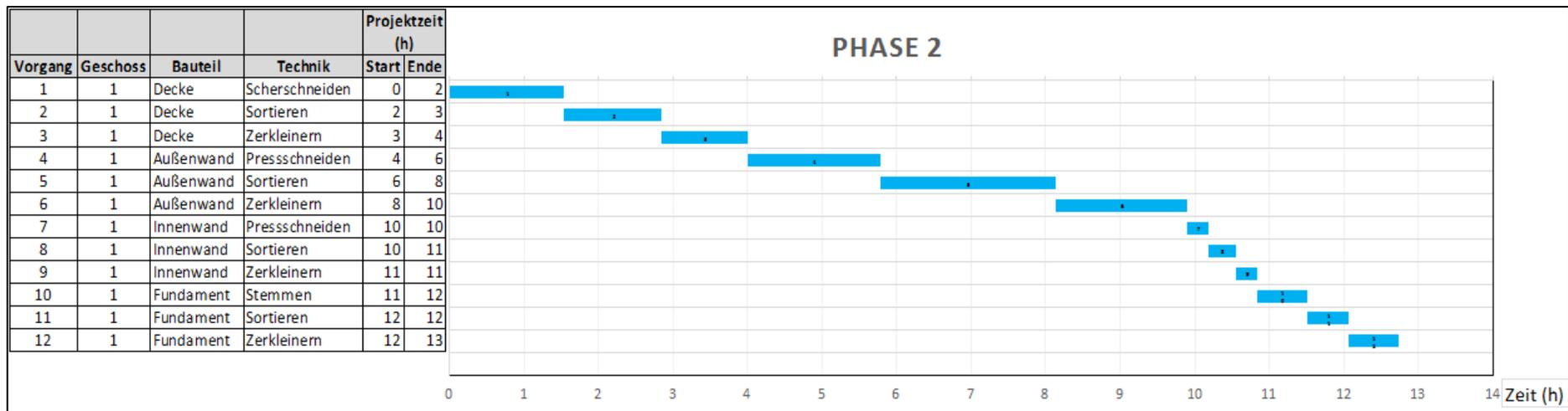


Abbildung 23: Rückbauprojekttablaufplan der Phase 2 des realen Abbruchvorhabens inklusive Technikauswahltabelle

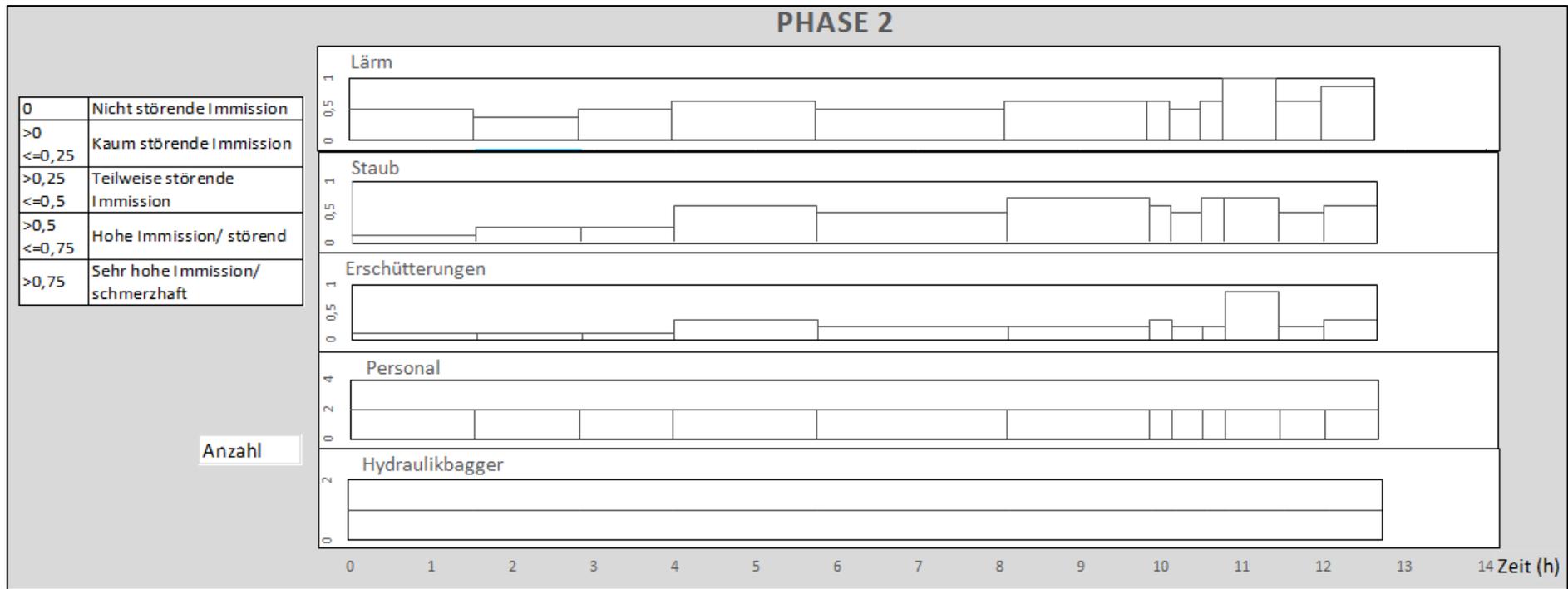


Abbildung 24: Zeitliche Verteilung und Anzahl der Ressourcen sowie Höhe der Immissionsauslastungen (0-1) am angrenzenden Gebäude der Phase 2 des realen Abbruchvorhabens

3.4.4. Vergleich der Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Das Planungsunterstützungswerkzeugs zeigt bzgl. Kosten, Personenstunden und Geräteeinsatz ähnliche Ergebnisse wie das tatsächlich realisierte Projekt (die beiden Projektphasen). Das Werkzeug berechnet, wie unter 3.2.3 beschrieben, die Einzelkosten der Teilleistungen. In der Phase 1 und 2 entstanden Einzelkosten der Teilleistungen in Höhe von insgesamt 16.707 Euro (Personal + Geräte). Real sind Euro entstanden. Somit **weicht das Werkzeug bezüglich der Kosten um 7,8% (1.307 Euro)** von den im Projekt entstandenen Kosten ab. Weiter wurden 270 Personenstunden für den gesamten Rückbau aufgewendet. Real wurden 272 Personenstunden benötigt. **Die Abweichung in den Personenstunden ist mit 1,5% (4 Std)** sehr gering. Zum Einsatz kamen 1 Hydraulikbagger mit den Anbaugeräten, Sortiergreifer, Hammer und Schere, sowie Handabbruchgeräte. **Der Geräteeinsatz entspricht der Ressourcenausgabe des Werkzeugs** und spiegelt auch die einzelnen durch das Werkzeug vorgeschlagenen Rückbautechniken wider.

Die Verteilung der Immissionen über den Rückbauablauf sowie entsprechende Immissionshöhen am Nachbargebäude können nicht mit Daten des realisierten Projekts verglichen werden. Entsprechende Informationen liegen von dem realisierten Projekt nicht vor. Dafür wären kontinuierliche Immissionsmessungen während des Rückbaus notwendig gewesen. Da solche kontinuierlichen Immissionsmessungen derzeit bei Abbruchprojekten allgemein nicht erfolgen, ist dies auch Teil des vorliegenden Projekts. Für eine erste Einschätzung lassen sich insbesondere die durch das Werkzeug ausgegebenen Schallimmissionshöhen mit Angaben aus der Literatur vergleichen. Da das Nachbargebäude direkt an das Abbruchobjekt angrenzt, wurde der Abstand zwischen Emissionsquelle und Immissionsort mit 0 m angenommen und somit entspricht die Emissionshöhe der Immissionshöhe. Beispielsweise der Schallpegel eines Presslufthammers, der in der Regel beim Handabbruch zum Einsatz kommt, wird in der Literatur mit etwa 100 dB(A) angesetzt und als störend eingestuft wird (BG Bau (2015), Wikipedia-1 (2014)). Einen entsprechenden durchschnittlichen Tages-Beurteilungspegel und entsprechende Höhen der Immissionsauslastungen gibt das Planungswerkzeug über die Projektdauer für die Rückbauvorgänge der 1. Phase aus (vgl. Abbildung 22).

Neben den im Rahmen des Projekts erfolgten Tests und umfassenden Anpassungen des Prototyps, bedarf es für die Weiterentwicklung des Werkzeugs zur Praxistauglichkeit noch weitere Tests und es werden möglicherweise weitere Anpassungen notwendig (siehe auch Ausblick, Kapitel 6.2).

4. Immissionserfassungssystem

4.1. Systemaufbau

Der grundlegende Aufbau des Immissionserfassungssystems (im Folgenden auch KIT-System genannt) hat sich bzgl. der 2. Projektphase nicht geändert. Daher folgt hier eine stark gekürzte Zusammenfassung. Details zum Systemaufbau sind in Kühlen et al. 2014 (Kapitel 6.1.) zu finden.

Das System soll in Zukunft eine kostengünstige und zuverlässige technische Lösung bieten für die permanente Überwachung temporärer Rück-/Baumaßnahmen bezüglich Emissionen/Immissionen. Dadurch soll die Umgebung vor hohen Belastungen geschützt und dem Bauherren respektive dessen Beauftragten (Planer) und Auftragnehmer/Abbruchunternehmer eine zügige, nicht unterbrochene Durchführung ihres Vorhabens erlaubt werden, wenn kein Verstoß gegen Immissionsgrenzwerte vorliegt.

Aktuell werden solche Messungen nur unter permanenter Anwesenheit gut ausgebildeten Bedienpersonals und mit sehr teuren Messgeräten durchgeführt. Daher wird aus Kostengründen, wenn überhaupt, dann nur punktuell und zeitlich befristet gemessen, was dem Charakter einer Baustelle nicht gerecht werden kann.

Deshalb waren wichtige Forderungen für die Entwicklung des neuen Systems zur Immissionserfassung zu Grunde zu legen:

- niedrige Kosten,
- einfache Bedienbarkeit/Handhabung: niedriger Aufwand beim Aufbau, bei der Inbetriebnahme, Wartung und Bedienung und
- durchgängiger Einsatz des Systems.

Folglich kommt in dem am KIT entwickelten System eine einfache und günstige Messtechnik zum Einsatz, deren Qualität nicht ausreicht, nach DIN die entsprechenden Immissionen zu erfassen. Auch die verschiedenen Messpunkte und die hohe Messfrequenz können die Messqualität nicht ausgleichen, sodass auch die Ergebnisse des Systems nach aktuellen Normen nicht belastbare Ergebnisse darstellen. Indessen ist es für den Bauherren und Auftragnehmer/Abbruchunternehmer finanziell nicht machbar, nach DIN zugelassene Messgeräte flächendeckend und ununterbrochen einzusetzen. Beispielsweise würde allein die Sensorik für die Überwachung der genannten Größen, Lärm, Staub und Erschütterungen, für 6 Messpunkte mindestens 100.000€ kosten (die genannte Summe setzt sich zusammen aus den Kosten für je 6 Sensoren für Schall je ca. 1.000€, Erschütterung min. je 5.000€ und Staub je ca. 10.000€). Aber weniger Sensoren könnten insbesondere bei Staub dazu führen, dass der Wind den Staub an den Sensoren vorbei bläst und das Ergebnis entscheidend verfälscht wird. Daher muss die Normung angepasst werden, wenn eine gezielte, durchgängige Überwachung der Immissionen in der Nähe von Abbruch-/Rückbaustellen gewünscht wird.

Weiter sind die einfache Bedienbarkeit und geringer Aufwand für die Inbetriebnahme und den Aufbau Voraussetzungen, um die laufenden Kosten gering zu halten. Idealerweise sollte das Messsystem durch das auf der Baustelle verfügbare Personal aufgebaut und in Betrieb genommen/gehalten werden. Nach Abbau des Systems sollte das Gerät möglichst einfach durch das eigene Unternehmen/Personal auf den nächsten Einsatz vorbereitet werden können. Bei derzeit üblichen Messungen müssen jedoch immer gut ausgebildete Messtechniker oder Ingenieure vor Ort sein.

Darüber hinaus erlaubt die neu entwickelte Sensorplattform die rudimentäre, permanente Überwachung der Messgrößen Lärm, Staub und Erschütterungen an mehreren relevanten Messpunkten. Die einzige Arbeit die nach dem Aufbau des Systems vor Ort zu leisten ist, ist das Sicherstellen der Stromversorgung. Datensammlung und -verteilung erfolgen automatisiert und können auch über Mobilfunknetze erfolgen. Aktuelle Messungen hingegen werden normalerweise maximal einen Tag

lang durchgeführt und dann im Anschluss ausgewertet. Neben einer nur punktuellen Aufzeichnung von relevanten Messgrößen, führen solche kurzen/vorübergehenden Messungen oft zu anderen, optimierten Abläufen auf der Baustelle (oft auch unbewusst, da eine Messung mit heutigen Geräten immer auffällt). Wenn die Messungen permanent ausgeführt werden, ist das immer der Normalzustand. Somit werden beispielsweise Überschreitungen auch registriert, wenn den Arbeitern nicht bewusst ist, dass sie gerade überwacht werden, bzw. es entwickelt sich auf der Baustelle ein allgemeines Bewusstsein, das zur Begrenzung von Immissionen führen wird.

Der Aufbau des prototypisch entwickelten Immissionserfassungssystems ist in Abbildung 25 dargestellt. Um die Rück-/Baustelle werden Messknoten (MK) an allen relevanten Messpunkten in der gewünschten Höhe installiert. Die Messknoten sind in ein selbstorganisierendes Zigbee Netzwerk eingebunden und liefern dem Server (der Auswerteeinheit) vor Ort alle Messdaten. Der Server wertet die Daten aus und stellt die Auswertung und die Rohdaten über ein beliebiges Datennetz zur Verfügung. Der Maschinenführer erhält die Auswertung direkt, um so auf die aktuelle Immissionslage reagieren zu können (Rückkopplung). Durch eine Aufnahme der Verhältnisse vor Ort kann auch die Umgebung mit berücksichtigt werden. So kann durch die Kenntnis der Umgebungsbedingungen eine Verknüpfung der Messwerte mit Wetterdaten (Wind) erfolgen und dadurch die Staubausbreitung in der Umgebung überschlägig in nahezu Echtzeit abgeschätzt werden.

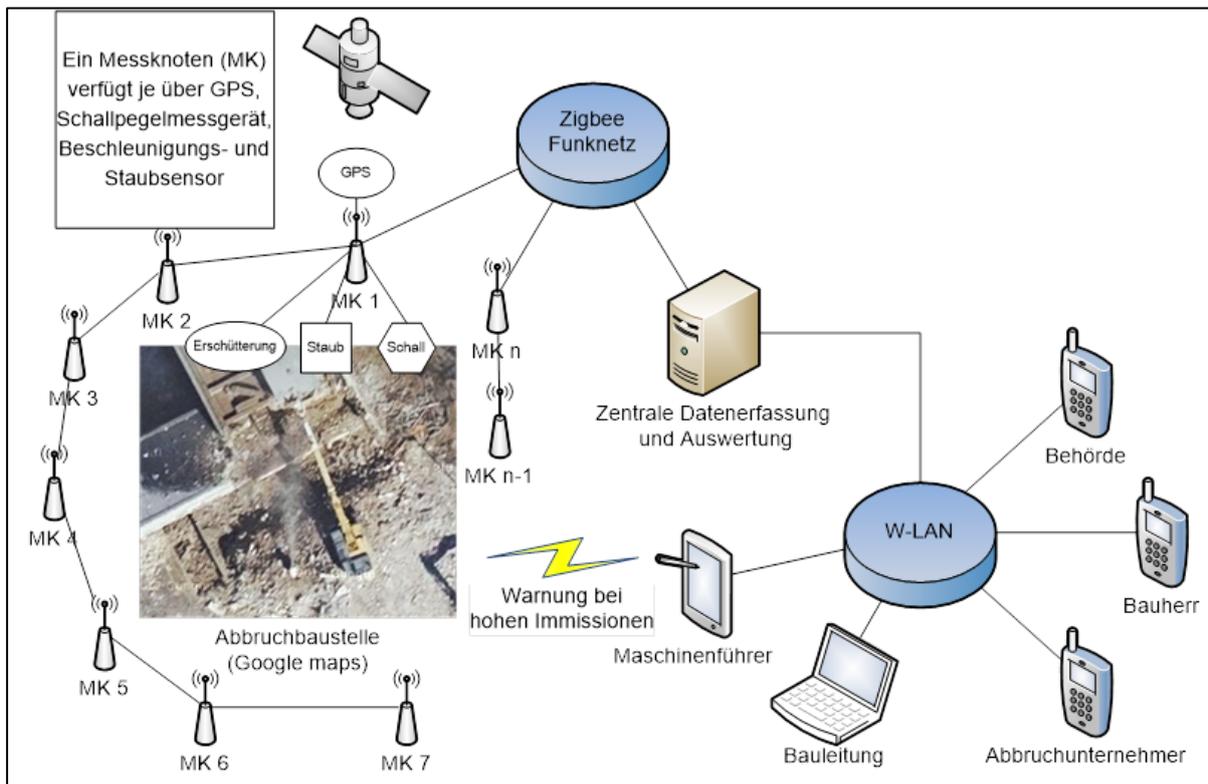


Abbildung 25: Aufbau des Immissionserfassungssystems um die Abbruchbaustelle herum (links) mit dem Koordinator zwischen dem Zigbee Funknetz und der Auswerteeinheit (rechts) und mit der Rückkopplung (Mitte, unten)

Ein Messknoten, wie in Abbildung 26 dargestellt, besteht aus einer Stromversorgung, der Hauptplatine (Funkeinheit) und den daran angeschlossenen Sensoren. Ziel ist es dabei, die Sensoren dort zu positionieren, wo die entsprechende Messgröße wesentlich auftritt. Die Erschütterungssensoren können bspw. durch Erdschrauben ausreichend tief in das Erdreich eingebracht werden und so kann die Erschütterungsimmission z.B. auf Höhe des benachbarten Fundamentes gemessen werden.

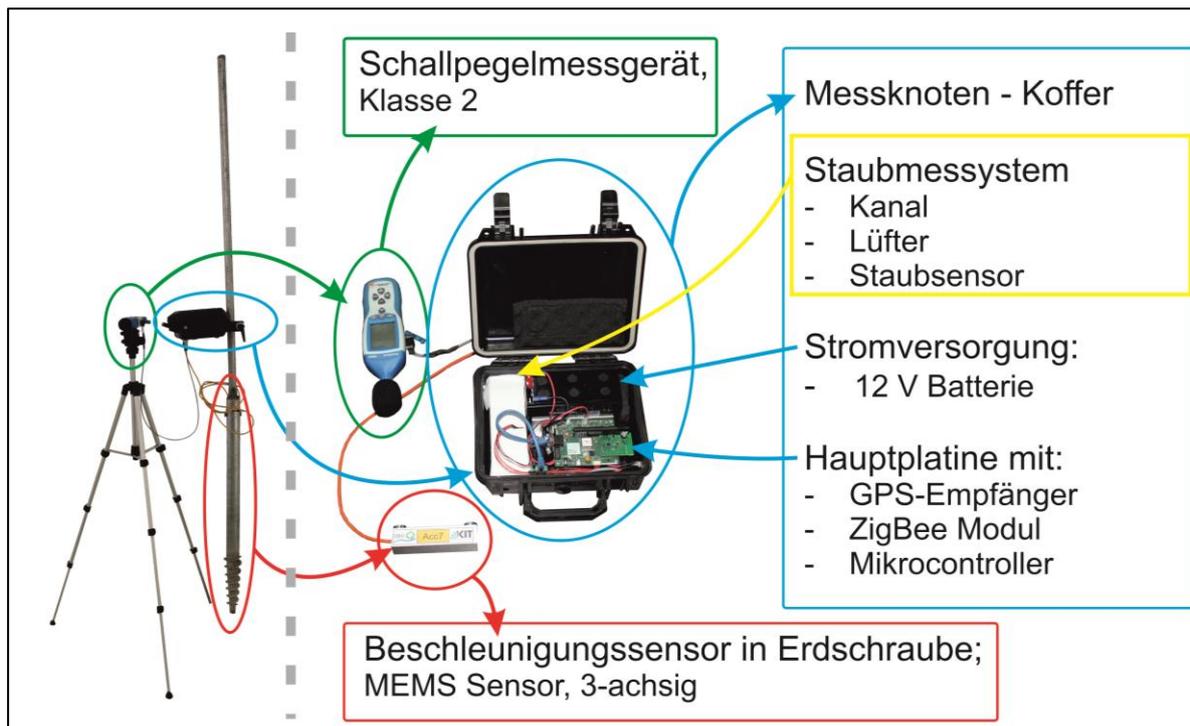


Abbildung 26: Aufbau eines Messknotens mit Schall- (grün), Staub- (gelb) und Erschütterungssensoren (rot), die an die Funkeinheit (blau) angeschlossen werden.

4.2. Datenerfassung und Auswertung

Grundlegend hat sich die reine Datenerfassung gegenüber der zweiten Phase in der dritten Projektphase nicht geändert (vgl. Kühlen et al. 2014, Kapitel 6.1.). Es erfolgten primär Anpassungen im Bereich der Software. So wurden Möglichkeiten eingefügt, Grenzwerte für zulässige Immissionshöhen einzustellen, bei denen eine Alarmierung ausgelöst wird. Da die von dem System aufgenommenen Messgrößen jedoch keine absoluten Immissionsgrößen nach DIN darstellen, ist die exakte Einhaltung der absoluten Grenzwerte mit diesem System nur eingeschränkt möglich. Es wird daher ein System mit Warnstufen verwendet. Bis jetzt wurden hierzu die Grenzen bei 90 und 110% gesetzt, so dass bei der Warnstufe „Grün“ (90) davon auszugehen ist, dass die Grenzwerte eingehalten werden und bei „Rot“, dass eine Überschreitung eintritt. Ab Stufe „Gelb“ sollte an alternative Verfahren gedacht werden, auch wenn eine Überschreitung der Grenzwerte ab diesem Level nicht sicher ist. Über den qualitativen Verlauf der Messergebnisse über die Zeit, ist ein relativer Vergleich der Immissionshöhen möglich und davon können wiederum absolute Immissionshöhen abgeleitet werden. Bei starken Temperaturschwankungen können sich die Messwerte jedoch - bei gleichen Immissionen - bedeutend ändern, was bei der Analyse zu berücksichtigen ist. Daher müssen für die Überführung des prototypischen Systems in die Praxis unter anderem noch Kalibrierungskurven mit den Parametern Luftfeuchtigkeit, Temperatur und Sonneneinstrahlung erstellt werden, die mit den Mitteln dieses Projektes nicht möglich waren.

Für die (nachträgliche) Auswertung der Immissionen durch Rück-/Bauarbeiten wurde ein Programm erstellt, mit dem es möglich ist, den Verlauf der gemessenen Immissionen aller Sensoren auf der Baustelle schnell zu erfassen und darzustellen. Eine entsprechende schematische Darstellung der Immissionsverläufe zeigt Abbildung 27. Hier ist bspw. gut zu sehen, dass bei den Größen Schall und Erschütterung, alle Sensoren des Systems sofort und mit ähnlich großer Amplitude messen, während beim Staub die Staubwolken sich langsam von Sensor zu Sensor mit abnehmender Amplitude bewe-

gen. Weiter können über die Darstellung der Verläufe relevante Immissionsspitzen schnell erkannt werden.

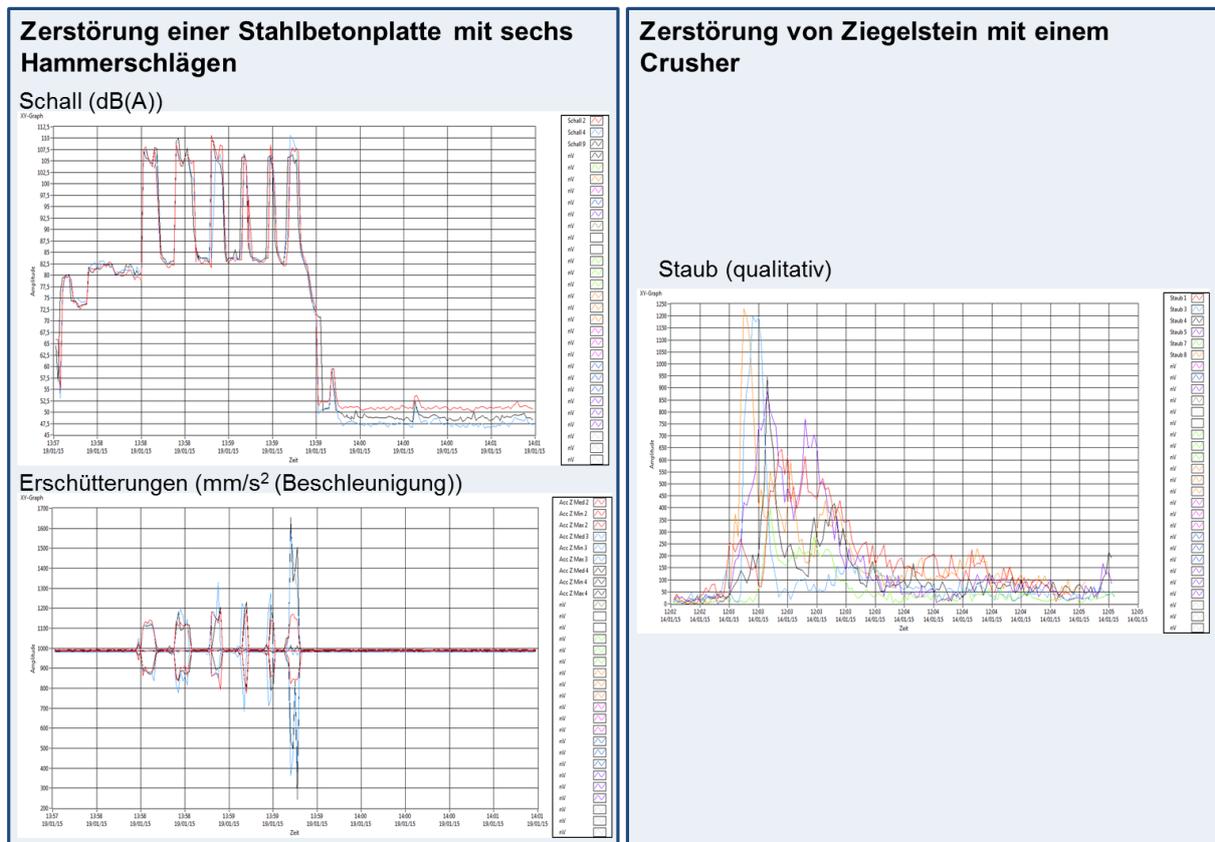


Abbildung 27: Schematische Darstellung der Immissionsverläufe für die Auswertung

4.3. Verknüpfung mit dem Werkzeug zur Planungsunterstützung

Der über das oben beschriebene Programm für die Auswertung erstellte Immissionsverlauf, sollte ursprünglich mit dem Planungstool verknüpft werden. Dadurch sollte bspw. bei Immissionsüberschreitungen mit dem Vorschlag alternativer Abbruchtechniken über einen Tablet-PC im Bagger in den Baustellenablauf eingegriffen werden (Abbildung 28). Es wurden Gespräche mit Maschinenführern geführt, bei denen der Ansatz der Verknüpfung eher kritisch gesehen wurde. Der Maschinenführer müsste den Tablet-PC parallel zu seiner regulären Arbeit bedienen. Es gab insbesondere Einwände bezüglich dieser zusätzlichen Belastung, die auch die Sicherheit und Leistung beeinflussen können. Weiter sollte die Entscheidung für den Wechsel der Abbruchtechnik nicht der Maschinenführer treffen müssen. Aus diesen durchaus berechtigten Gründen wurde die Verknüpfung zwischen dem Immissionserfassungssystem und dem Planungsunterstützungswerkzeuges nicht weiter verfolgt.

Eine zielführendere und einfache Alternative könnte bspw. eine Tabelle der Abbruchtechniken sein, mit den zu erwartenden Emissionshöhen (Emissionskennzahlen) und Informationen zu deren technischer Eignung. Diese Tabelle würde dem Polier oder Baustellenleiter ausgedruckt vorliegen. Bei der oben beschriebenen Alarmierung bei Grenzwertüberschreitungen, könnte der Maschinenführer den Polier oder Baustellenleiter informieren, die dann eine Entscheidung bezüglich einer möglichen alternativen Abbruchtechnik treffen.

Darüber hinaus ist eine Verknüpfung der Systeme für den Unternehmer weiterhin interessant für eine bessere Leistungsabschätzung der Arbeiten und für die Dokumentation des Baufortschritts. Auf

Grund der oben genannten Punkte, müsste hierfür jedoch ein Weg gefunden werden, den Maschinenführer aus der Pflicht für Erfassung des Baufortschritts zu nehmen. Denkbar wären z.B. Videoanalysen. Auch der Prozess der Digitalisierung aller Informationen im Bauwesen durch das Building Information Modeling (BIM), der in Zukunft sicher auch beim Rückbau (evtl. mit einer Verzögerung gegenüber dem Neubau) eine Rolle spielen wird, kann in diesem Zusammenhang unterstützen. Durch BIM und eine Digitalisierung aller Informationen auf der Rückbau-/Baustelle könnte der Zustand des Gebäudes und der Umgebung, die Position des Baggers und die Position des Anbauwerkzeuges erfasst werden, um dann qualifizierte Informationen des Rück-/Bauablaufs an die Akteure (Unternehmer, Bauherr, Behörden) weiterzugeben.



Abbildung 28: Ansatz der Verknüpfung zwischen Immissionserfassungssystem und Planungsunterstützungswerkzeug

4.4. Systemtest

Das prototypische Immissionserfassungssystem wurde einem Test gegenüber konventionellen Messtechniken unterzogen (siehe auch Kapitel 2.2.). Bei diesen Versuchen wurde festgestellt, dass die quantitativen Verläufe der Messwerte des KIT-Systems gut mit jenen der kalibrierten Messsysteme übereinstimmen. Unter den nahezu konstanten Rahmenbedingungen bei den Versuchen wurden Faktoren zur Kalibration ermittelt. Nach einer entsprechenden Kalibrierung des Immissionserfassungssystems hat dieses unter den gegebenen konstanten Versuchsbedingungen ähnlich genau gemessen wie die hochpreisige Technik der Vergleichsgeräte. So wurden in den Versuchen auch mit dem KIT-System belastbare und vergleichbare Ergebnisse generiert, die so wie die Daten der konventionellen Geräte als Datenbasis in das Planungsunterstützungswerkzeug einfließen können.

4.4.1. Weiter bestehende Herausforderungen

In manchen Bereichen traten bei dem Prototyp noch Probleme im Praxistest auf, die weiter bestehende Herausforderungen des Systems darstellen und die in Zukunft bei der Weiterentwicklung des

Systems zu lösen sind. Im Folgenden sind die Probleme, die bei verschiedenen kleinen Praxiseinsätzen und in den Versuchen festgestellt werden konnten, gelistet:

- **Teilsystemausfall:** Bei der Aktivierung/beim Einsatz von mehr als 6 der derzeit 10 Sensoren/Messknoten des Systems fällt ein Teil der Sensoren/Messknoten aus.
- **Wettereinfluss:** Die Messwerte der Sensoren sind wetterabhängig.
- **Messfehler:** Es wurden teilweise falsche/sehr unwahrscheinliche Werte gemessen, die auf sehr selten auftretende Fehler der Hard- und Software bei den Sensorknoten hindeuten.

Teilsystemausfall: Beim Einsatz des kompletten Systems mit 10 Sensoren fällt ein Teil der Sensoren wiederholt aus. Die genaue Ursache konnte noch nicht herausgefunden werden, aber vermutlich ist dies ein Problem der Leistungsfähigkeit des Kontrollers/des Koordinatorboards. Mit Hilfe des verwendeten Zigbee Funknetzes kann das selbstorganisierende Netzwerk stabil gehalten und den Ausfall einzelner Messknoten schnell ausgeglichen werden. Allerdings entsteht hierdurch und in Kombination mit dem Datentransfer ein sehr hoher Rechenbedarf auf dem Koordinatorboard. Hierdurch können nicht immer alle Daten verlustfrei über den Controller abgebildet werden. Der Ausfall eines Teilsystems konnte nur beim Einsatz von mehr als 6 Sensoren beobachtet werden. Beim Einsatz von 6 oder weniger Messknoten trat dieses Problem nicht auf. Die Lösung des Problems müsste hardware- und evtl. softwaretechnisch erfolgen, was eine neue Generation der Platinen erfordert.

Wettereinfluss: Der starke Einfluss des Wetters auf die Messwerte, insbesondere bei der Staubmessung, hatte zur Folge, dass ein Vergleich der Messwerte ausschließlich über die Zeitspanne hinweg möglich ist, in der relativ konstante Wetterbedingungen vorliegen. Ein Vergleich von Messwerten über Zeitspannen mit variierenden Wetterverhältnissen ist nicht möglich. Eine Untersuchung der Kalibrierungsfaktoren des KIT-Systems, die im Spätsommer erfolgte, und die Ergebnisse der Versuche aus Kapitel 2.2, die Mitte Januar stattfanden, stützen die Vermutung, dass eine Kalibrierung nicht einfach linear erfolgen kann. Jeder Staubsensor hat eine Grundspannung, die auch ohne Staub übertragen wird und einen Wert im Auswertungsprogramm generiert. Dieser Wert der Grundspannung war im Winter deutlich höher, was auf die Ursache einer erhöhten Luftfeuchte/niedrigeren Temperatur schließen lässt. Um das Problem zu beheben, wären umfangreiche Versuche in einer Klimakammer mit bekannter Staubkonzentration nötig mit dem Ziel einer Kalibrierung des Systems unter Verwendung von Klimafaktoren.

Messfehler: Falsche/unwahrscheinliche Messwerte waren ein weiteres, aber eher seltenes Problem im Praxistest. Ursachen dieser Messfehler waren sehr wahrscheinlich Übertragungsfehler zwischen dem Sensor und dem Controller der einzelnen Messknoten. Das Problem der Messfehler wurde mit einem Programm weitgehend behoben, indem der Server diese aussortiert. Da das Problem jedoch nur selten (ca. 1 von 10.000 Messwerten) auftrat und die Detektion sehr aufwändig ist, ist anzunehmen, dass weiterhin die Möglichkeit von einzelnen Datenfehlern besteht, die noch nicht identifiziert wurden.

4.4.2. Erkenntnisse

Neben den drei genannten Problemen, wurden im Praxistest vor allem die folgenden positiven Erfahrungen gemacht bzw. Erkenntnisse unter anderem hinsichtlich der oben genannten wichtigen Grundlagen für die Entwicklung des Messsystems (siehe Kapitel 4.1.) erlangt:

- **Niedrige Kosten:** die einfachen, kostengünstigen Komponenten der Messtechnik reichen für die Erfassung der Immissionen aus.
- **Einfache Handhabung:** einfacher Aufbau, Inbetriebnahme und Bedienung des Systems.
- **Durchgängiger Einsatz des Systems:** permanente Messungen.
- **Verwertbare Ergebnisse.**

Niedrige Kosten: Eines der Hauptziele war es, ein günstiges System zu entwickeln. Jeder Messknoten benötigt Hardware inkl. Sensoren für etwa 200€. Dieser Betrag kann bei einer größeren Charge sicherlich noch reduziert werden. Insgesamt 6 Messknoten und ein zentraler Koordinator (eine zentrale Verbindung zwischen dem Zigbee Funknetz und der Auswerteeinheit) stellen hier eine sinnvolle Systemkonstellation dar. Zusätzlich wird ein einfacher Rechner als Server benötigt. Aufwändiger und teurer sind die Entwicklung und die Kalibrierung der Messtechnik, um sie belastbar und kommerziell einzusetzen. Auch dieser Kostenpunkt kann mit einer steigenden Stückzahl der produzierten Geräte reduziert werden. Damit liegt ein realistischer Preis für ein System bei ca. 5.000 €, wenn eine Überwachung innerstädtischer Baustellen notwendig wird und entsprechende Geräte in einer größeren Anzahl gefertigt werden.

Einfache Handhabung: Das System kann vor Ort auf der Baustelle sehr zügig aufgebaut werden. Für die Installation eines Messknotens mit Erdschraube wird etwa eine halbe Stunde benötigt. Der Aufbau des Gesamtsystems inklusive dem Aufbau und der Installation des Servers kann an einem halben Arbeitstag erfolgen. Das System kann vom Baustellenpersonal selbst aufgebaut werden und es wird kein ausgebildeter Messtechniker benötigt. Für die Inbetriebnahme muss jeder Messknoten lediglich per Schlüsselschalter aktiviert werden und sobald der Rechner mit dem in Labview erstellten Programm zur Datenerfassung läuft, erfolgt alles automatisiert. So ist auch die Bedienung des Systems über den Messablauf hinweg sehr einfach, da das System alle Grundfunktionen selbst übernimmt. Während den Messungen kann der Maschinenführer auf einem Tablet die für ihn wichtigen Sensoren mit einfachen Befehlen zuschalten. Lediglich für die Analyse der Messungen sind besondere Kenntnisse nötig, die jedoch innerhalb einer kurzen Einarbeitungszeit vermittelt werden können. Alle Teile des Systems sind in der Ausführung des Prototyps sehr robust, sodass auch Zusammenstöße während der Messungen auf Rück-/Baustellen nur zu geringen Schäden an dem System führten.

Durchgängiger Einsatz des Systems: Das System erlaubt mit den oben genannten Einschränkungen eine dauerhafte und permanente Erfassung von Immissionswerten. Das System wurde mit 6 Sensoren über 8 Tage erfolgreich getestet. Bei 10 Sensoren kam es dagegen zu den oben genannten Problemen (siehe 4.4.1.).

Verwertbare Ergebnisse: Die Versuche aus Kapitel 2.2. und weitere Vorversuche und Untersuchungen zeigten, dass das prototypische Immissionserfassungssystem funktioniert und verwertbare Ergebnisse für die Abschätzung von Lärm-, Staub- und Erschütterungsimmissionen liefert.

4.4.3. Fazit

Das Immissionserfassungssystem ist im jetzigen Zustand ein Prototyp, der unter definierten Bedingungen einsatzfähig ist. Allerdings bestehen noch die genannten Probleme (siehe Kapitel 4.4.1.), die für den regelmäßigen Einsatz unter realen Bedingungen behoben werden müssen. Es konnte allerdings der Nutzen und die prinzipielle Verwendbarkeit (siehe Kapitel 4.4.2.) des Systems gezeigt werden. Somit wurde mit dem Prototypen ein funktionales und erweiterbares Grundsystem geschaffen, auf dem aufbauend ein kommerzielles System entwickelt werden kann. Um aus dem Prototyp ein allgemein einsatzfähiges System zu machen, ist noch einige Arbeit notwendig. Die letzte Entwicklungsstufe des Systems sollte in der Industrie erfolgen, für die dieses System interessant wird, wenn die unter Kapitel 5.2.2. genannten Maßnahmen in Zukunft umgesetzt werden.

5. Hineintragen der Ergebnisse in die Praxis

Die Ergebnisse des Forschungsprojekts wurden relevanten Akteuren in der Praxis (Bauherr, Planungsingenieur und Abbruchunternehmer) sowie Interessierten aus Wissenschaft und Forschung vorgestellt. Die Ergebnisverbreitung zielte darauf ab, einen größeren Interessentenkreis für die Problematik zu gewinnen und die Integration der im Rahmen des Forschungsprojekts erarbeiteten Ergebnisse in der Praxis anzustoßen. Im Folgenden werden die einzelnen Beiträge zur Ergebnisverbreitung näher beschrieben.

5.1. Beitrag zur Erreichung des übergeordneten Projektziels

Übergeordnetes Ziel des Forschungsprojekts war die **(1.) Analyse der Einflussfaktoren** von Lärm-, Staub- und Erschütterungsemissionen und -immissionen bei Abbruchvorgängen und die **(2.) Integration des Immissionsschutzes in den Projektablauf** (siehe Kapitel 1.2.). Das zur Zielerreichung entwickelte Gesamtkonzept für die Rückbauplanung vom Objekt über die Planung zur Abbruchdurchführung (Abbildung 3) wurde im Rahmen des Projekts durch die Entwicklung und Erstellung der drei Instrumente,

1. der Datenbank,
2. dem prototypischen IT-basiertem Planungsunterstützungswerkzeug und
3. dem prototypischen Immissionserfassungssystem

erfolgreich umgesetzt.

Alle drei Instrumente tragen jeweils zu beiden Komponenten (1. Analyse der Einflussfaktoren und 2. Integration des Immissionsschutzes) des übergeordneten Ziels bei: Die Datenbank und das Planungsunterstützungswerkzeug bauen zum einen auf der **Analyse der Einflussfaktoren** von Lärm-, Staub- und Erschütterungsemissionen und –immissionen bei Abbruchvorgängen auf und können für eine vorab Analyse dieser Faktoren bei Abbruchprojekten eingesetzt werden. Durch die beiden Instrumente wird **der Immissionsschutz** zielgerichtet und effektiver in die Planungsphase von Rückbauprojekten **integriert**. Das Immissionserfassungssystem ermöglicht durch das Messen, Dokumentieren und die Auswertung der realen relevanten Immissionen **die Analyse der Einflussfaktoren** von Lärm-, Staub- und Erschütterungsemissionen und -immissionen bei Abbruchvorgängen während der Ausführung sowie in der Nachbereitung von Abbrucharbeiten. Durch das System wird **der Immissionsschutz** besser in die Durchführungs- und in die Nachbereitungsphase von Rückbauprojekten **integriert**.

5.2. Beitrag zur Zielerreichung und praktischer Nutzen – Integration des Immissionsschutzes

Durch vermehrte Abbruchaktivitäten in Innenstädten und steigendes Bewusstsein der Bevölkerung für schädliche Umwelteinflüsse nimmt für den Bauherren, die Planungsingenieure, Abbruchunternehmer und Behörden die Notwendigkeit zu, Immissionen, wie Lärm, Staub und Erschütterungen, bei Abbrucharbeiten zu berücksichtigen und zu kontrollieren. Hierbei können die entwickelten Instrumente, wie in Abbildung 29 (Kühlen et al. 2015) dargestellt, in Zukunft die Akteure in den einzelnen Phasen des Abbruchprojekts unterstützen.

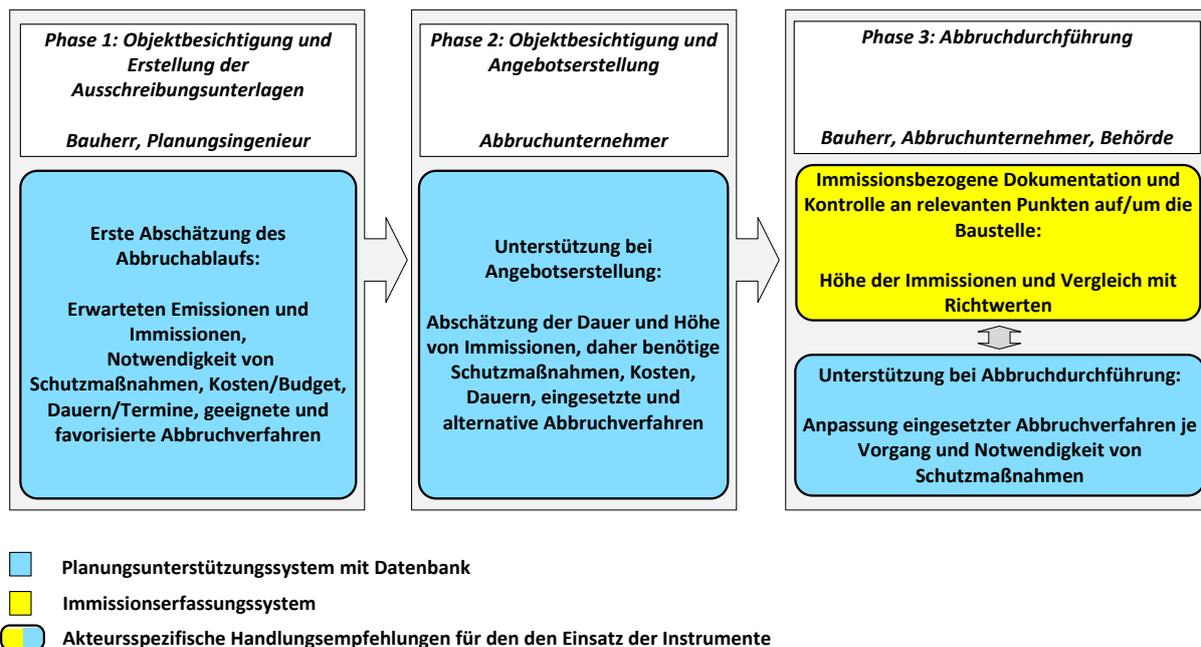


Abbildung 29: Nutzen der Instrumente in den einzelnen Phasen eines Abbruchprojekts²⁵

5.2.1. Planungsunterstützungswerkzeug mit Datenbank

Mit dem IT-basierten Planungswerkzeug mit Datenbank, das in diesem Forschungsprojekt prototypisch erstellt wurde, können die betroffenen Akteure, wie Bauherr, Planungsingenieure und Abbruchunternehmen, in Zukunft bei der Planung und Bewertung von Abbrucharbeiten insbesondere hinsichtlich der Minderung von lokalen Umweltwirkungen unterstützt werden. Durch die Wahl von adäquaten Abbruchtechniken, wie sie durch das Planungswerkzeug vorgeschlagen werden, können die Immissionen auf die lokale Umwelt entscheidend gemindert werden. Der Vorschlag des Planungsunterstützungswerkzeugs kann vom Bauherren und Planungsingenieur für emissions- und immissionsbedingte Rahmenbedingungen für eine erste Abschätzung des Abbruchablaufs in der Ausschreibung (Abbildung 29, links) und vom Abbruchunternehmer für emissions- und immissionsbedingte Spezifikationen im Angebot herangezogen werden (Abbildung 29, Mitte). Der Vorschlag enthält bspw. spezifische Abbruchverfahren, eine Abschätzung der Höhe und des zeitlichen Verlaufs von Lärm-, Staub- und Erschütterungsimmissionen sowie die Kosten für Maschinen und Personal des Abbruchs. Weiter könnte das Werkzeug den Abbruchunternehmer während der Abbruchdurchführung durch Vorschläge zur Anpassung eingesetzter Abbruchverfahren unterstützen (Abbildung 29, rechts).

Da auch technische und ökonomische Kriterien neben den lokalen Umweltwirkungen (ökologischen Kriterien) bei der Wahl geeigneter Abbruchtechniken berücksichtigt werden können, erlaubt das Planungsunterstützungswerkzeug die Umsetzung von Prinzipien des Nachhaltigen Bauens bei der Abbruchplanung. Der Abbruchprozess allgemein und insbesondere die dabei möglichen Einwirkungen auf die lokale Umwelt werden in den derzeitigen Nachhaltigkeitsbetrachtungen noch wenig thematisiert.

5.2.2. Maßnahmen zur Einführung des Immissionserfassungssystems

Mit dem Immissionserfassungssystem können die Immissionshöhen vor Ort auf der Baustelle an relevanten Punkten während der Abbruchdurchführung erfasst werden (Abbildung 29, rechts). Auf diese Weise lassen sich die Belastungen für die Anwohner bspw. durch den Bauherren, den Abbruch-

²⁵ Kühlen et al. 2015.

unternehmer oder Behörden kontrollieren und in Folge dessen begrenzen. In diesem Zusammenhang ist es jedoch wichtig, zu erwähnen, dass es aktuell in der Regel nicht möglich ist eine Abbruchbaustelle mit Nachbarbebauung unter Einhaltung der Richtwerte und mit einem bezahlbaren Aufwand durchzuführen. Eine Einführung des Immissionserfassungssystems würde somit zunächst dazu führen, dass Abbrucharbeiten in Städten nahezu unmöglich gemacht werden. Daher müssen in diesem Zusammenhang dringend angepasste Regelungen geschaffen werden. Denn der aktuelle Zustand, dass eine Einhaltung der Grenz-/Richtwerte in der Regel nicht möglich ist, wird sich nicht durch eine Verschärfung der jetzt schon nicht einhaltbaren Richtwerte verbessern. Der einzige Weg einen höheren Immissionsschutz neben der Planung auch bei der Durchführung von Rückbauarbeiten zu garantieren, ist die Einführung erfüllbarer Richtlinien mit einer effektiven Kontrolle deren Einhaltung. Für diesen Lösungsweg zur Integration des Immissionsschutzes in der Durchführungsphase werden **zwei grundsätzliche Änderungen der Verordnungen** und **ein Werkzeug** benötigt.

1. Verordnungen müssen einen effektiven, maschinellen Rückbau erlauben. Dies erfordert eine Anpassung derzeitiger Verordnungen. Zunächst bietet sich hierbei die Möglichkeit an, dass Grenz-/Richtwerte zum Immissionsschutz für kurzzeitige Maßnahmen angepasst werden können. So sollte auf Antrag, beispielsweise der reguläre maximale Schallpegel für den Abbruch eines Wohnhauses z.B. für eine Woche um 10-20 dB(A) erhöht werden können. Der genaue Wert der Erhöhung sollte durch eine entsprechende Untersuchung gefunden werden. Zusätzlich sollten Vorbelastungen in die Bewertung mit einfließen. Sind die Grenzwerte z.B. in der Innenstadt bereits durch alltägliche Belastungen übertroffen, so müsste die temporäre Erhöhung der Immissionen auf den Ausgangswert bezogen angepasst werden. Die Erhöhung wäre dann beispielsweise auf die realen Bedingungen anzurechnen. Außerdem könnte gemeinsam mit den Anwohnern ein Zeitfenster (z.B. 8-12h) gefunden werden, in denen Immissionsüberschreitungen akzeptiert werden. In diesem Zeitraum bestünde dann die Möglichkeit, die lärmintensiven Arbeiten durchzuführen. Insgesamt muss erreicht werden, dass durch eine vernünftige und flexible Regelung die nötigen Arbeiten durchgeführt werden können und dabei aber der Schutz der Anwohner sichergestellt werden kann.

2. Der Bauherr muss stärker in den Immissionsschutz während der Durchführungsphase (zusätzlich zur Planungsphase) eingebunden werden und seine Verantwortung wahrnehmen. Eine Übergabe der Überwachungspflichten an den Abbruchunternehmer beispielsweise durch den Satz bei der Auftragsvergabe: "Der Auftragnehmer sorgt für die Einhaltung des Immissionsschutzes während der Rückbauarbeiten", muss verhindert werden. Eine Möglichkeit dafür wäre die Erstellung und Einreichung eines Immissionsschutzgutachtens/-konzeptes durch den Bauherrn zusammen mit den Planungsunterlagen. Eine weitere Möglichkeit wäre die zwangsweise Integration eines Fachberaters für Abbruch/Immissionsschutz durch den Bauherrn. Insgesamt muss die Planung und Überwachung des Immissionsschutzes stärker in den Verantwortungsbereich des Bauherrn treten. Alle diese Maßnahmen sollten aber erst ab einer gewissen Gebäudegröße bzw. Komplexität nötig sein.

3. Um den Nutzen und die Wirkung der beiden oberen Punkte zu bewerten, wird immer ein Werkzeug wie das hier prototypisch entwickelte Immissionserfassungssystem benötigt, das die auftretenden Immissionen erfasst und dokumentiert. Ohne diese Überwachung würde ein Verstoß gegen Grenzwerte nicht bemerkt und nicht geahndet. Diese Situation ist aktuell die Regel bei Abbrucharbeiten. Werden Immissionen nicht gemessen und abgeglichen, ist eine Einhaltung der Grenzwerte zufällig und auch unwahrscheinlich, da Maßnahmen zur Minderung der Lärm-, Staub- und Erschütterungsmissionen zusätzliche Kosten verursachen und daher im Zweifel nicht eingesetzt werden.

5.3. Akteurspezifische Handlungsempfehlungen

Um zukünftig die Emissionen (Lärm, Staub und Erschütterungen) beim Abbruch von Gebäuden sowie die damit verbundenen Immissionen auf Mensch und Umwelt zu vermindern, besteht dringender Handlungsbedarf den Immissionsschutz als integralen Bestandteil in den beiden Phasen Abbruchpla-

nung und -durchführung zu etablieren. In Abbildung 30 sind die wesentlichen Handlungs- und Entscheidungsabläufe in den beiden Phasen schematisch dargestellt.

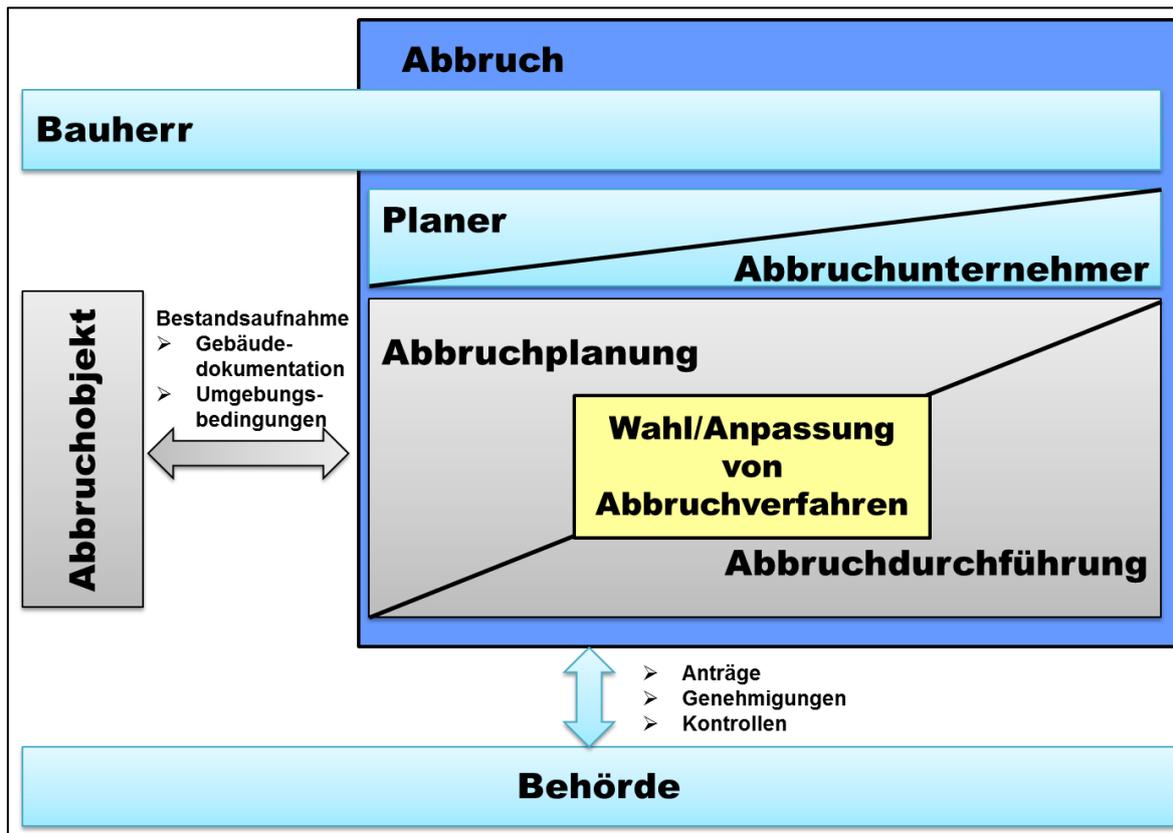


Abbildung 30: Übersicht über die wesentlichen Handlungs- und Entscheidungsabläufe bei der Planung und Durchführung einer Rückbaumaßnahme

Wie aus der Abbildung ersichtlich, sind die relevanten Akteure, die hier handeln und Entscheidungen treffen, der Bauherr, Planer/Planungsingenieure, Abbruchunternehmer/Bauunternehmer und Behördenvertreter. Daher wurden genau für diese Akteure Handlungsempfehlungen für die Integration des Immissionsschutzes in der Planungs- und Durchführungsphase entwickelt. Diese akteurspezifischen Handlungsempfehlungen werden im Folgenden beschrieben.

Vorangestellt wird, dass der Bauherr generell die Gesamtverantwortung einer Abbruchmaßnahme trägt. Unter Beachtung der vom Deutschen Abbruchverband herausgegebenen Checkliste hinsichtlich der Aufgaben und Verantwortung des Bauherrn beim Abbruch baulicher Anlagen (DA (2013)) werden nachfolgend weitergehende akteurspezifische Empfehlungen gegeben.

5.3.1. Allgemeine Empfehlungen

Um die bei der Durchführung entstehenden Emissionen und Immissionen frühzeitig berücksichtigen zu können, ist es wichtig, den Immissionsschutz von Beginn an in die Planung zu integrieren. Dies kann beispielsweise durch die Wahl adäquater Abbruchverfahren/-techniken erfolgen. Zusätzlich kann durch den Einsatz von technischen Schutzmaßnahmen an der Quelle, auf dem Ausbreitungsweg sowie am Schutzgut die Höhe der zu erwartenden Immissionen stark reduziert werden. Darüber hinaus sind auch organisatorische Maßnahmen wichtig, wie eine frühzeitige Information (und zukünftig sogar ein frühzeitige Einbindung) der Nachbarschaft. Wie nachfolgend empfohlen, sollte der Funktionsumfang/das Arbeitsfeld des Sicherheits- und Gesundheitsschutzkoordinators (SiGeKo) um die Fachkenntnisse zum Immissionsschutz erweitert werden, so dass er auch hier beratend Einfluss nehmen kann. Damit wird sichergestellt, dass spezifische Immissionsschutzvorgaben eingehalten werden.

5.3.2. Handlungsempfehlungen für Bauherren und Planungsingenieure

Empfehlungen für die Planungsphase

Der Bauherr ist verantwortlich, dass frühzeitig, d.h. von Beginn der Rückbauplanung an, Maßnahmen für den Immissionsschutz integriert werden und somit ihren Niederschlag in den Ausschreibungen haben. Soweit der Bauherr diesbezüglich nicht über eine eigene Fachkunde verfügt - und das ist die Regel -, sind leistungsfähige und zuverlässige Fachkundige (Fachplaner/Planungsingenieur) mit der Planung der Abbruchmaßnahme und mit der Erstellung der Ausschreibungsunterlagen/Leistungsbeschreibung zu beauftragen. Die Fachkenntnisse über die der Planer verfügen sollte, sind in der VDI 6210 E aufgeführt. Es wird generell empfohlen, einen weiteren unabhängigen Fachmann mit der Überwachung/der Integration des Immissionsschutzes zu beauftragen, der der Verantwortung des Bauherrn in diesen Fragen gerecht wird. Hierzu könnte zum Beispiel der Funktionsumfang eines SiGeKo erhöht werden (siehe 5.3.1.).

Für die Erarbeitung der Leistungsbeschreibung sind Kenntnisse über die Gebäudeeigenschaften (Bauart/-weise, Material, Bauteildicke, Bauteilmasse, Anzahl der Geschosse und die Gebäudehöhe) sowie den angrenzenden Umgebungsbedingungen (Platzverhältnisse, Nachbarbebauung, Einstufung des bebauten Umfeldes gemäß TA Lärm – Industrie-, Gewerbe-, Dorf- und Misch- sowie Kurgebiete) von grundlegender Bedeutung. Hier kann in Zukunft **ein Planungsunterstützungswerkzeug, wie es im Forschungsprojekt prototypisch entwickelt wurde**, Hilfestellung geben. Mit dem Werkzeug kann beispielsweise sichergestellt werden, dass entsprechend notwendige Informationen (z.B. emissionsrelevante Gebäudeeigenschaften, immissionsrelevante Umgebungsbedingungen, die Wahl eines geeigneten Abbruchverfahrens in Abhängigkeit von Gebäude- und Umgebungseigenschaften und mögliche Schutzmaßnahmen) eingeholt und bei der Vorabplanung und Erstellung der Leistungsbeschreibung berücksichtigt/integriert werden. Entsprechende Auskünfte und Informationen können beispielsweise bei dem Eigentümer (der oft auch der Bauherr selbst ist) und bei der zuständigen Baubehörde eingeholt werden. Außerdem ist eine eingehende Vorortbesichtigung zur Aufnahme des Abbruchobjekts und den Umgebungsbedingungen zu empfehlen. Es sollte auch ein Gutachten erstellt werden, welches die Immissionssituation beschreibt und das dem Bau-/Abbruchartrag beigelegt wird. Sollten sich aus diesen Erkenntnissen zwingend anzuwendende Schutzmaßnahmen zur Verminderung bzw. Eindämmung von Lärm-, Staub- und Erschütterungsemissionen ergeben, sind diese als „Besondere Leistungen“ oder besser als reguläre eigenständige Leistung in einer ausführlichen Leistungsbeschreibung anzugeben. Dadurch kann das Risiko von Nachträgen, die aufgrund von zusätzlichem Arbeits- und Zeitaufwand unumgänglich zu höheren Kosten führen, verringert werden. Bauherren der öffentlichen Hand sollten diesbezüglich eine Vorreiterrolle einnehmen. Insbesondere kann durch eine Aufnahme des Immissionsschutzes in die Leistungsbeschreibung verhindert werden, dass derjenige, der diese einfach ignoriert, gegenüber Konkurrenten einen Vorteil bei der Auftragsvergabe hat.

Bei der Auftragsvergabe wird angeraten, sich von dem zu beauftragenden Abbruchunternehmen den Nachweis einer ausreichenden Sachkunde und Erfahrungen auf den Gebieten Arbeitsschutz, Immissionsschutz, der Unfallverhütungsvorschriften sowie der ordnungsgemäßen Beseitigung von Bauschutt belegen zu lassen. Eine neutrale Beurteilung der fachlichen Eignung und Qualifikation eines Abbruchunternehmens geht z.B. aus der Zertifizierung nach dem RAL Gütezeichen Abbrucharbeiten (RAL-GZ 509) (Abbildung 31) hervor.



Abbildung 31: RAL Gütezeichen Abbrucharbeiten²⁶

Empfehlungen für die Durchführungsphase

Obwohl der ausführende Akteur dieser Phase der Abbruchunternehmer ist, obliegt während der Durchführungsphase die Verantwortung, speziell die Überwachungsverantwortung dem Bauherrn bzw. dem Fachplaner/Planungsingenieur. Aus diesem Grund wird die Kontrolle der Ausführung, insbesondere die Einhaltung des Immissions- und Arbeitsschutzes seitens des Bauherrn dringend empfohlen. Hier kann in Zukunft **ein Immissionserfassungssystem, wie es im Forschungsprojekt prototypisch erstellt** wurde, vom Bauherrn zur Dokumentation und Kontrolle auf der Baustelle eingesetzt werden. Der SiGeKo (wie unter 5.3.1 und 5.3.2 empfohlen) kann hierbei seine Fachkompetenz einbringen und den Bauherren entsprechend beraten.

5.3.3. Handlungsempfehlungen für Bau- und Abbruchunternehmer

Empfehlungen für die Planungsphase

Der Bau-/Abbruchunternehmer trägt dem Immissionsschutz durch die Wahl geeigneter, emissionsarmer Abbruchverfahren/-techniken Rechnung. In Zukunft kann auch hier ein **Planungsunterstützungswerkzeug, wie es prototypisch entwickelt** wurde, den Bau-/Abbruchunternehmer bei der Wahl geeigneter Abbruchverfahren/-techniken gemäß den Vorgaben der Leistungsbeschreibung unterstützen. Verfügt der Abbruchunternehmer nicht über die entsprechenden Ressourcen (Maschinen, Geräte, usw.) sind adäquate Möglichkeiten, wie z.B. die Anmietung oder Unterauftragserteilung auszuschöpfen. Da die Gebäudeeigenschaften sowie das direkt angrenzende Umfeld einen wesentlichen Einfluss auf die Auswahl der Abbruchverfahren nehmen, ist bei Abbruchmaßnahmen vor Angebotsabgabe eine Vorortbesichtigung durch den/die Bieter zu empfehlen. Gleichwohl können bei diesem Termin die notwendigen technischen Schutzmaßnahmen (an der Emissionsquelle, auf dem Ausbreitungsweg und am Schutzgut bzw. durch einen entsprechenden Arbeitsschutz) gewählt werden. Die durch den Bauherren und dessen Planungsingenieur erstellte Leistungsbeschreibung sollte diese Aspekte vorsehen/einen Rahmen dafür bieten.

Empfehlungen für die Durchführungsphase

In erster Linie sollte der Bau-/Abbruchunternehmer die in der Planungsphase ausgewählten geeigneten, emissionsarmen Abbruchverfahren/-techniken in der Durchführungsphase tatsächlich auch einsetzen. Darüber hinaus sind die geplanten technischen Schutzmaßnahmen zu errichten und von einem Beauftragten zu kontrollieren. Das können beispielsweise Vertreter der Behörden oder der SiGeKo sein. Insbesondere beim Nachweis der Einhaltung von Immissionsgrenzwerten gegenüber Behörden und der Nachbarschaft, kann in Zukunft **ein Immissionserfassungssystem**, das wie oben beschrieben vom Bauherrn eingesetzt werden sollte, den Unternehmer unterstützen. Durch die Dokumentation der Immissionsverläufe können unnötige Bauunterbrechungen verhindert werden.

²⁶ Quelle: <http://www.ral.de/>.

Zur Eindämmung von Staubemissionen wird angeraten, bereits vor Beginn der Abbrucharbeiten vorhandene Staubablagerungen – auch wenn sie meist nur einen geringen Anteil an der gesamten Staubentwicklung ausmachen – zu beseitigen (DA (2015), S. 29). Während der Abbrucharbeiten sowie bei der Zerkleinerung und dem Verladen der Bauabfälle sind grundsätzlich die Staubemissionen mit geeigneten Maßnahmen einzudämmen. Folgende Abbildung gibt einen Überblick zu Möglichkeiten der Staubbekämpfung vor und während der Abbrucharbeiten.

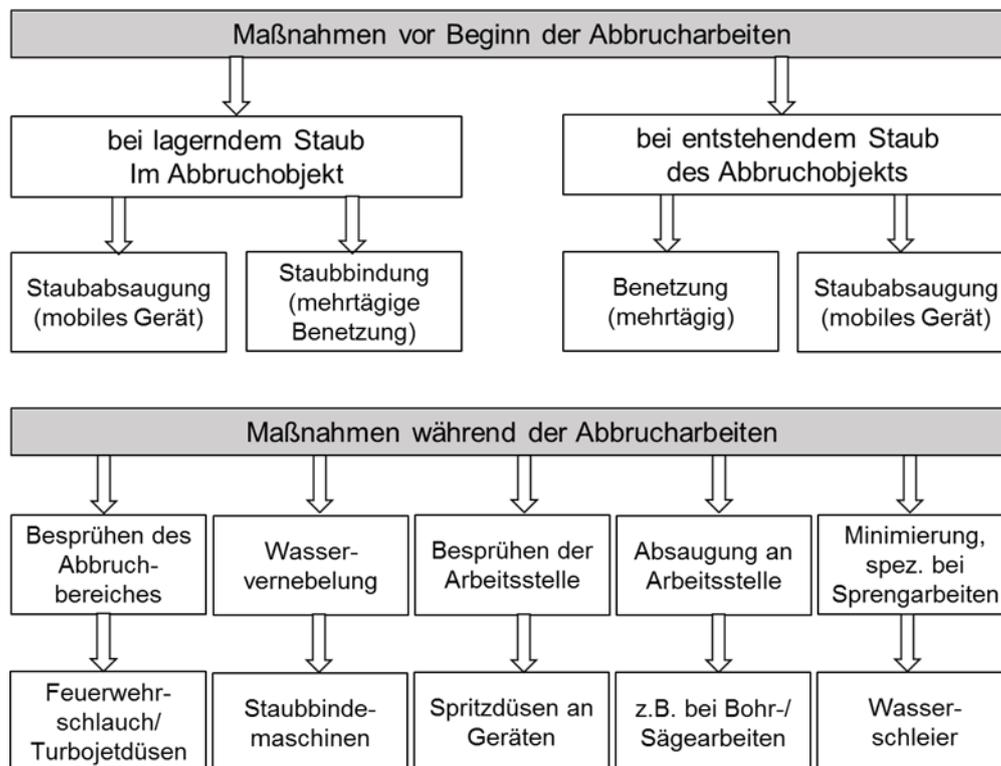


Abbildung 32: Möglichkeiten der Staubbekämpfung bei Abbrucharbeiten²⁷

Zur Begrenzung von Lärmemissionen wird empfohlen, Baugeräte einzusetzen, die den Anforderungen der 32. BImSchV entsprechen, einzusetzen. Nur diese werden dem aktuellen Stand der Technik gerecht. Die Immissionsrichtwerte innerhalb und außerhalb von Gebäuden gemäß TA Lärm sind zwingend einzuhalten (dies erfordert wie unter 5.2.2. näher beschrieben eine Anpassung der derzeitigen Verordnung). Liegen zu schützende Bebauungen in Richtung des Schallausbreitungsweges, sind während der Abbrucharbeiten geeignete Maßnahmen zur Schallabschirmung zu ergreifen.

5.3.4. Handlungsempfehlungen für Behörden

Empfehlungen für die Planungsphase

Notwendig ist, vor Beginn der Abbruchmaßnahme die installierten Schutzmaßnahmen gegen Immissionen zu kontrollieren. **Ein Planungsunterstützungswerkzeug, wie es hier prototypisch entwickelt wurde**, kann der Behörde in Zukunft helfen, die „kritischen“ Situationen/Abbruchprojekte vorab zu identifizieren. Beispielsweise kann auf Grund der geplanten Abbruchverfahren/-techniken, der Siedlungsstruktur um die Abbruchbaustelle herum und der Nutzungsart der Nachbarschaft das mögliche Ausmaß der Immissionsbelastung (Höhe, Dauer und Bedeutung) abgeschätzt werden. Es wird empfohlen, eine Einschätzung der zu erwartenden Immissionen jedem Abbruchartrag beizulegen, auch wenn der Einschätzung zu entnehmen ist, dass keine bedenklichen Immissionen zu erwarten sind. Geht aus den Planungsunterlagen hervor, dass für die Arbeitnehmer auf der Baustelle als auch für

²⁷ DA (2015), S. 29, Abbildung 1.8.

das angrenzende Umfeld kein ausreichender Schutz existiert, sind behördlicherseits Auflagen zu erteilen. Diese sind dann auch zu kontrollieren.

Empfehlungen für die Durchführungsphase

Die Nichteinhaltung bzw. Verstöße gegen geltendes Recht (z.B. Bundesimmissionsschutzgesetz, Arbeitsschutzgesetz, Baustellenverordnung, usw.) können von der Bauaufsichtsbehörde durch die Festsetzung von Bußgeldern oder durch Baustopp geahndet werden. Dazu wird auch dringend geraten, denn mündliche Verwarnungen erfüllen nur selten ihren angedachten Zweck. Durch regelmäßige Prüfungen und gegebenenfalls Ahndungen der zuständigen Behörde (z.B. Arbeitsschutzbehörde, Untere Bauaufsichtsbehörde) können durch Immissionen verursachte Gefahren für Mensch und Umwelt vermieden werden. Bei der regelmäßigen Prüfung/Kontrolle der Immissionen kann in Zukunft **ein Immissionserfassungssystem, wie es im Projekt prototypisch erstellt wurde**, die Behörden unterstützen.

5.4. Weitere Maßnahmen zur Ergebnisverbreitung

Im Forschungsprojekt wurde bereits mit der Auswahl der Projektpartner der Grundstock für eine überregionale Verbreitung der Ergebnisse gelegt. Von Projektbeginn an wurden die umwelttechnischen Hintergründe und Gegenmaßnahmen zur Abwehr der gesundheitstechnischen Risiken bei Rückbaumaßnahmen in den Vordergrund gestellt. Das zentrale Anliegen bestand darin, nicht nur die theoretischen Grundlagen zusammenzufassen, sondern Fachleute und die Öffentlichkeit für diese Thematik zielgerichtet zu interessieren. So wurden bspw. der Deutsche Abbruchverband (DA) und das Umweltbundesamt (UBA) in das Vorhaben involviert indem im Rahmen von Treffen der Austausch von Erfahrungen und Kenntnissen eingeflossen sind. Die Integration von Vertretern aus Wirtschaft, Behörden und Wissenschaft macht eine zukünftige Umsetzung der Projektergebnisse möglich. Nachfolgend werden weitere wesentliche Aktivitäten zur Ergebnisverbreitung in Anlehnung an die Struktur/Elemente der Ergebnisverbreitungsstrategie aufgeführt.

5.4.1. Veröffentlichung in Fachzeitschriften und Journals

Um die Projektergebnisse an die Fachleute aus der Bau-, Abbruch- und Recyclingindustrie sowie an Wissenschaftler in diesem Forschungsgebiet heranzutragen, erfolgten Veröffentlichung zum Projekt und den Ergebnissen in verschiedenen nationalen und internationalen Fachzeitschriften und Journals. Diese werden im Folgenden gelistet:

Beiträge in nationalen Fachzeitschriften und nationale Berichte

„VDI Technische Sicherheit“ (Fachzeitschrift mit Praxisnähe und hohem Bekanntheitsgrad bei Unternehmen der Bau-/Rückbau- und Recycling-Industrie):

Kühlen, A.; Reinhardt, M.; Schultmann, F.; Haghsheno, S.; Mettke, A. (2015): Verbesserung des Immissionsschutzes bei Abbrucharbeiten durch Planungsunterstützung und Überwachung. Technische Sicherheit. Ausgabe 7/8/2015. Springer-VDI-Verlag GmbH Co. KG, Düsseldorf, S.36-41.

„Abbruch aktuell“ (Fachmagazin und Mitteilungsblatt des Deutschen Abbruchverbandes (DA)):

DA (2014): Online-Umfrage zur Sammlung von Expertenwissen für ein Rückbauplanungswerkzeug zum Immissionsschutz. Ankündigung der Umfrage in „Abbruch aktuell“, Ausgabe 4/2014.

Ein weiterer Beitrag ist für die Ausgabe von „Abbruch aktuell“ im 2. Quartal 2016 geplant.

„BG Bau BauPortal“ (Fachzeitschrift mit Praxisnähe und hohem Bekanntheitsgrad bei Unternehmen der Bau-/Rückbau-Industrie):

BG Bau (2015): Immissionsschutz beim Gebäudeabbruch - Forschungsprojekt: Minimierung von Umweltbelastungen (Lärm, Staub, Erschütterungen) beim Abbruch von Hoch-/Tiefbauten und Schaffung hochwertiger Recyclingmöglichkeiten für Materialien aus Gebäudeabbruch. Fachzeitschrift der Be-

rufgenossenschaft der Bauwirtschaft. Heft 2, 127. Jahrgang, März 2015. ISSN 1866-0207 6693. Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. KG, Berlin, S. 10.

„DBU aktuell“:

DBU (2015): Rückbau von Gebäuden – geräuscharm und umweltfreundlich. Newsletter der Deutschen Bundesstiftung Umwelt. Heft 2, 2015.

Forschungsberichte:

- Kühlen, A.; Stengel, J.; Volk, R.; Schultmann, F.; Reinhardt, M.; Schlick, H.; Haghsheno, S.; Asmus, S.; Mettke, A.; Harzheim, J. (2014): Minimierung von Umweltbelastungen (Lärm, Staub, Erschütterungen) beim Abbruch von Hoch-/Tiefbauten und Schaffung hochwertiger Recyclingmöglichkeiten für Materialien aus Gebäudeabbruch (Phase 2). Endbericht zur 2. Phase des gleichnamigen Forschungsprojekts AZ 29014/02-23, gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, 07.08.2014, 123 S.
- Kühlen, A.; Stengel, J.; Volk, R.; Schultmann, F.; Reinhardt, M.; Schlick, H.; Haghsheno, S.; Asmus, S.; Mettke, A.; Harzheim, J. (2014): Minimierung von Umweltbelastungen (Lärm, Staub, Erschütterungen) beim Abbruch von Hoch-/Tiefbauten und Schaffung hochwertiger Recyclingmöglichkeiten für Materialien aus Gebäudeabbruch (Phase 2). Zwischenbericht zum gleichnamigen Forschungsprojekt AZ 29014/02-23, gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, unveröffentlicht, 101 S.
- Kühlen, A.; Stengel, J.; Volk, R.; Schultmann, F.; Reinhardt, M.; Markus, M.; Schlick, H.; Gentes, S.; Asmus, S.; Mettke, A.; Reis, B.; Görisch, U.; Harzheim, J. (2013): Minimierung von Umweltbelastungen (Lärm, Staub, Erschütterungen) beim Abbruch von Hoch-/Tiefbauten und Schaffung hochwertiger Recyclingmöglichkeiten für Materialien aus Gebäudeabbruch (Phase 1). Endbericht zum gleichnamigen Forschungsprojekt AZ 29014-23, gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, 01.2013, 101 S.

Beiträge in internationalen Tagungsbänden

(Tagungsbände von internationalen Konferenzen aus den Bereichen Bau-, Projekt- und Umweltmanagement)

- Kühlen, A.; Volk, R.; Stengel, J.; Schultmann, F. (2014): Deconstruction Project Planning Considering Local Environmental Impacts. In: Proceedings of the 2014 (5th) International Conference on Engineering, Project and Production Management. 26.-28 November 2014, Port Elizabeth, South Africa, pp. 22-33.
- Reinhardt, M.; Kühlen, A.; Haghsheno, S. (2014): Developing a Pollution Measuring System to Manage Demolition Projects Complying with Legal Regulations. In: Proceedings of the 2014 (5th) International Conference on Engineering, Project and Production Management. 26.-28 November 2014, Port Elizabeth, South Africa, pp. 116-125.
- Kühlen, A.; Drogemüller, R.; Schultmann, F. (2013): What Information is Necessary to Assess the Environmental Impacts of Deconstruction? In: Proceedings of 30th CIB W78 International Conference on Application of IT in the AEC Industry, 9-12 October 2013, Beijing, pp. 306-315.

5.4.2. Projektvorstellungen vor Fachpublikum

Neben Veröffentlichungen, wurden die Ergebnisse auch über die Präsentation des Projekts den Fachleuten aus Wissenschaft und der Bau-, Abbruch- und Recyclingindustrie in Workshops, auf Messen und Konferenzen vorgestellt:

- **Auf dem Symposium "Umweltschutz auf der Baustelle - Wettbewerbsvorteil oder unbezahlter Mehraufwand?"** am 10. März 2015 am Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) in Bonn. Das Karlsruher Institut für Technologie war neben dem BBSR und der Bergischen Universität Wuppertal Mitveranstalter des Symposiums. Die Veranstal-

tung richtete sich an Bauherren, Planer, Bauausführende und Vertreter von Verwaltung und Behörden.

- **Auf der „BAU 2015“**, der Weltleitmesse für Architektur, Materialien und Systeme, vom 19. bis 24.01.2015 in München auf dem DBU-Gemeinschaftsstand zum Thema „Ressourcenschonend und energieeffizient Bauen“.
- **Auf der „5th International Conference on Engineering, Project and Production Management“** vom 26.-28.11.2014 in Port Elizabeth, Südafrika.
- **Auf der „30th CIB W78 International Conference on Application of IT in the AEC Industry“** vom 9.-12.10.2013 in Peking.

Über die Projektpartner wird des Weiteren auf vielfältige Art und Weise in ehrenamtlichen Gremien und regelmäßigen Veranstaltungen über die erzielten Projektergebnisse berichtet, z.B. im AK „Bau- und Bodenabfälle“ der DWA-HA KEK und in den jährlichen Beiträgen anlässlich der Baufachtagungen der Fa. Ecosoil. 2016 sind weitere Vorträge zu dem Thema des Forschungsprojekts geplant, wie auf dem Berlin-Brandenburgischen Recyclingtag in Cottbus am 16.02.2016.

5.4.3. Vorstellung der Systeme bei einzelnen mittelständischen Unternehmen

Neben der Vorstellung des Projekts beim DA und UBA, wurde das Projekt und die Ergebnisse ausgewählten mittelständischen Unternehmen, einem Abbruchunternehmen, zwei Ingenieur-/Planungsbüros, der Gewerbeaufsicht in Freiburg, dem TÜV Hessen und der Hessischen Landesanstalt für Umwelt (HLfU) individuell vorgestellt.

5.4.4. Integration in die Lehre

Darüber hinaus wird das Forschungsthema von den universitären Projektpartnern regelmäßig in die Lehre eingebunden. So wird das Thema in Form von Vorlesungen, Übungen und Abschlussarbeiten an die Studierenden der Studiengänge Bau-, Wirtschafts- und Umweltingenieurwesen vermittelt und somit an die zukünftigen Fachleuten der Bau-, Abbruch- und Recyclingindustrie herangetragen.

Vorlesungen und Übungen:

- „Abbruch und Entsorgung“: Vorlesung und Übungen in den Studiengängen Bauingenieurwesen, Wirtschaftsingenieurwesen und Umweltwissenschaften und Verfahrenstechnik an der BTU.
- „Project Management“: Vorlesung und Übungen im Studiengang Wirtschaftsingenieurwesen am KIT.
- „Schwerpunktmodul 6: Umwelt- und recyclinggerechte Demontage von Bauwerken“ und „Baubetriebstechnik“: Vorlesung und Übungen im Studiengang Bauingenieurwesen am KIT.
- Sommerschools an der Sibirischen Föderalen Universität Krasnojarsk

Weiter wurden durch die Projektpartner diverse Abschlussarbeiten (Diplom-, Bachelor- und Masterarbeiten) zu dem Thema des Forschungsprojekts am KIT und der BTU betreut, deren Ergebnisse zum Teil auch in die Projektergebnisse eingeflossen sind.

Ebenfalls in Verbindung mit dem Forschungsprojekt und aufbauend auf den dort gewonnenen Erkenntnissen wird eine Dissertation verfasst, die kurz vor dem Abschluss steht.

Darüber hinaus wird zur Verbreitung der Projektergebnisse der vorliegende Bericht zum einen über die Webseite der DBU (www.dbu.de) sowie über die Webseiten der Projektpartner (IIP: www.iip.kit.edu/773.php/; DFIU: www.dfiu.kit.edu/258.php/; TMB: www.tmb.kit.edu/957.php ; BTU: <http://www.tu-cottbus.de/fakultaet4/de/altlasten/fachgruppen/bauliches-recycling/downloads-ausgewaehlter-forschungsberichte.html>) für die Öffentlichkeit/Praxis zugänglich gemacht.

6. Fazit

6.1. Zusammenfassung der Ergebnisse

Mit den in diesem Endbericht (sowie den Endberichten der 1. und 2. Phase) dokumentierten Erkenntnisse können der Bauherr, Planer, ausführende Unternehmen und Behörden zu Fragen und Herausforderungen des Immissionsschutzes bei Abbruchprojekten umfassende Antworten finden. Außerdem wurden Lösungsansätze für eine zukünftige Integration des Immissionsschutzes in die Planungs- und Durchführungsphase in Form von drei Instrumenten erarbeitet:

1. eine Datenbank mit ökonomischen, ökologischen und technischen Kennwerten für die Planung des Abbruchprozesses.
2. ein prototypisches IT-basiertes Planungsunterstützungswerkzeug, das auf die Datenbank zugreift.
3. ein prototypisches Immissionserfassungssystem, zur permanenten Immissionsüberwachung.

Die Instrumente wurden in Teilen in den beiden vorherigen Projektphasen bearbeitet und in der 3. Phase wie folgt vervollständigt und abgeschlossen:

Die Datenbank konnte um Daten zum Ressourceneinsatz und Bewertung der Wirtschaftlichkeit, zu Schutzmaßnahmen, zu Emissionsabnahmeeffekten abhängig vom Umfeld des Abbruchobjekts erweitert werden. Eingeflossen sind zudem Erkenntnisse aus **Expertenbefragungen** und **Immissionsmessungen unter Versuchsbedingungen**.

Das prototypische IT-basierte Planungsunterstützungswerkzeug konnte ebenfalls um die Bereiche der Datenbankerweiterung ausgebaut werden. Weiter wurde das Werkzeug mittels der Planung eines realen Abbruchvorhabens getestet.

Das prototypische Immissionserfassungssystem wurde um ein Programm zur Auswertung der Immissionen ergänzt und umfassend für Abbrucharbeiten unter Versuchs- und Praxisbedingungen getestet.

Zur Übertragung der Forschungsergebnisse in die Praxis und zur Sensibilisierung relevanter Akteure für das Thema des Immissionsschutzes bei Abbrucharbeiten wurden **zum einen diverse Aktivitäten zur Ergebnisverbreitung** umgesetzt und **zum anderen akteurspezifische Handlungsempfehlungen** erstellt.

Aufbauend auf den Endberichten der ersten beiden Phasen **enthält** der vorliegende Endbericht alle finalen Projektergebnisse.

6.2. Ausblick

Um in Zukunft für die meist mittelständisch organisierten Unternehmen, Behörden und Bürger einen reibungslosen, ordnungsgemäßen und rechtskonformen Ablauf von Rückbaumaßnahmen zu ermöglichen, ist die **Sicherstellung der Einhaltung von Immissionsgrenzwerten** zur Minderung von Konfliktpotenzialen unerlässlich. Die Berücksichtigung dieser Immissionen als integraler Bestandteil in Planung und Durchführung von Abbrucharbeiten **erfordert in erster Linie eine Verankerung des Immissionsschutzes in der Ausschreibung**. Hier wären nicht nur technische Anforderungen sondern auch immissionsschutzrelevante Anforderungen im Detail zu spezifizieren, wie die Angabe von geeigneten und favorisierten Abbruchverfahren bezugnehmend auf die Minderung der relevanten Emission(en) und die Notwendigkeit von Schutzmaßnahmen zur Minderung der Immissionen. Insbesondere der öffentliche Bauherr sollte hierbei eine Vorreiterrolle einnehmen und seine Ausschreibungen entsprechend ergänzen/anpassen. Hierzu können die im Rahmen des Projekts erlangten und dokumentierten Erkenntnisse herangezogen werden.

Weiter wäre es erstrebenswert **in Zukunft Instrumente** für die Planung und Durchführung von Abbrucharbeiten, so wie sie im Projekt prototypisch erstellt wurden, **einzusetzen**. Sowohl das Planungsunterstützungswerkzeug mit Datenbank als auch das Immissionserfassungssystem sind aktuell prototypisch umgesetzt. Die Eignung beider Systeme zur Lösung der Problemstellung konnte nachgewiesen werden, allerdings bedarf es zur Weiterentwicklung der Systeme hinsichtlich der Praxistauglichkeit noch weiterer Anstrengungen. Die größten Herausforderungen sind hier die Steigerung der Nachfrage nach solchen Instrumenten und das Finden von Partnern mit denen die Systeme weiterentwickelt werden können. Erst wenn gefordert wird, dass Immissionen in Leistungsbeschreibungen zu integrieren sind, wird die Nachfrage nach solchen Instrumenten akut. Die Grundlagen dafür sind im Rahmen des vorliegenden Projektes gelegt. Wenn zukünftig die **Nachfrage/der Markt** für solche Instrumente vorhanden ist, können die Instrumente unter Einbindung der Forschungspartner und zusammen mit Partnern aus der Praxis **hin zu konventionellen Lösungen weiterentwickelt werden**. Und es kann eine **Überführung aus dem Bereich der universitären Forschung heraus in die Praxis** erfolgen.

Danksagung

Das diesem Bericht zugrunde liegende Forschungsprojekt wurde von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) gefördert. Wir bedanken uns auch herzlich bei unserem Kooperationspartner aus der Praxis, der Jean Harzheim GmbH & Co. KG, und anderen Praxispartnern für die wertvolle Unterstützung, wie dem Deutschen Abbruchverband e. V. (DA), dem Umweltbundesamt (UBA), der Gewerbeaufsicht in Freiburg, dem TÜV Hessen und der Hessischen Landesanstalt für Umwelt (HLfU).

Literaturverzeichnis

- ABW (Aufbereitung von Baustoffen und Wiederverwertung e.V.) (2012): Vorlesung C/Kapitel 6 Abbruchverfahren. Online unter:http://www.uni-weimar.de/Bauing/aufber/Lehre/Wintersemester/ModulC_Abbruch_Rueckbau/WS_12_13/neu_Prof/6_Abbruchverfahren_ABW.pdf. Abgerufen am: 06.11.2013.
- BG Bau (2015): Frequenzbewertung, Spitzen- und Dauerschallpegel. Online unter: <http://www.bgbau.de/praev/fachinformationen/gesundheitschutz/laerm/pegel>. Abgerufen am 17.12.2015.
- BGL (2007): Baugeräteliste. Hauptverband der Deutschen Bauindustrie (Herausgeber). Oktober 2007.
- BKK (2012): Glossar. Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe. Online unter: http://www.bbk.bund.de/DE/Servicefunktionen/Glossar/_function/glossar. Abgerufen am: 17.12.2012.
- BMWFI (2013). Technische Grundlage zur Beurteilung diffuser Staubemissionen, Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend.
- DA (Deutscher Abbruchverband) (2015): Abbrucharbeiten - Grundlagen, Planung, Durchführung. Deutscher Abbruchverband e.V. (Hrsg). 3. aktualisierte und erweiterte Auflage 2015, Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH & Co. KG, Köln, 2015.
- DA (Deutscher Abbruchverband) (2013): Checklisten und Handlungsanleitungen. Online unter: <http://www.deutscher-abbruchverband.de/index.php?page=vorlagen-und-checklisten>. Abgerufen am: 13.12.2013.
- EK-SMU (1998): Konzept Nachhaltigkeit - Vom Leitbild zur Umsetzung. Abschlussbericht der Enquete-Kommission - Schutz des Menschen und der Umwelt, Bonn, 1998.
- EK-SMU (Hrsg.); Paschen, H.; Kohler, N.; Hassler, U. (1999): Stoffströme und Kosten in den Bereichen Bauen und Wohnen, Springer-Verlag, Heidelberg, 1999.
- Girmsheid und Motzko (2013): Kalkulation, Preisbildung und Controlling in der Bauwirtschaft. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, ISBN 978-3-642-36636-9, 2013.
- Görg, H. (2001): Bauen für den Umweltschutz: Es gibt viel zu tun – nur wissen wir nicht wann! Altlasten Spektrum 3/2001, S. 152-153.
- Grünthal, G. (1998): European Macroseismic Scale 1998 (EMS-98). Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie 15, Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Luxembourg, 99 pp., 1998.
- Haltenorth, I.; Weber, L.; Leistner, P.; Mehra, S.-R. (2007): Neuartige Maßnahmen zur Minderung von Baulärm – Systeme, Methoden, Wirkungen. Forschungsbericht FZKA-BWPLUS. Universität Stuttgart, Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart, 28. Februar 2007.
- HAZUS (2003): National Institute of Building Sciences and Federal Emergency Management Agency, 2003. Multi-hazard Loss Estimation Methodology, Earthquake Model, HAZUS®MH Technical Manual, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, 2003.
- Kamrath und Hechler (2011): On the sustainability of deconstruction and recycling: A closer view to end-of-lifetime measures. Bauingenieur, 86, Juni 2011, pp. 269-280.

Klauß, S.; Kirchhof, W.; Gissel, J. (2009): Katalog regionaltypischer Materialien im Gebäudebestand mit Bezug auf die Baualtersklassen und Ableitung typischer Bauteilaufbauten. ZBU, Kassel, Oktober, 2009.

Kühlen, A.; Reinhardt, M.; Schultmann, F.; Haghsheno, S.; Mettke, A. (2015): Verbesserung des Immissions-schutzes bei Abbrucharbeiten durch Planungsunterstützung und Überwachung. Technische Sicherheit. Ausgabe 7/8/2015. Springer-VDI-Verlag GmbH Co. KG, Düsseldorf, S.36-41.

Kühlen, A.; Stengel, J.; Volk, R.; Schultmann, F.; Reinhardt, M.; Schlick, H.; Haghsheno, S.; Asmus, S.; Mettke, A.; Harzheim, J. (2014): Minimierung von Umweltbelastungen (Lärm, Staub, Erschütterungen) beim Abbruch von Hoch-/Tiefbauten und Schaffung hochwertiger Recyclingmöglichkeiten für Materialien aus Gebäudeabbruch (Phase 2). Endbericht zur 2. Phase des gleichnamigen Forschungsprojekts AZ 29014/02-23, gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, 07.08.2014, 123 S.

Kummer, M. (2013): Konzept zum Umgang mit Baustellenlärm in der Bauaufsicht Frankfurt. 18.03.2013. Online unter: http://www.bauaufsicht-frankfurt.de/fileadmin/Downloads__alle/Sonstige/Konzept_Baulaerm_18.03.2013.pdf. Abgerufen am: 03.12.2013.

Leimböck, E.; Klaus, U. R.; Hölckermann, O. (2011): Baukalkulation und Projektcontrolling unter Berücksichtigung der KLR Bau und der VOB. Vieweg + Teubner Verlag, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden, 2011.

Mattenkloß, M.; Höfert, N. (2009): Stäube an Arbeitsplätzen und in der Umwelt – Vergleich der Begriffsbestimmungen. In: Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft, 69 (2009), Nr.4, S. 127-129.

Mettke, A. (2010): Material- und Produktrecycling – am Beispiel von Plattenbauten, Habilitationsschrift, Cottbus, 2010.

Mettke, A. (Hrsg.); Heyn, S.; Asmus, S. et.al. (2008): Schlussbericht zum Forschungsvorhaben „Rückbau industrieller Bausubstanz – Großformatige Betonelemente im ökologischen Kreislauf“, Teil 1: „Krangeführter Rückbau“, gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (FKZ 0339972), BTU Cottbus, Fachgruppe Bauliches Recycling, 01/2008.

Mettke, A. (1995): Wiederverwendung von Bauelementen des Fertigteilbaus. Dissertation. Reihe Umweltwissenschaften Band 5. Eberhard Blottner Verlag. Taunusstein.

Mur und Muzeau (1979): Comparative Study of Various Demolition Procedures. Annales de l'Institut technique du batiment et des travaux publics, Issue 377, November 1979, S. 53-86.

Neuffer, H und Witterhold, F.-G. (2001): Strategien und Technologien einer pluralistischen Fern- und Nahwärmeversorgung in einem liberalisierten Energiemarkt unter besonderer Berücksichtigung der Kraft-Wärme-Kopplung und regenerativer Energien. AGFW-Hauptstudie – Erster Bearbeitungsschnitt Band 2: Wärmeversorgung des Gebäudebestandes und Technologieentwicklung und –bewertung. Arbeitsgemeinschaft Fernwärme e.V., Frankfurt a.M., 2001.

Rentz, O. (1993): Selektiver Rückbau und Recycling des Hotel Post in Döbel, Landkreis Calw. Im Auftrag des Umweltbundesministeriums Baden-Württemberg, Karlsruhe, 1993.

Rentz, O.; Seemann, A.; Reass, C.; Schultmann, F. (2002): Entwicklung optimierter Rückbau- und Recyclingverfahren durch Kopplung von Gebäudedemontage und Bauschuttzubereitung - Zwischenbericht. Gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU), Karlsruhe, 2002.

Schiller, G. and Deilmann, C. (2010). Ermittlung von Ressourcenschonungspotenzialen bei der Verwertung von Bauabfällen und Erarbeitung von Empfehlungen zu deren Nutzung. Dessau-Roßlau. 56/2010.

Schultmann, F. (1998): Kreislaufführung von Baustoffen - Stoffflußbasiertes Projektmanagement für operative Demontage- und Recyclingplanung von Gebäuden. Dissertation. Breitschaft, G.; Dütz, W.; Scholz, R.; Sonnenberg, H.J.; Wike, D. (Hrsg). Baurecht und Bautechnik, Band 10, 1998, Erich Schmidt Verlag, Berlin.

Seemann, A. (2003): Entwicklung integrierter Rückbau- und Recyclingkonzepte für Gebäude - ein Ansatz zur Kopplung von Demontage, Sortierung und Aufbereitung. Dissertation. Shaker Verlag, Aachen, 2003.

Stmug (2012): Umwelt-Lexikon. Bayerischen Lebensministeriums. Online unter: <http://www.stmug.bayern.de/service/lexikon/>. Abgerufen am 17.12.2012.

Strohbusch, A. (2011): Vermeidung und Verminderung von Staubemissionen auf Baustellen - ein Leitfaden für die Praxis. Referat Industrieanlagen, Abfallströme und Lärmbekämpfung, Senatsverwaltung für die Gesundheit, Umwelt und Verbraucherschutz, Berlin, 08.2011.

UBA (2011a): Themen - Luft - Regelungen und Strategien - Luftreinhaltung in der EU. Online unter: <http://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/regelungen-strategien/luftreinhaltung-in-der-eu>. Geändert am 25.05.2011. Abgerufen am: 15.07.2014.

UBA (2011b): Daten – Umwelt und Gesundheit – Lärmwirkungen. Online unter : <http://www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-gesundheit/laermwirkungen>. Geändert am 10.07.2013. Abgerufen am: 14.07.2014.

Weimann, K.; Matyschik, J.; Adam, C.; Schulz, T.; Linß, E.; Müller, A. (2013): Optimierung des Rückbaus/Abbaus von Gebäuden zur Rückgewinnung und Aufbereitung von Baustoffen unter Schadstoffentfrachtung (insbes. Sulfat) des RC-Materials sowie ökobilanzieller Vergleich von Primär- und Sekundärrohstoffeinsatz inkl. Wiederverwertung. Umweltbundesamt, Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Forschungskennzahl 370933317, UBA-FB 001676, 05/2013.

Wikipedia-1 (2014): Lautstärke. Online unter: <http://de.wikipedia.org/wiki/Lautst%C3%A4rke>. Abgerufen am: 14.07.2014.

Willkomm, W. (1990): Abbruch und Recycling. Verlag TÜV Rheinland, Köln, 1990.

Gesetz-, Normen- und Richtlinienverzeichnis

Gesetze, Verordnungen und Vorschriften

AVV (1970): Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Schutz gegen Baulärm – Geräuschemissionen - vom 19. August 1970 (Beil. zum BAnz. Nr. 160).

BImSchG (2012): Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz). Zuletzt geändert am 02.07.2013 (BGBl. I S.1943).

16. BImSchV: Sechzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verkehrslärmschutzverordnung) vom 19. September 2006 (BGBl. I S. 2146).

32. BImSchV: Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Geräte- und Maschinenlärmschutzverordnung) vom 29. August 2002. Zuletzt geändert am 8.11.2011 (BGBl. I S. 2178).

BRTV (2014): Bundesrahmentarifvertrag für das Baugewerbe vom 4.07.2002 zuletzt angepasst am 10.12.2014.

EU-Richtlinie 2008/50/EG: Richtlinie 2008/50/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Mai 2008 über Luftqualität und saubere Luft für Europa.

GefStoffV (2010): Verordnung zum Schutz vor Gefahrstoffen (Gefahrstoffverordnung) vom 26. November 2010 (BGBl. I S 1643) geändert durch Artikel 2 des Gesetzes vom 28. Juli 2011 (BGBl. I S 1622), durch Artikel 2 der Verordnung vom 24. April 2013 (BGBl. I S 944), Artikel 2 der Verordnung vom 15. Juli 2013 (BGBl. I S 2514) und Artikel 2 der Verordnung vom 03. Februar 2015 (BGBl. I S 49).

KrWG (2012): Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz), vom 24.02.2012 (BGBl. I S. 212).

Technische Regeln

DIN 4150: Erschütterungen im Bauwesen. Deutsches Institut für Normung. DIN 4150-1:2001-06: Teil 1: Vorermittlung von Schwingungsgrößen; DIN 4150-2:1999-06: Teil 2: Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden; DIN 4150-3:1999-02: Teil 3: Einwirkungen auf bauliche Anlagen. Berlin, Beuth-Verlag.

DIN 18005-1:2002-07: Schallschutz im Städtebau - Teil 1: Grundlagen und Hinweise für die Planung. Berlin, Beuth-Verlag, 2002.

DIN 18007:2009-03: Abbrucharbeiten - Begriffe, Verfahren, Anwendungsbereiche. Berlin, Beuth-Verlag, 2009.

ISO 9613-2:1999-10: Akustik - Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien - Teil 2: Allgemeines Berechnungsverfahren (ISO 9613-2:1996), Deutsch Fassung. Berlin, Beuth-Verlag, 1999.

TA Lärm (1998): Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm - TA Lärm), vom 26. August 1998 (GMBI Nr. 26/1998 S. 503).

TA Luft (2002): Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft), vom 24. Juli 2002.

TRGS 559 (2010): Technische Regeln für Gefahrstoffe – Mineralischer Staub (2010-02). Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS), Geschäftsführung: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund, 2010.

TRGS 900 (2006): Technische Regeln für Gefahrstoffe – Arbeitsplatzgrenzwerte (2006-01). Zuletzt geändert und ergänzt: GMBI 2013 S. 943-947 v. 19.9.2013 [Nr. 47]. Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS), Geschäftsführung: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund, 2006.

VDI-Richtlinien und Merkblätter

SBUV (Senator für Bau, Umwelt und Verkehr) (2005): Richtlinie für die Konkretisierung immissionsrechtlicher Betreiberpflichten zur Vermeidung und Verminderung von Staub-Emissionen durch Bautätige. Bremen, 26.07.2005. Online unter: http://www.umwelt.bremen.de/sixcms/media.php/13/Baustellen_Erlass.pdf. Abgerufen am: 03.12.2013.

VDI/GvSs 6202-Blatt1:2013: Sanierung schadstoffbelasteter Gebäude und Anlagen - Abbruch-, Sanierungs- und Instandhaltungsarbeiten. Verein Deutscher Ingenieure, Gesamtverband Schadstoffsanierung. Oktober, 2013.

VDI 6210 E: Entwurf VDI 6210 Blatt 1 Abbruch von baulichen Anlagen, März 2014, S.10.

VDI 3782 Blatt 1:2009-08: Umweltmeteorologie - Atmosphärische Ausbreitungsmodelle - Gauß'sches Fahnenmodell zur Bestimmung von Immissionskenngrößen.

VDI 3783 Blatt 13:2010-01: Umweltmeteorologie. Qualitätssicherung in der Immissionsprognose. Anlagenbezogener Immissionsschutz. Ausbreitungsrechnung gemäß TA Luft

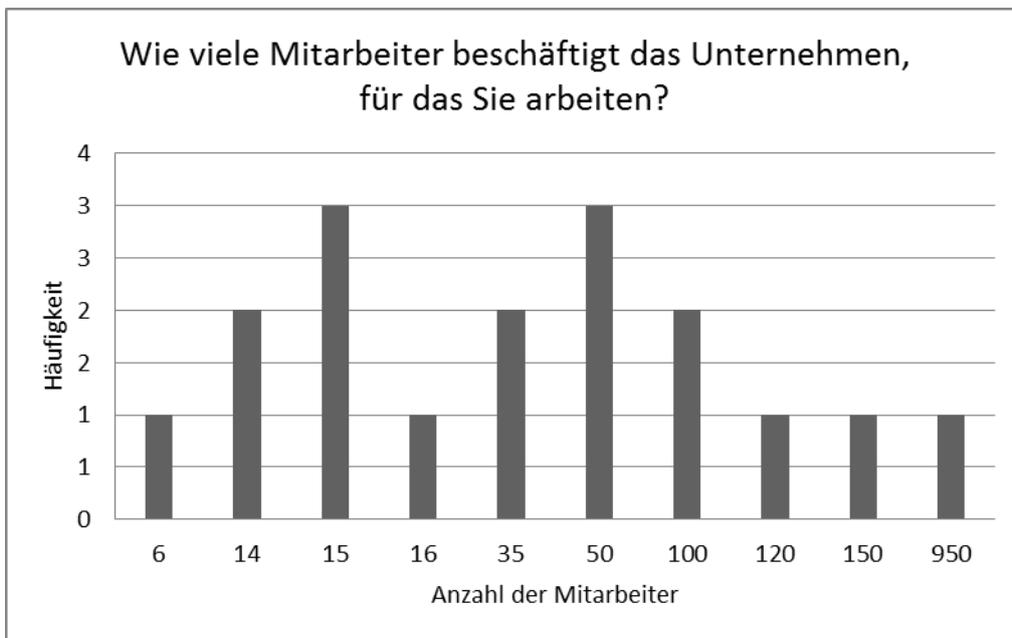
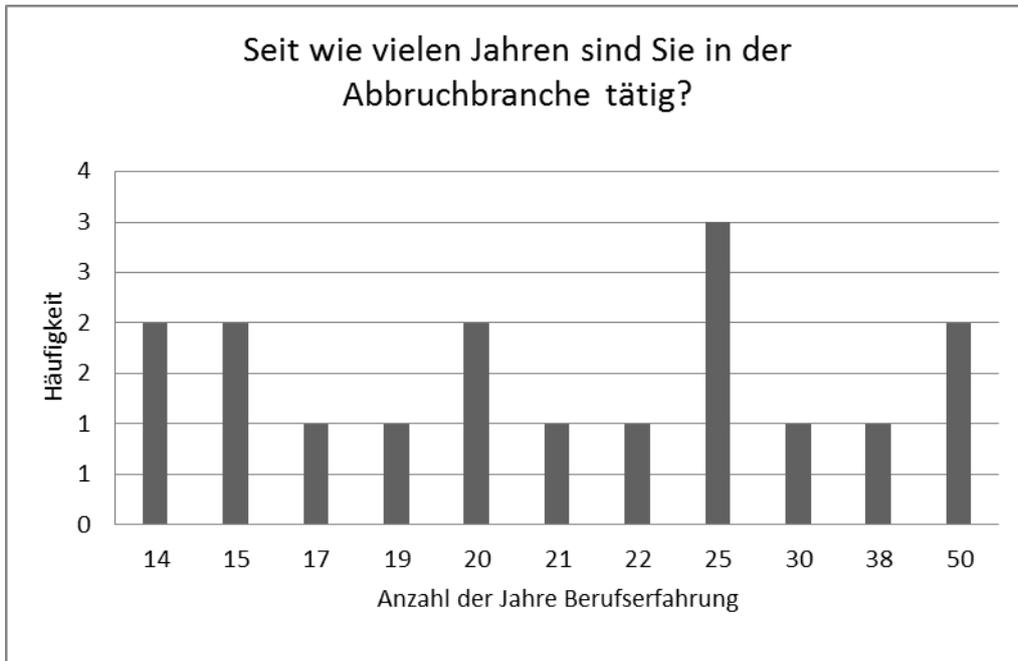
VDI 3790: Blatt 1:2005-01 Emissionen von Gasen, Gerüchen und Stäuben aus diffusen Quellen – Grundlagen. VDI-Richtlinie 3790-Blatt 3:2010-01 Emissionen von Gasen, Gerüchen und Stäuben aus diffusen Quellen. Lagerung, Umschlag und Transport von Schüttgütern. Blatt 3:2010-01-00 Emissionen von Gasen, Gerüchen und Stäuben aus diffusen Quellen - Lagerung, Umschlag und Transport von Schüttgütern.

Anhang

Anhang A: Ausgewählte Auswertungen der Online-Umfrage für die Experteneinschätzung

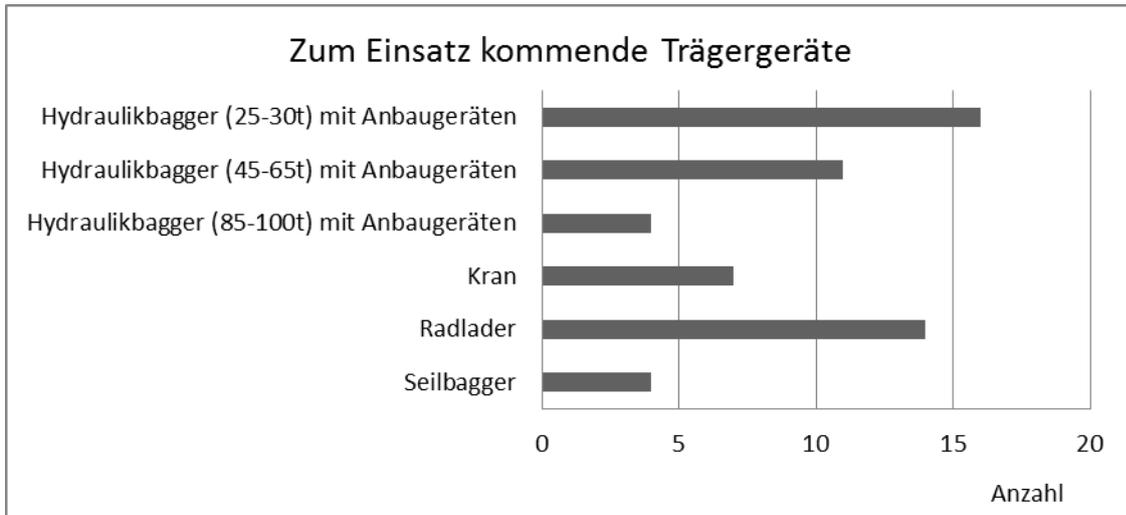
Die folgenden Ergebnisse basieren auf den 18 abgeschlossenen Umfragen.

Ergebnisse basieren auf der freiwilligen Angabe von 17 der 18 Befragten



Ergebnisse basieren auf den 18 abgeschlossenen Umfragen

Mehrfachnennungen möglich:



Mehrfachnennungen möglich :

