

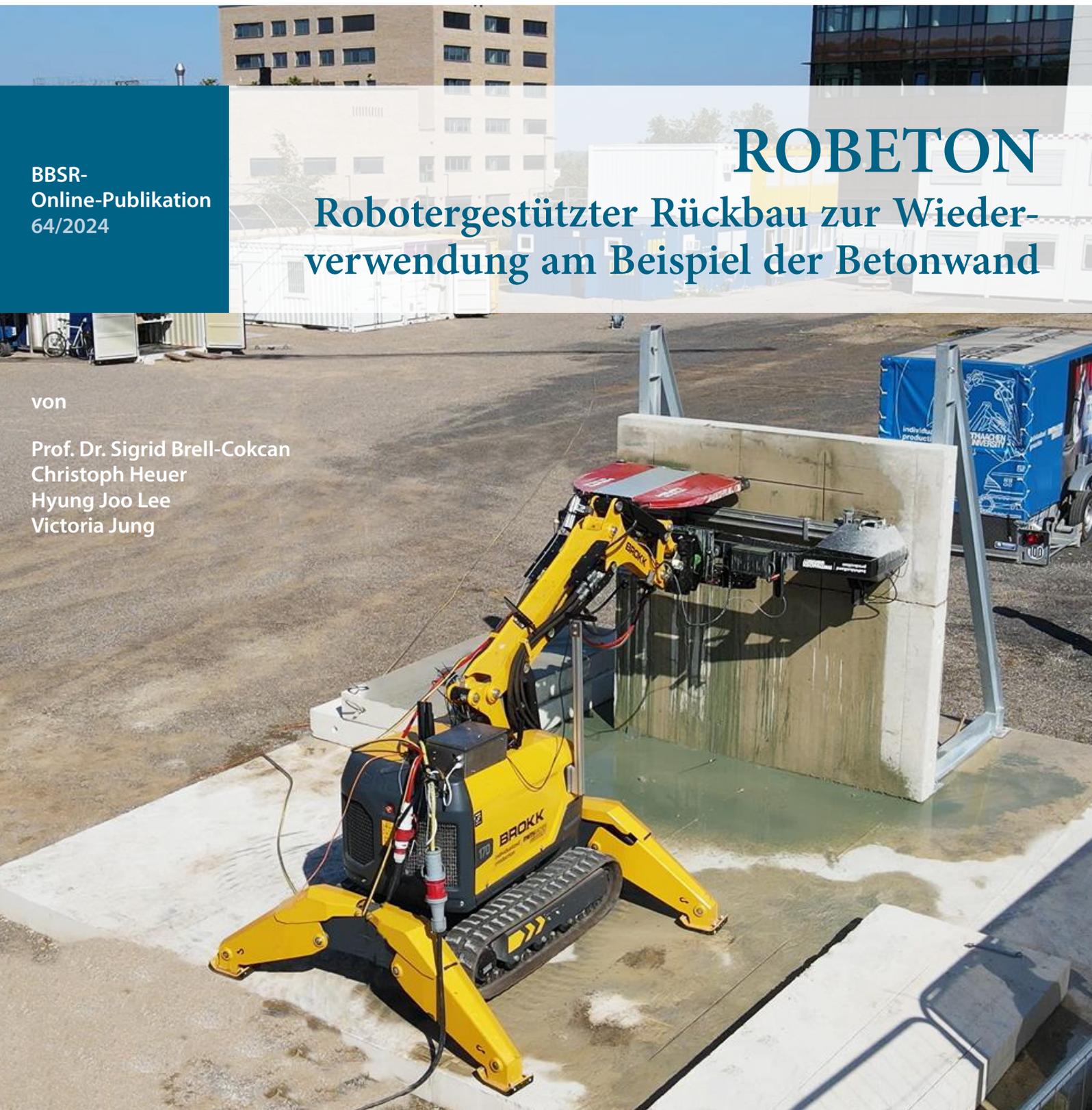
BBSR-  
Online-Publikation  
64/2024

# ROBETON

## Robotergestützter Rückbau zur Wieder- verwendung am Beispiel der Betonwand

von

Prof. Dr. Sigrid Brell-Cokcan  
Christoph Heuer  
Hyung Joo Lee  
Victoria Jung



# ROBETON

## Robotergestützter Rückbau zur Wiederverwendung am Beispiel der Betonwand

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wohnen, Stadtentwicklung  
und Bauwesen

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

**ZUKUNFT BAU**  
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.

Aktenzeichen: 10.08.18.7-21.11

Projektlaufzeit: 10.2021 bis 10.2023

## IMPRESSUM

### Herausgeber

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)  
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)  
Deichmanns Aue 31–37  
53179 Bonn

### Fachbetreuer

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung  
Referat WB 3 „Forschung und Innovation im Bauwesen“  
Daniel Wöffen  
daniel.woeffen@bbr.bund.de

### Autorinnen und Autoren

RWTH Aachen, Lehrstuhl für Individualisierte Bauproduktion  
Prof. Sigrid Brell-Cokcan (Projektleitung)  
brell-cokcan@ip.rwth-aachen.de

Christoph Heuer  
heuer@ip.rwth-aachen.de

Hyung Joo Lee  
lee@ip.rwth-aachen.de

Victoria Jung  
jung@ip.rwth-aachen.de

### Stand

April 2024

### Gestaltung

RWTH Aachen, Lehrstuhl für Individualisierte Bauproduktion  
Christoph Heuer / Victoria Jung

### Bildnachweis

Titelbild: Simon Laprell

Christoph Heuer: S. 37, 43, 45, 74, 76, 77, 78, 80, 84, 89; Simon Laprell: S. 29, 40, 49, 60, 63, 85, 86, 87, 91, 93, 95; Joo Lee: S. 51, 53, 54, 59, 64, 85; Aaron Lentés: S. 79

### Vervielfältigung

Alle Rechte vorbehalten

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

### Zitierweise

Brell-Cokcan, Sigrid; Heuer, Christoph; Lee, Hyung Joo; Jung, Victoria, 2024: ROBETON: Robotergestützter Rückbau zur Wiederverwendung am Beispiel der Betonwand. BBSR-Online-Publikation 64/2024, Bonn.

# Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	7
Problemstellung	7
Entwicklung	7
Ergebnisse	7
Abstract	9
Problem Statement	9
Development	9
Results	9
Einführung	11
Themenfeld	11
Problemstellung	12
Stand der Baupraxis	12
Stand der Technik als Referenzprozess	12
Wandsäge	13
Zielstellung	16
Konkrete Projektziele	16
Entwicklung der Baurobotik-Lösung	16
Effiziente Nutzung von BIM-Modellen	16
Anwendungsszenarien	16
Key Performance Indicators (KPI`s)	17
Entwicklung der Anwendungsszenarien	18
Methodischer Ansatz	18
Projektteam und Organisation, Kooperationspartner	19
Arbeitspakete und Meilensteine	19
Arbeitspaket 5: Ergebnistransfer und ökonomische Validierung	20
Projektverlauf	21
Entwicklung der Anwendungsfälle	22
Anwendung 1: Herausschneiden von Betonteilen zur Wiederverwendung	22
Anwendungsszenario 2: Rückbau von schadstoffbelasteten Materialien	23
Anwendungsszenario 3: Änderung bestehender Gebäudestrukturen	23
Entwicklung der Sägevorrichtung	24
Gebaute Beispiele	24
Bestandteile der Eignungsfeststellung	26
Ermittlung der Prozesskräfte der Säge	27
Anforderungen für Entwicklung Sägevorrichtung	29
Verfahren zur Krafterkennung	31
Entwicklung der Sicherheitsfunktion für den Schneideprozess	32
Erzeugung der Erreichbarkeitskarte	33

Ermittlung der statischen Kräfte	33
Experimental Evaluation	35
Einordnung der Ergebnisse	36
<b>Entwicklung der Sägevorrichtung</b>	<b>37</b>
Bestimmung der Vergleichskraft und Einflussfaktoren	37
Konzept des ersten Prototypens	39
Konzept des zweiten Prototypens	41
Drehgelenk zum Kraftausgleich	42
Aktuatorik zum Positionsausgleich	42
Elektrische Steuerung der Betonsägevorrichtung	44
Steuerungseinheit	44
Motoren	45
Positionierungsvorrichtung der Säge	45
Steuerungsapplikation	46
Anfahren von direkten Positionen	46
Automatische Ausrichtung mittels weiterentwickelten Laser Grading	47
<b>Entwicklung der Steuerung für den BROKK 170</b>	<b>48</b>
Systemübersicht	50
Konzept des semi-autonomen Ansatzes	50
BROKK 170	51
Steuerungsverfahren	53
Planungsverfahren	53
Definition der Zielaktion	54
Ereignisgesteuerter Zustandsautomat	54
Bewegungsplaner	55
Lowlevel-Regler	56
Experimente mit dem Hammer	56
Puls-Tests	57
Trajektorienverfolgung	58
Feldexperiment	59
Zusammenfassung vom Experiment mit dem Hammer	61
<b>Entwicklung von Schnittstelle zum BIM und Integration der Information</b>	<b>64</b>
Ontologien im Bauwesen	64
Scope & competency questions	65
Entwicklung einer Beispielanwendung	69
Probeanwendung zur Evaluation des Systems	69
Ausblick auf mögliche weitere Punkte	72
<b>Entwicklung des Demonstrators</b>	<b>73</b>
<b>Evaluation des Systems auf der Referenzbaustelle</b>	<b>75</b>
Robustheit der Sägeanlage	75
Positionierungssysteme	77
Automatische Bauteilerkennung	78
Wahrnehmungssystem	79

Schnittversuche	82
Test des Schnittverhaltens bei stehender Konfiguration	84
Schnittqualität	86
Abschließende Evaluation der KPIs	86
Ergebnistransfer und ökonomische Validierung	88
Ergebnisse	90
Ausblick	92
Mitwirkende	94
Kurzbiographien	95
Literaturverzeichnis	96
Abbildungsverzeichnis	100
Tabellenverzeichnis	103
Anlagen	104
Glossar	105

## Kurzfassung

### Problemstellung

Der Bestand an Gebäuden und Infrastruktur in Deutschland stellt mit etwa 28 Milliarden Tonnen ein bedeutendes, vom Menschen geschaffenes Rohstoffreservoir dar, das nach seiner Nutzung als Baumaterial wiederverwendet werden kann<sup>5</sup>. Aktuell werden jedoch Gebäude nach Erreichen ihrer Lebensdauer oft abgerissen, und ein Großteil des potenziell wiederverwendbaren Baumaterials landet als Füllmaterial oder in Straßen und Deponien<sup>34</sup>. Der Baubereich ist für mehr als 39% der weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen und des Primärenergieverbrauchs verantwortlich und zählt somit zu den kritischsten Wirtschaftssektoren im Hinblick auf den Klimawandel. Nur ein geringer Anteil der vorhandenen Baumaterialien kann im Betonbau durch CO<sub>2</sub>-emittierende Recyclingverfahren wiederverwendet werden<sup>29</sup>.

Angesichts des zunehmenden Klimawandels und steigenden Materialmangels im Baugewerbe wächst der Druck auf die Bauindustrie, nachhaltigere Lösungen für den kontrollierten Rückbau und die Wiedergewinnung von Bauteilen zu finden, um sie als zukünftige Quelle für sekundäre Bauprodukte zu nutzen. Die Notwendigkeit, neue, wirtschaftliche, effiziente und sichere Methoden für den Rückbau zu entwickeln, ergibt sich daher zwangsläufig.

### Entwicklung

Das Forschungsprojekt ROBETON der RWTH Aachen setzt genau an dieser technologischen Herausforderung an und erforscht die Anpassung einer belastbaren Abbruchmaschine zu einem digital gesteuerten Abbruchroboter. Dieser verfügt über eine eigens für den Prozess entwickelte Betonschneideanlage und ermöglicht einen neuen, teilweise automatisierten Rückbauprozess zur Wiederverwendung von Betonbauteilen.

Im Rahmen des Forschungsprojekts ROBETON wird auf die Erfahrungswerte einer seit über 40 Jahren bewährten Abbruchmaschine der Firma BROKK aufgebaut und mit einer digitalen Erweiterung der Systemsteuerung zu einem intelligenten Roboter weiterentwickelt. Digitale Modelle der Bauplanung werden über eine neuentwickelte Benutzeroberfläche mit der Robotersteuerung verbunden. Zusätzlich wird der Abbruchroboter von einem mobilen Roboter zur Umgebungserfassung und Bauteilerkennung unterstützt. Die aufgenommenen Daten werden für eine kollisionsfreie Planung und Ausführung des kontrollierten Rückbaus genutzt und direkt an die Robotersteuerung zum Datenabgleich mit dem Planungsmodell übermittelt.

### Ergebnisse

Durch die Unterstützung von Industriepartnern und die Erprobung eines ersten Prototyps auf der Referenzbaustelle der RWTH Aachen konnte gezeigt werden, dass im Vergleich zu herkömmlichen Rückbauverfahren:

- der Gewinnungsprozess der Bauteile signifikant beschleunigt werden konnte
- durch den teilautoamisierten Prozess das Baustellenpersonal entlastet werden
- durch das Binden des Staubs mit Wasser die Umgebung weiter geschützt werden konnte
- durch die erstmalige Integration der digitalen Planung mittels Building Information Modeling (BIM) in den Rückbauprozess über die neu entwickelten digitalen Schnittstellen der Abbruchroboter zukünftig eine digitale Baudokumentation und Recyclingplanung vor Ort ermöglicht wird. Dies

ermöglicht dem Abbruchroboter ein bedarfsgerechtes, präzises, automatisiertes und minimalinvasives Schneiden der entsprechenden Bauteile.

Neben der Betonsäge kann der Abbruchroboter mit weiteren Werkzeugen wie z.B. Trennschneider, Sortiergreifer oder Bohrlafetten eingesetzt werden und kann so flexibel in vielen weiteren Bauanwendungen eingesetzt werden.

Neben den wirtschaftlichen Vorteilen durch die genannten Potentiale der digitalen Effizienzsteigerung von Baumaschinen und der Wiederverwendung der gewonnenen Bauteile soll die Akzeptanz in der Baubranche durch die digitale Weiterentwicklung einer bereits existierenden Baumaschinenteknik bei einem gleichbleibenden Produktpreis erhöht werden, sodass die Automation eine bereitere Akzeptanz in der Baubranche gewinnen kann.

---

## Abstract

### Problem Statement

The building stock and infrastructure, totaling around 28 billion tons, represent a significant man-made repository of resources that can be reused as building materials at the end of their life cycle<sup>5</sup>. However, currently, buildings are demolished once they reach their life expectancy, and a large share of the potential building materials end up as fill material or used for road construction and landfills<sup>34</sup>. The construction sector accounts for over 39% of the global CO<sub>2</sub> emissions and primary energy consumption, making it one of the most critical economic sectors contributing to climate change. Only a fraction of the existing building materials can be reused in concrete construction using CO<sub>2</sub>-emitting recycling processes<sup>29</sup>.

With increasing climate change and a growing scarcity of materials in the construction sector, there is mounting pressure on the construction industry to find more sustainable solutions for controlled deconstruction and the recovery of building components as future sources of secondary building products. The need to develop new, cost-effective, efficient, and safe deconstruction methods is, therefore, a logical consequence.

### Development

The research project ROBETON at RWTH Aachen University addresses this technological gap and explores the adaptation of a robust demolition machine into a digitally controlled demolition robot with a specially developed concrete cutting system for a new (semi-)automated deconstruction process for the reuse of concrete building components.

Within the framework of the ROBETON research project, the experience of a proven demolition machine from BROKK, which has been in use for over 40 years, is utilized and further developed into an intelligent robot by adding digital extensions to the system control. Digital models of the building plans are connected to the robot control through a newly developed user interface. Additionally, the demolition robot is supported by a mobile robot for environment perception and component recognition. The collected data are used for collision-free planning and execution of controlled deconstruction and are directly transmitted to the robot control for data synchronization with the planning model.

### Results

With the support of industrial partners and the testing of an initial prototype on the Reference Construction Site at RWTH Aachen University, it was possible to show that, in comparison to conventional dismantling methods, a new method of dismantling is possible:

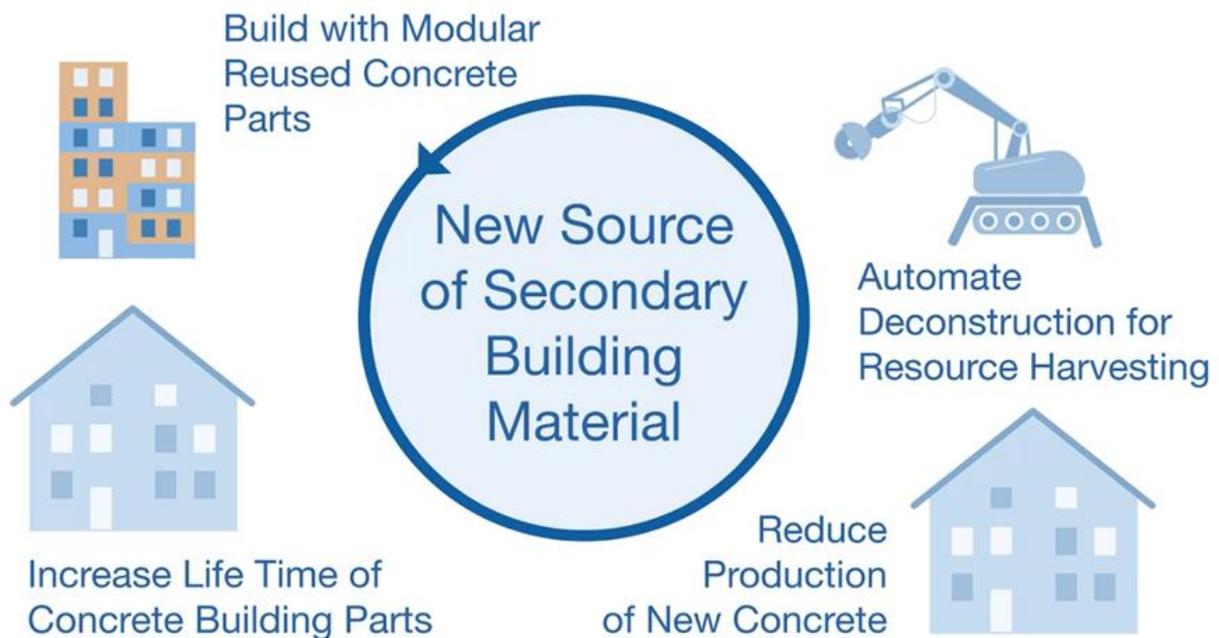
- The recovery process of the components could be significantly accelerated
- The partly automated process relieved the construction site personnel
- The environment was further protected by binding the dust with water
- The first-time integration of digital planning using Building Information Modelling (BIM) into the demolition process via the newly developed digital interfaces of the demolition robots will enable digital construction documentation and recycling planning on site in the future. This enables the demolition robot to cut the relevant components precisely, automatically and minimally invasively as required.

In addition to the concrete saw, the demolition robot can be equipped with other tools such as cut-off saws, sorting grabs, or drilling jigs, and can thus be used flexibly in many other construction applications.

Besides the economic advantages due to the mentioned potentials of digital efficiency enhancement of construction machinery and the reuse of recovered components, acceptance in the construction industry is to be increased through the digital further development of an already existing construction machinery technology at a constant product price, so that automation can gain broader acceptance in the construction industry

## Einführung

Abbildung 1  
Prozessübersicht zur Gewinnung von Gebäudeteilen aus dem Gebäudebestand



### Themenfeld

Der Wandel der gesellschaftlichen und ökologischen Anforderungen erfordern eine sorgfältige Bewertung des Potenzials bestehender Gebäude für die Sanierung, das Umweltrisiko und das Recycling. Während die aktuelle Forschung zum nachhaltigen Bauen den Rückbau als kritischen Planungsfaktor betrachtet, wurde der größte Teil der bestehenden Gebäude nicht für diese Lebenszyklusphase optimiert. Abbruchabfälle machen fast 30 % aller in der EU erzeugten Abfälle aus und bestehen aus zahlreichen Materialien. Trotz des inhärenten materiellen Wertes wird das Potenzial für die Materialgewinnung nicht voll ausgeschöpft (Recycling und Verwertung schwanken zwischen 10 % und 90 % in der EU) <sup>57</sup>. Außerdem ist der Rückbau von Altbaumaterialien häufig mit erheblichen Gesundheitsrisiken für die Bauarbeiter verbunden. Die derzeitigen Methoden haben Schwierigkeiten, Staub und gefährliche Materialien in einer Weise zu handhaben, die die beteiligten Arbeiter schützen. Dies trägt dazu bei, dass die Bauindustrie als unattraktiver Arbeitgeber mit geringer Bindung sich präsentiert <sup>11</sup>.

Die derzeitigen Rückbaumethoden sind ineffektiv, da sie invasiv sind (Luft- und Lärmbelästigung, Zerstörung durch Erschütterungen bei Explosionen oder abrupter Abriss mit Sprengstoff). Darüber hinaus werden bei den herkömmlichen Methoden moderne Technologien (Roboter, Umgebungserfassung usw.) nicht systematisch integriert <sup>4</sup>. Das Forschungsprojekt setzt daher hier an und untersucht die Unzulänglichkeiten und Stärken der bisherigen Ansätze und bietet konzeptionelle Ansätze für den robotergestützten Rückbau am Beispiel von Betonwänden.

## Problemstellung

Steigende Rohstoffpreise und der Klimawandel erfordern ein Umdenken im Umgang mit vorhandenen Materialressourcen und Bestandsbauwerken. Durch die digitale Erweiterung einer Abbruchmaschine der Firma BROKK zu einem (teil-)automatisierten Roboter mit einer eigensentwickelten Sägevorrichtung wurde an der RWTH Aachen ein neues nachhaltiges Verfahren zum sicheren, kontrollierten Rückbau und zur anschließenden Wiederverwendung von Betonbauteilen als Quelle für sekundäre Bauprodukte für den Einsatz in Bau- und Sanierungsmaßnahmen entwickelt.

Die noch durch manuelle Verfahren geprägte Gewinnung von Gebäudeteilen wird durch ein (teil-)automatisiertes Verfahren ergänzt, um nicht nur die Wirtschaftlichkeit der Wiederverwendeten Bauteile zu erhöhen, sondern auch die Arbeitssicherheit und Umweltbelastung der zurzeit stark belastenden Abbruchverfahren für Baustellenpersonal und Umwelt zu senken <sup>11</sup>.

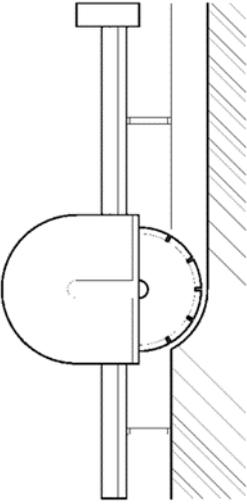
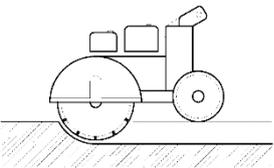
### Stand der Baupraxis

Jährlich werden ungefähr 55,5 Millionen Tonnen wertvoller mineralischer Abfälle (d.h. Ziegel, Kalksandsteine, poröse Materialien und Beton) aus der Bauindustrie erzeugt. Hierbei spielt Beton eine entscheidende Rolle, da rund 42 Masse-% der in der Bauindustrie verwendeten Materialien aus Beton bestehen. Gleichzeitig fallen jedes Jahr ungefähr 12 Millionen Tonnen Betonabfälle an. Obwohl der Großteil der Betonabfälle im Straßenbau und bei Pflasterarbeiten wiederverwertet wird, werden erhebliche Ressourcen für das Down- und Upcycling verbraucht <sup>46</sup>.

### Stand der Technik als Referenzprozess

In Tabelle 1 sind die herkömmlichen Rückbaumaschinen zum Schneiden von Baumaterialien aufgeführt, die bereits breite Anwendung finden. Die Übersicht in Abbildung 3 zeigt deutlich die Grenzen der bestehenden Rückbaumethoden auf: Trotz der kontinuierlichen Entwicklungen bei den Hardwarekomponenten stagniert der Grad der Autonomie, da die meisten Vorgänge immer noch manuell durchgeführt werden müssen <sup>11</sup>.

Tabelle 1  
Zusammenfassung der konventionell verfügbaren Abbruchmaschinen <sup>11</sup>

Bezeichnung	Funktionsweise	Material	Automationsgrad
<p><b>Wandsäge</b></p> 	<p>Das System besteht aus drei Hauptelementen: das Betonsägeblatt (Sägeblattdurchmesser zwischen 60 und 160 cm), einem Antrieb für das Sägeblatt (hydraulisch oder elektrisch) und einer Schiene, entlang der sich der Antrieb bewegt. Diese Schiene wird an der Wand befestigt. Die Schiene kann horizontal, vertikal oder sogar über dem Kopf montiert werden. Mit Hilfe eines integrierten Motors bewegt sich die Säge mühelos entlang der Schiene. Die Schiene gewährleistet einen sauberen und präzisen Schnitt.</p>	<p>Beton, Ziegel, Schaumbeton.</p>	<p>Einige Sägen, zum Beispiel von der Firma Hilti, verfügen über integrierte Sägeprogramme, die den Schneidprozess automatisch durchführen. Die Montage der Säge erfolgt jedoch immer noch manuell, was sehr zeitaufwendig und kostspielig ist.</p>
<p><b>Betonbodensäge</b></p> 	<p>Bodensäge ist eine Schneidmaschine, die auf Rollen über den Boden rollt. Im Gegensatz zur Wandsäge ist die Sägeeinrichtung auf einem Wagen montiert. Ähnlich wie bei einer Wandsäge wird die Säge entlang einer Oberfläche von Rollen geführt und kann schrittweise in das zu schneidende Material abgesenkt werden. Die Bodensäge kann entweder automatisch oder manuell gesteuert werden. Die Struktur ist darauf ausgelegt, horizontal zu schneiden.</p>	<p>Beton, Asphalt, Stein.</p>	<p>Einige der Maschinen können ihre Geschwindigkeit automatisch anpassen, da sie über eine elektrische Steuerung verfügen.</p>

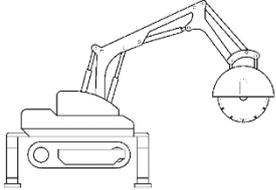
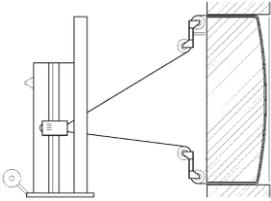
Bezeichnung	Funktionsweise	Material	Automationsgrad
<p><b>Montierte Wandsäge</b></p> 	<p>Speziell entwickelt für den Einsatz an Baggern verschiedener Gewichtsklassen, von 0,9 bis 60 Tonnen. Hierfür wird eine eigens entwickelte Diamantsägevorrichtung an der Befestigungsplatte des Baggers angebracht. Der Bediener führt die Säge durch die Fernsteuerung des Baggers.</p>	<p>Beton, Ziegel, Schaumbeton.</p>	<p>Die Maschine wird manuell ferngesteuert.</p>
<p><b>Diamantseilsäge</b></p> 	<p>Diese Methode eignet sich zum Schneiden großer Betonstrukturen. Ein Motor treibt ein Diamantseil an, das mit hohem Druck auf die zu schneidende Oberfläche gespannt wird. Das Diamantseil wird über Umlenkrollen in einem geschlossenen Kreislauf geführt. Die Spannung des Seils wird während des gesamten Sägeprozesses gleichmäßig aufrechterhalten.</p>	<p>Diese Maschine kann zum Schneiden großer Teile aus Stahlbeton verwendet werden.</p>	<p>Das Führen der Seilsäge erfordert ein hohes Maß an manueller Kontrolle. Derzeit wird nur die Spannung der Säge automatisch eingestellt.</p>

Abbildung 2

zeigt eine Darstellung der Umgebung des aktuellen Abbruch- und Rückbauprozesses. Es ist ersichtlich, dass bis jetzt die Arbeiten manuell bzw. durch manuell gesteuerte Maschinen durchgeführt werden, sodass die Operatoren währenddessen großer gesundheitlicher und gefährlicher Belastung ausgesetzt sind. Der manuell gesteuerte Abbruchprozess einer BROKK Maschine wird hier als Referenzprozess definiert



## Zielstellung

Ferngesteuerte mobile Baumaschinen wie von BROKK oder Husqvarna sind durch ihre hohe Tragkraft und Flexibilität vor allem für den Abbruch prädestiniert und haben dort einen hohen Stellenwert. Im allgemeinen werden diese Systeme ausschließlich manuell gesteuert, wodurch die Präzision der Maschinen eingeschränkt ist. Im Rahmen des Projekts ROBETON wird die herkömmliche Abbruchmaschine BROKK 170 der Firma BROKK, die bis jetzt manuell mit Joysticks bedient wird, teilautomatisiert, sodass die ursprünglich ferngesteuerte Abbruchmaschine mit abstrakten Befehlen (z.B. Bewege den Manipulator entlang der gegebenen Trajektorie) gesteuert werden kann.

Als erster Anwendungsfall wird das Herausschneiden von Betonteilen zur Wiederverwendung untersucht. Wie im Weiteren genauer beschrieben, übernimmt ein BROKK 170 den Schneidprozess. Anschließend hebt der Kran das ausgeschnittene Bauteil heraus. Dabei muss der Zugang von oben gewährleistet sein. Das Ziel ist es, bestehende Gebäude als Ressource für Neubauten zu nutzen, indem Bauteile aus Wänden mittels des entwickelten Prozesses herausgeschnitten werden. In Rücksicht auf die maximalen Abmaße für den Prozess können die Bauteile in beliebiger und gewünschter Größe herausgeschnitten werden. Eine wichtige Frage ist jedoch, in wie weit der Zustand der Bauteile anschließend geprüft werden kann, ob diese die Anforderungen der Tragfähigkeit und der Gebrauchsfähigkeit nach der bisherigen Nutzung noch erfüllen. Diese Untersuchung ist nicht Teil des Forschungsprojekts.

### Konkrete Projektziele

Das Hauptziel des ROBETON-Projekts ist die Steigerung des Automatisierungsgrads im Rückbauprozess mithilfe einer innovativen Baurobotik-Lösung. Diese Lösung soll den Arbeiterinnen und Arbeitern (teil-) automatisierte Möglichkeiten bieten, um präzise und kontrollierte Rückbauarbeiten auf der Baustelle durchzuführen.

#### Entwicklung der Baurobotik-Lösung

Im Rahmen des Projekts wird die ferngesteuerte Abbruchmaschine BROKK 170 durch ein intelligentes Steuerungssystem für Aufgaben- und Bewegungsplanung zu einem Abbruchroboter weiterentwickelt. Dies ermöglicht effizientere und sicherere Rückbauaktivitäten, die bisher hauptsächlich manuell ausgeführt wurden. Das Ziel ist, ressourcenschonender zu arbeiten.

#### Effiziente Nutzung von BIM-Modellen

Ein weiterer Aspekt des Projekts ist die Untersuchung der effizienten Nutzung von Teilinformationen aus Building Information Modeling (BIM) Modellen. Diese Informationen werden in die Bewegungsplanung der Abbruchroboter integriert, um die Abläufe zu optimieren und eine bessere Synchronisation zu erreichen.

#### Anwendungsszenarien

Die im Projekt entwickelte robotergestützte Rückbaustrategie für Beton besitzt ein breites Potenzial für verschiedene Anwendungsszenarien in der Zukunft. Der Abbruchroboter kann mit verschiedenen Werkzeugen wie Trennschneidern, Sortiergreifern, Stahlscheren oder Bohrlafetten ausgestattet werden, was seine Anwendbarkeit in unterschiedlichen Situationen erweitert. Dies verspricht vielseitige Einsatzmöglichkeiten.

Durch die Entwicklung dieser Baurobotik-Lösung für den Betonrückbau strebt das ROBETON-Projekt an, sowohl die Effizienz als auch die Nachhaltigkeit im Baubereich zu erhöhen, indem traditionelle Rückbauprozesse durch innovative automatisierte Lösungen verbessert werden.

## Key Performance Indicators (KPI`s)

Zur Evaluation der Projektergebnisse wurden folgende Indikatoren festgelegt, anhand derer das Projekt entwickelt wurde:

- Die Genauigkeit der Rückbautätigkeiten sollen um 4-5% gesteigert werden. Hierbei gilt die gesamte Prozesskette zu betrachten (Ausmessen der Bauteilposition, Platzieren der Säge). Dabei soll der Aufwand für einen Schnitt um min. 15% reduziert werden zu dem herkömmlichen manuellen Verfahren.
- Die Arbeiterinnen und Arbeiter sollen im Vergleich zu den aktuell manuell geprägten Verfahren für die Gewinnung von Betonbauteilen durch den Einsatz von Automation 20% schneller Arbeiten können.
- In Bezug auf die Arbeitssicherheit sollen sich die Bedienerinnen und Bedienern während der Arbeit sicherer fühlen, hierbei sei hervorzuheben, dass sich die Arbeitssicherheit auch auf Punkte wie, Staubentwicklung, Lärmentwicklung bezieht.

Zur Evaluation der gesetzten KPI`s werden Versuche auf der Referenzbaustelle in Aachen getätigt. Zum Vergleich der Ergebnisse werden hierfür die manuellen Prozesse mit Fachpersonal von Hilti durchgeführt. Im Weiteren werden die Ergebnisse der Automation mit dem Fachpersonal aus Baufirmen herangezogen.

## Entwicklung der Anwendungsszenarien

### Methodischer Ansatz

Die Zusammenarbeit mit Partnern aus der Baupraxis und der Bauforschung gewährleistet, dass das Projekt sowohl in der Baupraxis als auch in der Forschung verankert ist. In diesem Zusammenhang wurden im ersten Arbeitspaket verschiedene Arbeitsgruppen eingesetzt, um die Herausforderungen und möglichen Anwendungsbereiche, die sich durch ein solches Verfahren ergeben, zu identifizieren.

Der Schneidprozess darf nur von geschultem Personal durchgeführt werden. Das IP-Team wurde von Mitarbeitern von Hilti gezielt geschult. Die Ausbildung ermöglichte die Identifikation spezifischer Praxisprozesse, die als Grundlage für die weitere Entwicklung des Endeffektors dienten. Dazu zählen die Angriffsfläche, die Prozesskräfte und die Handhabung des Sägemotors.

Die gewonnenen Daten bildeten die Grundlage für die Vortests, um die statische Anpresskraft des BROKKs 170 zu ermitteln. Sämtliche Erkenntnisse wurden in das Lastenheft eingearbeitet, aus dem ein umfassender Anforderungskatalog erstellt wurde.

Die Entwicklung der Steuerung des (teil-)automatisierten BROKK 170 und die Konzeption des Sägeendeffektors wurden eng aufeinander abgestimmt. Dabei ist darauf zu achten, die Grenzen beider Systeme auszugleichen. Diese Anforderungen ergeben sich aus der begrenzten Genauigkeit der Hydrauliksteuerung sowie den erforderlichen Schnittgenauigkeiten der Säge, die sich aus dem Prozess (siehe DIN 18052) und den Herstelleranforderungen ergeben.

Der BROKK 170 wurde mit Sensortechnik ausgestattet, um den Schneidprozess zu erfassen und einen prozessangepassten Bewegungspfad zur Platzierung des Endeffektors zu generieren.

Zur Befestigung der Säge an der Baumaschine ist eine Vorrichtung erforderlich, die den Anforderungen an die Prozesskräfte und denen der Säge standhält. Zwei Konzepte wurden entwickelt und umgesetzt. Hierbei konnten mithilfe von FEM zwei Endeffektoren entwickelt werden, welche die gesetzten Anforderungen erfüllen, ohne während des späteren Verfahrens Fehlverhalten zu riskieren. Beide Endeffektoren wurden direkt in der werkseigenen Lehrstuhlwerkstatt angefertigt. Trotz ausgiebiger Vorabentwicklung müssen bei der Entwicklung des Verfahrens und der Säge Tests unter realen Bedingungen durchgeführt werden. Dabei wurden Themen wie das Absenken der Hydraulik beim Schneiden, die Anpresskraft und die Stabilität der Sägekonstruktion direkt getestet. Auf diese Weise konnten Änderungen direkt vorgenommen und eingearbeitet werden. Gerade bei der Aktuatorik ist präzises Arbeiten gefragt, um einen späteren reibungslosen Ablauf des Prozesses zu gewährleisten.

Um eine reibungslose Interaktion beider Systeme zu gewährleisten, wurde die Steuerung beider Geräte im Robot Operation System (ROS) entwickelt. Hiermit lassen sich die Bewegungen und die Steuerung beider Systeme direkt aufeinander abstimmen.

Beide Systeme konnten auf der Referenzbaustelle in Aachen unter realen Baustellenbedingungen erfolgreich getestet werden. Dazu wurde eigens ein Teststand entwickelt und gefertigt, mit dem sich unterschiedliche Wandkonfigurationen aufbauen lassen.

Parallel zur Entwicklungsarbeit wurden die Zwischenergebnisse genutzt, um sie einem breiten Publikum aus Fachleuten (BDA) und an Bau Interessierten (Bau München und Bauma München) zu präsentieren. Studierende des Masterstudiengangs Bauwesen und Robotik an der RWTH Aachen wurden in einzelne Herausforderungen, wie die Planung von Bauteilschnitten, mit einbezogen.

## Projektteam und Organisation, Kooperationspartner

Das Projektteam setzt sich aus Experten des Lehrstuhls für Individualisierte Bauproduktion der RWTH Aachen zusammen, die über umfangreiche Kompetenzen im Bereich Automatisierung, Prozesswissen und Herstellung verfügen. Diese Expertise bildet die Grundlage für die erfolgreiche Entwicklung des ROBETON-Prozesses. Parallel hierzu findet eine enge Kooperation zwischen folgenden Kooperationspartnern statt:

- Das Fachpersonal von Hilit wird in das Projekt involviert, um eine Einführung in die Sägeeinrichtung zu ermöglichen. Ihr Prozesswissen über manuelles Sägen wird genutzt, um die Entwicklung der automatisierten Lösung zu unterstützen. Zudem spielen sie eine entscheidende Rolle bei der späteren Bewertung der Ergebnisse, um sicherzustellen, dass die automatisierte Lösung den Anforderungen entspricht.
- Durch Fachgespräche mit renommierten Baufirmen wie PORR und Leonard Weiß werden Anwendungsfälle konzipiert. Diese Gespräche bieten wertvolle Einblicke in die realen Bedürfnisse und Herausforderungen im Baugewerbe und beeinflussen die Gestaltung des ROBETON-Prozesses.
- Die BROKK AG, als Hersteller der ferngesteuerten Abbruchmaschine BROKK 170, wird für die Automatisierungsunterstützung des Projekts eingebunden. Ihre Expertise im Bereich der Abbruchmaschinen trägt dazu bei, den Abbruchroboter erfolgreich zu entwickeln und zu optimieren.

Die enge Zusammenarbeit mit dem Projektteam, Fachpersonal, Baufirmen und Industriepartnern ermöglicht eine ganzheitliche Herangehensweise an die Entwicklung des ROBETON-Prozesses und stellt sicher, dass sowohl technische als auch praktische Aspekte berücksichtigt werden.

## Arbeitspakete und Meilensteine

Das ROBETON-Projekt ist in mehrere Arbeitspakete unterteilt, die sich in geordneter Abfolge auf die Entwicklung des (teil-)automatisierten Rückbauprozesses von Beton konzentrieren.

### Arbeitspaket 1: Anwendungsszenarien und Zielsystem

Dieses Arbeitspaket befasst sich mit der Erarbeitung der Grundlagen für das Projekt. Im ersten Arbeitsschritt (1.1) werden mindestens zwei Anwendungsszenarien für den (teil-)automatisierten Rückbauprozess von Beton erstellt. Diese Szenarien dienen als Leitfaden und werden mit den entsprechenden Rahmenbedingungen definiert. Im zweiten Arbeitsschritt (1.2) erfolgt die Spezifikation der Zielgrößen, die in den Anwendungsszenarien quantifiziert werden sollen.

### Meilenstein 1: Ausgearbeitete Anwendungsszenarien

Mit dem Abschluss von Arbeitspaket 1 wird der erste Meilenstein erreicht: Die Ausarbeitung der konkreten Anwendungsszenarien und die Definition der zugehörigen Zielgrößen.

### Arbeitspaket 2: Demonstratorkonzept

Hier wird das Konzept für den Demonstrator entworfen. Im ersten Arbeitsschritt (2.1) wird ein Referenzprozess zu den Anwendungsszenarien aus Arbeitspaket 1 beschrieben. Im zweiten Arbeitsschritt (2.2) werden die funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen spezifiziert, wobei die Zielgrößen berücksichtigt werden. Diese Anforderungen werden schließlich in ein Lastenheft aggregiert.

### Meilenstein 2: Ausgearbeitetes Demonstratorkonzept im Lastenheft

---

Mit dem Abschluss von Arbeitspaket 2 wird der zweite Meilenstein erreicht: Das ausgearbeitete Demonstratorkonzept im Lastenheft ist fertiggestellt.

#### Arbeitspaket 3: Entwicklung des Demonstrators

Dieses Arbeitspaket befasst sich mit der tatsächlichen Entwicklung der Technologien für den Demonstrator. Im ersten Arbeitsschritt (3.1) erfolgt die Entwicklung der Sensor- und Regelungstechnik zur präzisen und sicheren Handhabung von Betonbauteilen. Im zweiten Arbeitsschritt (3.2) wird die Schnittstellentechnik entwickelt und BIM-Informationen werden in die Bewegungsplanung des Demonstrators integriert.

#### Meilenstein 3: Entwicklung der Teilsysteme (Regelung, Schnittstelle, Sensorik) und Integrationskonzept

Der dritte Meilenstein wird erreicht, sobald die Teilsysteme für Regelung, Schnittstelle und Sensorik entwickelt und in ein Integrationskonzept eingebunden sind.

#### Arbeitspaket 4: Implementierung und Validierung

Hier erfolgt die Umsetzung und praktische Überprüfung des Demonstrators. Im ersten Arbeitsschritt (4.1) werden die Teilsysteme gemäß der Systemarchitektur aus Arbeitsschritt 2 zusammengeführt und in einer Laborumgebung erprobt. Im zweiten Arbeitsschritt (4.2) wird der Demonstrator auf der Referenzbaustelle Aachen Campus West pilotiert. Im dritten Arbeitsschritt (4.3) wird untersucht, wie die Projektergebnisse auf weitere Anwendungsszenarien übertragen werden können.

#### Meilenstein 4: Validierung des Gesamtdemonstrators in betriebsnaher Praxis und Konzeptfindung für den Ergebnistransfer auf weitere Anwendungsszenarien

Der vierte Meilenstein markiert die erfolgreiche Validierung des Gesamtdemonstrators und die Entwicklung eines Konzepts für den Ergebnistransfer auf weitere Anwendungsszenarien.

#### Arbeitspaket 5: Ergebnistransfer und ökonomische Validierung

In diesem abschließenden Arbeitspaket erfolgt der Transfer der Projektergebnisse auf weitere Anwendungsszenarien. Hierbei wird auch die ökonomische Validierung durchgeführt, um den wirtschaftlichen Nutzen der entwickelten Lösungen zu bestätigen.

## Projektverlauf

Die Entwicklung und die folgende Dokumentation des ROBETON-Prozesses richtet sich nach den genannten Arbeitspaketen. Diese gliedern sich in die zwei zentrale Hauptthemen auf, die eng miteinander verknüpft sind und gemeinsam das Fundament für eine effiziente Rückbaustrategie bilden:

- Der Entwicklung des (teil-) automatisierten Bauroboter, mit seinen, auf den Rückbauprozess, abgestimmten Funktionen. Das Ziel war es, den Roboter in der Lage zu versetzen, verschiedenartige Tätigkeiten eigenständig durchzuführen, wie zum Beispiel das Identifizieren von Betonbauteilen, das Platzieren der Sägevorrichtung, und der Stabilisierung des Schneidprozesses.
- Die Entwicklung einer hochpräzisen Sägevorrichtung, die in der Lage ist, Betonbauteile mit hoher Genauigkeit und minimalen Schäden herauszutrennen. Diese Vorrichtung wurde mit modernster Technologie ausgestattet, um den Roboter in die Lage zu versetzen, gezielt und schnell bei minimaler Erschütterung und Staubbildung Betonbauteile aus der Wand herauszutrennen.

In der Entwicklung des Prozesses werden verschiedene Gewinnungsprozesse evaluiert. Die entwickelten Ansätze werden im letzten Schritt anhand den gesetzten KPI's, um die Leistung und Effizienz der ROBETON-Anlage zu bewerten.

Praktische Tests im realen Umfeld: Die Bauroboter wurden in realen Rückbauszenarien eingesetzt, um ihre Leistungsfähigkeit unter realen Bedingungen auf der Referenzbaustelle in Aachen zu überprüfen. Dabei wurden verschiedene Aspekte wie Geschwindigkeit, Präzision, Robustheit und Zuverlässigkeit bewertet.

Vergleich mit manuellen Methoden: Die Leistung der ROBETON-Anlage wurde mit herkömmlichen manuellen Rückbaumethoden verglichen. Hierbei wurden Zeitaufwand, Ressourcenverbrauch und Ergebnisqualität betrachtet.

Qualitätskontrolle der herausgetrennten Betonbauteile: Die präzise Sägevorrichtung wurde in Bezug auf die Qualität der geschnittenen Betonbauteile überprüft. Maßgenauigkeit, Oberflächenbeschaffenheit und Integrität der Struktur wurden analysiert.

## Entwicklung der Anwendungsfälle

Im Folgenden werden die möglichen Anwendungsszenarien beschrieben. Dabei ist zu betonen, dass jede Baustelle ihre eigenen Herausforderungen hat.

### Anwendung 1: Herausschneiden von Betonteilen zur Wiederverwendung

Als erster Anwendungsfall wird das Herausschneiden von Betonteilen zur Wiederverwendung untersucht. Wie unten genauer beschrieben, übernimmt ein BROKK den Schneidprozess, der andere BROKK stabilisiert den Prozess und der Kran hebt das Bauteil heraus. Dabei muss der Zugang von oben gewährleistet sein. Das Ziel ist es, bestehende Gebäude als Ressource für Neubauten zu nutzen, indem Bauteile aus Wänden mittels des entwickelten Prozesses herausgeschnitten werden. In Rücksicht auf die maximalen Abmaße für den Prozess können die Bauteile in beliebiger und gewünschter Größe herausgeschnitten werden. Eine wichtige Frage ist jedoch, inwieweit der Zustand der Bauteile anschließend geprüft werden kann, ob diese die Anforderungen der Tragfähigkeit und der Gebrauchsfähigkeit nach der bisherigen Nutzung noch erfüllen. Diese Untersuchung ist nicht Teil des Forschungsprojekts.

Abbildung 3

Anwendung ROBETON Prozess für Ausschneiden von Betonteilen zur Wiederverwendung



## Anwendungsszenario 2: Rückbau von schadstoffbelasteten Materialien

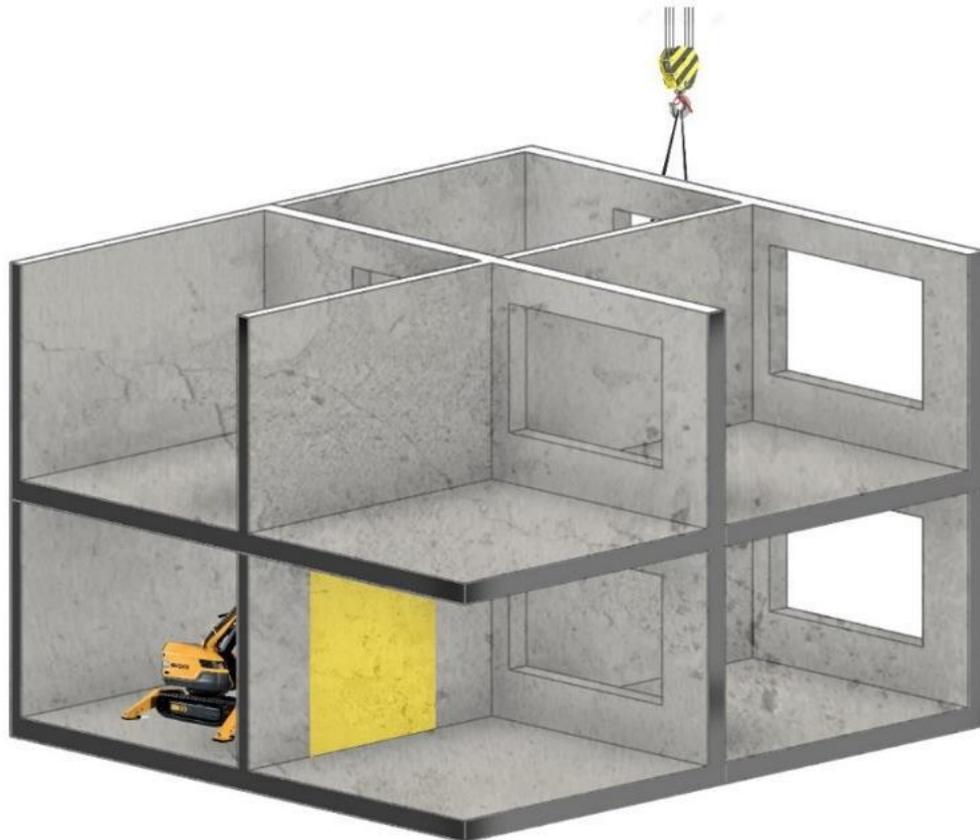
Ein weiterer Anwendungsfall für das entwickelte System in dem Projekt ROBETON ist der Rückbau von schadstoffbelasteten Materialien. Da dieser für die ausübenden Arbeitenden sehr gefährlich und gesundheitsschädigend ist, sodass viele Vorsichtsmaßnahmen getroffen werden müssen, bietet es sich an, diese Arbeiten zukünftig durch einen (teil-) automatisierten Rückbauprozess auszuführen. Da die Arbeiten von einer Maschine ausgeführt werden, besteht keine direkte Gefahr mehr für die Arbeitenden mit den belasteten Materialien in Berührung zu kommen.

## Anwendungsszenario 3: Änderung bestehender Gebäudestrukturen

Das dritte Anwendungsszenario beschreibt die Nutzung des entwickelten Systems für die Änderung des Layouts bestehender Gebäudestrukturen, in Abhängigkeit an die Anforderungen der Statik. Es können Öffnungen in Wänden hergestellt werden, um die Nutzung der Räume zu ändern (bspw. Von Industrie zu Wohnen). Es können jedoch auch Öffnungen für Fenster, Türen oder TGA Installationen vorgenommen werden. Da die Deckenkonstruktion in den meisten Fällen bestehen bleibt, ist der direkte Abtransport durch den Kran nicht möglich, sodass die Teile in kleineren Stücken herausgeschnitten werden müssten, um einen Transport innerhalb des Gebäudes zu realisieren. Wenn die ausgebauten Teile nicht für den Wiedereinbau definiert werden, besteht keine Anforderung an die Überprüfung der Tragfähigkeit der Bauteile, sodass dieser Schritt nicht zu beachten ist.

Abbildung 4

Anwendung ROBETON Prozess für Ausschneiden von Betonteilen für Strukturveränderung



## Entwicklung der Sägevorrichtung

Für die Entwicklung des Demonstrators sind zunächst die Informationen und Anforderungen der einzelnen Komponenten zu erheben. Hierzu gehört der BROKK 170 und die Hilti Wandsäge. Die Anforderungen an die einzelnen Bauteile ergeben sich aus den Prozessabläufen und aus den schon bereits gesetzten Maschinen. Um die einzelnen Komponenten auszulegen und die verschiedenen Demonstratorkonzepte zu entwickeln, müssen die zu erwartenden Kräfte errechnet werden. Eine ausführliche Liste findet sich dem Anhang beigefügt.

### Gebaute Beispiele

Eine Reihe von gebauten Beispielen zeigen auf, dass das Thema Wiederverwendung von Betonbauteilen eine mögliche Alternative zu bestehenden Verfahren sein kann.

Abbildung 5  
(P)RECAST – Wiederverwendung von vorgefertigten Betonelementen



Quelle: <https://www.dti.dk/projects/p-recast/43887>

Das Hauptziel des Projekts ist es, die Wiederverwendung von vollständigen vorgefertigten Betonelementen aus bestehenden Gebäuden in neuen Bauprojekten zu ermöglichen, wodurch innovative Bauelemente mit einem geringen CO<sub>2</sub>-Fußabdruck und einer effizienten Ressourcennutzung eingeführt werden sollen.

Konkret verfolgt das Projekt folgende Ziele:

Zunächst sollen durch die Entwicklung neuer Methoden für sorgfältiges Zerlegen und einer innovativen Methodik zur Bestimmung der erforderlichen Eigenschaften und Tragfähigkeit ein Konzept erarbeitet werden, das die Herstellung von wiederverwendeten vorgefertigten Betonelementen in hoher Qualität sicherstellt.

Des Weiteren sollen Methoden entwickelt werden, die die Integration von wiederverwendeten vorgefertigten Betonelementen als tragende Bauelemente ermöglichen. Hierbei werden neue

Verbindungselemente auf Basis von FEM-Modellierung und empirischer Forschung entwickelt und dokumentiert, sowie Methoden zur nahtlosen Einbindung der wiederverwendeten Elemente in die strukturelle Gestaltung erarbeitet.

Zudem wird an der Entwicklung neuer Baustellenmethoden gearbeitet, die die effektive Umsetzung von Strukturen basierend auf wiederverwendeten vorgefertigten Betonelementen ermöglichen.

Die Umsetzung der Wiederverwendung von vorgefertigten Betonelementen wird durch die Schaffung zuverlässiger Umweltdaten, die Ausarbeitung von Geschäftsmodellen für alle Beteiligten in der kreislauforientierten Wertschöpfungskette sowie die Durchführung von Demonstrationsprojekten angestrebt. Diese Projekte sollen klar aufzeigen, dass die Wiederverwendung von vorgefertigten Betonelementen ohne Einbußen bei Qualität und Sicherheit möglich ist <sup>6</sup>.

Abbildung 6  
Plattenpalast



Quelle: <https://www.rb.rwth-aachen.de/cms/RB/Studium/Veranstaltungen-Archiv/~digfg/Seminar-Kreislaufgerechte-Konstruktionen/>

Das Projekt Plattenvereinigung 2009, welches durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) gefördert wurde, hatte sich zum Ziel gesetzt das Thema Ressourcenschutz in den öffentlichen Diskurs zu bringen. Hierfür wurden aus mehreren Plattengebäuden, welche zum Abriss standen, Bauteile gewonnen. Diese Bauteile wurden im Anschluss zu einem Beispielgebäude gefügt. Der Bau stand hierbei unter dem Motto „Lehrbaustellen“. Das Gebäude wurde als Bühne für unterschiedliche Bildungsformate genutzt <sup>50 49</sup>.

Die Bauteile, die aus den Plattengebäuden gewonnen wurden, konnten in der Fertigungshalle auf die finale Passform zugeschnitten werden. Hierbei kam eine mobile Betonsäge zum Einsatz, mit welcher die Bauteile passgerecht in manuell geführter Art zugesägt wurden <sup>60</sup>.

Abbildung 7

Re:Crete – Wiederverwendung von Betonelementen in neuen Strukturen: Ein Prototyp für eine Fußgängerbrücke



Quelle: <https://www.epfl.ch/schools/enac/recrete/>

Der Beitrag "Re:Crete – Wiederverwendung von Betonelementen in neuen Strukturen: Ein Prototyp für eine Fußgängerbrücke" präsentiert einen innovativen Design- und Bauansatz, der sich auf die Wiederverwendung von Beton- und Wandelementen aus alten Gebäuden konzentriert. Im Rahmen des Projekts wurde ein Prototyp entwickelt. Hierbei handelt es sich um einen 10 Meter langen vorgespannten segmentalen Bogen. Dieser Prototyp verwendet 25 wiedergewonnene Betonblöcke. Besonders betont der Re:Crete-Prototyp, dass die Integration von wiedergewonnenen RC-Elementen in neue tragende Systeme eine vergleichbare strukturelle Leistung erzielen kann wie der Einsatz neuer RC-Materialien. Darüber hinaus reduziert dieser Ansatz signifikant die Emissionen von Treibhausgasen. Die Arbeit erkennt die Herausforderungen dieses innovativen Designparadigmas an und geht auf Aspekte wie zeitliche Einschränkungen bei der Materialverfügbarkeit und Koordination während des Abbaus, Unsicherheiten hinsichtlich der detaillierten Materialzusammensetzung von wiedergewonnenen Elementen, die Verwendung von nicht individuell angepassten Querschnittseigenschaften und den Umgang mit erheblichen geometrischen Variationen in Lagerbestandselementen ein <sup>51</sup>.

## Bestandteile der Eignungsfeststellung

Ein zentraler Bestandteil für die Recyclierfähigkeit und den Wiedereinbau der gewonnenen Teile ist die Eignungsfeststellung nach dem Ausbau der Teile. Die genaue Betrachtung dieses Themas ist nicht Hauptbestandteil des Forschungsprojekts, dennoch wurde eine Recherche hinsichtlich der erforderlichen Untersuchungsstufen für die abschließende Eignungsfeststellung unternommen:

**1.Voruntersuchung:** Zugänglichkeit und Demontage der Betonteile. Hierzu sind alle verfügbaren Projektunterlagen des Altgebäudes, historische bautechnische Fakten und typische Konstruktionsmerkmale sowie die örtlichen Verhältnisse zu bewerten.

**2.Eignungsprüfung:** Die zweite Stufe der Eignungsuntersuchung dient der Beurteilung des Bauzustands der Betonfertigteile und einer vorläufigen Bewertung dieser bezüglich der Wiederverwendbarkeit. Hierzu sind aufbauend auf den Ergebnissen der visuellen Einschätzung im Rahmen der Ortsbegehung

Prüfkriterien festzulegen, mit deren Hilfe die Gebrauchseigenschaften der relevanten Fertigteile ermittelt und deren Restnutzungsdauer prognostiziert werden kann.

**3.Hauptprüfung:** Die dritte Stufe der Eignungsuntersuchung erfolgt im Wesentlichen nach der Demontage der Bauteile. In der Hauptprüfung werden hauptsächlich Beschädigungen oder Mängel, welche während des Demontageprozesses auftreten, erfasst und bewertet. Hierzu ist eine wiederholte und umfangreiche visuelle Begutachtung der einzelnen Elemente erforderlich.

**4.Zusatzprüfung:** In der vierten Stufe der Eignungsuntersuchung sollen Zustandsveränderungen der Bauteile aus Transport, Umschlag und Lagerung erfasst werden. Hierzu ist ebenfalls eine visuelle Einschätzung erforderlich. Hierbei ist insbesondere auf eine Vergrößerung oder Neubildung von Rissen zu achten. Dies muss dokumentiert und entsprechend nachgearbeitet werden <sup>4</sup>.

### Ermittlung der Prozesskräfte der Säge

Für die Auslegung der Haltevorrichtung der Säge, müssen die Kräfte im Schneideprozess ermittelt werden. Dies dient als Grundlage für die weitere Entwicklung der Sägehalterung an dem BROKK 170. Im Hinblick auf das hohe Sicherheitsrisiko, welches durch den Einsatz der Wandsäge unter Vollast auftritt, muss ein besonderer Fokus auf die möglichen Sicherheitsrisiken gelegt werden. Leider gibt es für die Wandsäge keine genauen Angaben in Hinblick auf maximale Belastungswerte. Hierfür wurden eine Reihe an Vortests zur Ermittlung der Kraftwerte durchgeführt

Aus der Sägeschulung konnten mit den Fachkräften von Hilti die kritischen Lastfälle ermittelt werden. Als kritisch gilt hier, wenn das Sägeblatt bei Höchstgeschwindigkeit durch einen externen Einfluss abgebremst wird. Ein solcher Lastfall kann auftreten, wenn sich die Bewehrung im Beton zwischen das Sägeblatt und Schnitt klemmt, der Schwung des Sägeblatts wird dann schlagartig freigesetzt. Dabei ist die Abbremszeit größer als 1 Sekunde.

Abbildung 8  
Hilti Säge (DST-20-CA-01) beim Schneiden einer Betonplatte

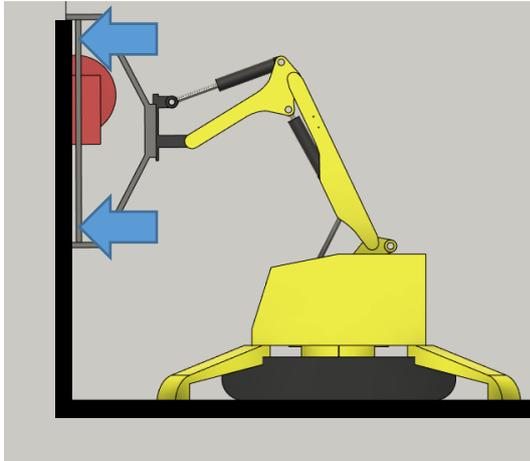


Aus den Abmessungen der Säge und den gegebenen Leistungsdaten wurde ein dynamisches Modell entwickelt, in das die oben beschriebenen Leistungsdaten eingegeben wurden. Die Daten wurden in Excel in eine parametrische Abhängigkeit zueinander gesetzt, mit dem Ziel, dass für die einzelnen Prozesse mit ihren individuellen Schnittgeschwindigkeiten die Prozesskräfte ermittelt werden können.

Zur Evaluation der rechnerisch ermittelten Kräfte wurde ein Teststand entwickelt, der über Kraftmesser die Prozesskräfte der Säge im laufenden Prozess ermitteln kann. Diese Daten helfen, die errechneten Werte zu evaluieren.

Für die Auslegung des Schneideprozesses, wurde untersucht, welche Druckkräfte der BROKK 170 auf eine Wand ausüben kann, um zu schauen, ob die Abbruchmaschine die Säge stabilisieren kann. Hierfür wurde ein kinematisches Modell aufgestellt, über welches die unterschiedlichen Ausrichtungen des BROKKS untersucht werden können. Anschließend wurde dieses Modell anhand von echten Tests evaluiert.

Abbildung 9  
Statisches Modell des Konzepts, jeder der Pfeile 8,5KN



Für die Aufstellung des kinematischen Modells wurden die Abmessungen aus dem CAD Modell des Abbruchroboters genommen (siehe Abbildung 8). Für die Kräfte der einzelnen Hydraulikkolben, wurden der Systemdruck und die Zylinderdurchmesser aus dem Datenblatt entnommen. Zur Evaluation der ermittelten Ergebnisse wurden eine Reihe an Drucktests mit dem BROKK 170 vorgenommen.

Hierfür wurde ein Drucksensor mit der Adapterplatte des BROKKS 170 verschraubt. Mit maximaler Kraft wurde der Drucksensor auf eine Wand gedrückt. Die Daten wurden mitgeschrieben und entsprechend ausgewertet. (Siehe Tabelle 3)

Tabelle 2  
Testergebnisse Drucktests BROKK 170

Test NR.	Angriffshöhe	Maximale Kraft in KN	Anmerkung
1	1m	7,16 KN	BROKK drückt sich von der Wand ab
2	1,5m	18,56 KN	BROKK bewegt sich an der Leistungsgrenze
3	2m	10,93 KN	BROKK hebt seinen vorderen Teil vom Boden ab

### Anforderungen für Entwicklung Sägevorrichtung

Dieses Anforderungskonzept beschreibt die spezifischen Anforderungen für die Entwicklung der Sägevorrichtung, welche sich aus der gesammelten Erfahrung aus den manuellen Tests, aus den Hardwareanforderungen der Hilti-Säge, der BROKK Maschine und den Gewinnungsprozessen der Betonbauteilen ableiten.

Folgende Punkte wurden für die Entwicklung der Sägevorrichtung in Betracht gezogen.

Tabelle 3  
Anforderungsliste

Nr.	Beschreibung	Wert	Bemerkung
<b>Anforderung an die Mechanik</b>			
1	Max. Außenmaße	220cm Länge	Ergibt sich aus max. Gewicht wie lang Hebel bei geforderter Anpresskraft sein darf
2	Anschluss Strom (Verbindung BROKK/Säge)	32 A	
3	Anschluss Hydraulik (Verbindung Drehgelenk/ BROKK)		
4	Anschluss mechanisch (Verbindung BROKK/ Drehgelenk)		Muss dem max. Anpressdruck entsprechen
5	Anschluss Wasser für die Sägenkühlung		Gardena-Anschluss
6	Anschluss mechanisch (Verbindung Drehgelenk/Sägehalterung)		Beweglich zum Ausgleich von Wandungenauigkeiten
7	Schienenlänge	Max. 1,7m	
8	<b>Statische Kräfte:</b> Anpresskraft in y Richtung max. Gewicht	17 KN	Ergibt sich aus der geforderten Konsolenschraubenkraft von 8,5 KN pro Seite
9	<b>Schnittgenauigkeit von max 4mm</b>		Wenn diese nicht eingehalten wird, können Folgeschnitte nicht getätigt werden, weil das Sägeblatt blockiert
10	IP Schutz vor Wasser		

Nr.	Beschreibung	Wert	Bemerkung
<b>Sicherheit</b>			
11	<b>Unmittelbares Safe Life-Verhalten</b> kein Eingriff in bewegliche Teile möglich		
12	Sensorik zum Erkennen vom Ausfall der Anpresskraft		
13	Visuelles und auditorisches Feedback		
14	Leitungen dürfen nicht in die Säge kommen		
<b>Benutzung</b>			
15	Leichte Bedienbarkeit der Funktionen für nicht Fachpersonal		
16	Leicht von Staub und Schmutz zu reinigen		

## Verfahren zur Krafterkennung

Bauarbeitsplätze verzeichnen jedes Jahr eine hohe Anzahl schwerwiegender und sogar tödlicher Unfälle. Allein im Jahr 2020 ereigneten sich in Deutschland 51 tödliche Unfälle im Bereich Bauwesen, Hochbau und Bergbau <sup>18</sup>. Gleichzeitig zählt die Baustellenindustrie weltweit zu den am wenigsten digitalisierten Branchen <sup>3</sup>. Digitale Assistenzsysteme können Fahrer dabei unterstützen, Risiken zu erkennen, sei es durch Kollisionswarnungssysteme <sup>9</sup> oder durch das Erkennen von Hindernissen mittels eines Rückfahralarms <sup>58</sup>.

Die Verwendung von Sensoren zur Bestimmung der Gelenkpositionen von Baumaschinen ermöglicht die Entwicklung neuer Assistenzsysteme <sup>41</sup>. Insbesondere beim Schneiden und Entfernen von Beton entstehen hohe Prozesskräfte, die die Herausforderungen für den Bediener erhöhen <sup>34</sup>.

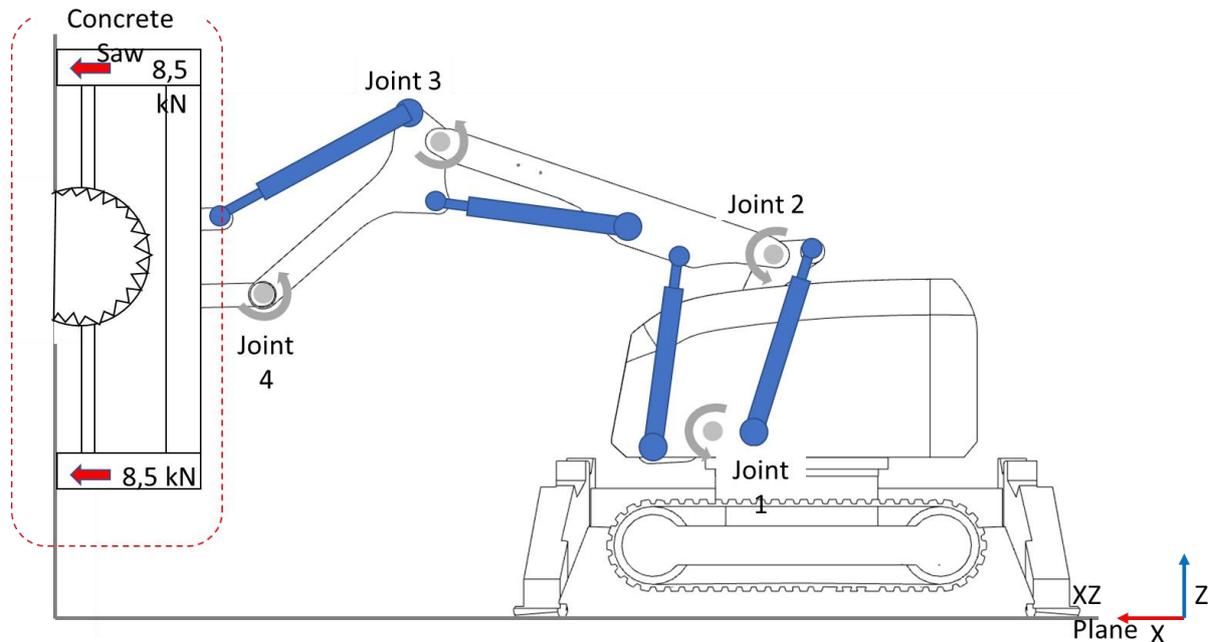
Beim Einsatz der Betonsäge von Hilti kommt es zu hohen Prozesskräften, die für die Arbeiterinnen und Arbeiter als auch für die Maschine zu gefährlichen Situationen bis hin zu schweren Unfällen kommen kann. Die Vorversuche zu den statischen Maschinenkräften des BROKK 170 haben aufgezeigt, dass die Baumaschine nur an bestimmten Positionen in ihrem Arbeitsbereich sicher den Sägeprozess stabilisieren kann.

Das Ziel ist die Entwicklung eines Planungstools, das basierend auf dem BROKK 170 und dem ROS-Framework, die statische Kraft der (teil-) halbautomatisierten Baumaschine frühzeitig ermittelt, und den Arbeiterinnen und Arbeiter bei der Planung und Bedienung des ROBETON-Prozesses der Baumaschine zu unterstützen. Dies ermöglicht die frühzeitige Erkennung potenziell gefährlicher Situationen im Prozess des Schneidens von Bauelementen.

## Entwicklung der Sicherheitsfunktion für den Schneideprozess

Abbildung 10

BROKK 170 mit Betonsäge, wobei die Betonsäge mit dem erforderlichen kombinierten Druck von 17 kN gegen die Wand gedrückt wird. Nur die Armgelenke (1,2,3,4) werden in der Kraft-Erreichbarkeits-Karte berücksichtigt. Der BROKK 170 kann nur Positionen in der XZ-Ebene erreichen



Grundlage für die Entwicklung der Sicherheitsfunktion ist Reuleaux <sup>40</sup>. Die Bibliothek Reuleaux ermöglicht es in ROS den Arbeitsraum von Kinematiken zu erfassen. Dabei werden sogenannte Erreichbarkeitskarten erstellt, anhand welcher die optimalen Positionen für bestimmte Bewegungsabfolgen gefunden werden können. In der Reuleaux-Bibliothek wurde für jeden Punkt ein Satz von Zielpositionen auf einer Kugel platziert, um die Erreichbarkeitskarte zu erstellen. Aufgrund des beschriebenen Anwendungsfalles wurde nur eine horizontale Zielposition in der XZ-Ebene der Maschine auf Erreichbarkeit "Gl. (1)" geprüft. Dabei sind die aktuellen Ergebnisse beschränkt auf die Erreichbarkeit, weitere Faktoren wie die statische Kraft etc. sind in der Bibliothek noch nicht implementiert. In Anlehnung an die Arbeit von Malaguti <sup>41</sup> zur Berechnung der statischen Kraft von Baumaschinen, ist das Ziel die beiden Funktionen in einer Kraft-Erreichbarkeits-Karte zusammenzuführen.

Die Entwicklung der Sicherheitsfunktion besteht aus den folgenden Schritten:

- Generierung der Erreichbarkeitskarte in ROS
- Hinzufügen der statischen Kraft an jedem Punkt der Erreichbarkeitskarte
- Visualisierung der Ergebnisse in Form einer Kraft-Erreichbarkeitskarte

## Erzeugung der Erreichbarkeitskarte

Zur Erzeugung der inversen Erreichbarkeitskarte auf Basis von Moveit, wurde ein vergleichbarer Ansatz zu Reuleaux gewählt. Hierbei wurden mittels eines inversen Planungsmodells des BROKKS 170 in Moveit/ROS in einem gesetzten Raster von 5cm, Zielpositionen vorgegeben, die durch den Planungsalgorithmus anschließend angefahren werden. Es werden für die Erreichbarkeitskarte nur die Armstellung betrachtet. Das Rotationsgelenk in der Base wird als statisch angenommen. Der Arm kann nur Bewegungen in 2 Dimensionen (XZ-Ebene) ausführen. Demzufolge werden auch nur Positionen in der XZ-Ebene betrachtet (siehe Abbildung 1). Die Kinematik des BROKKS 170 kann nur Positionen in der XZ-Ebene erreichen (siehe Abbildung 1), zudem werden in der späteren Kraftrechnung nur horizontale Positionen betrachtet. Die späteren Positionen sehen wie folgt aus:

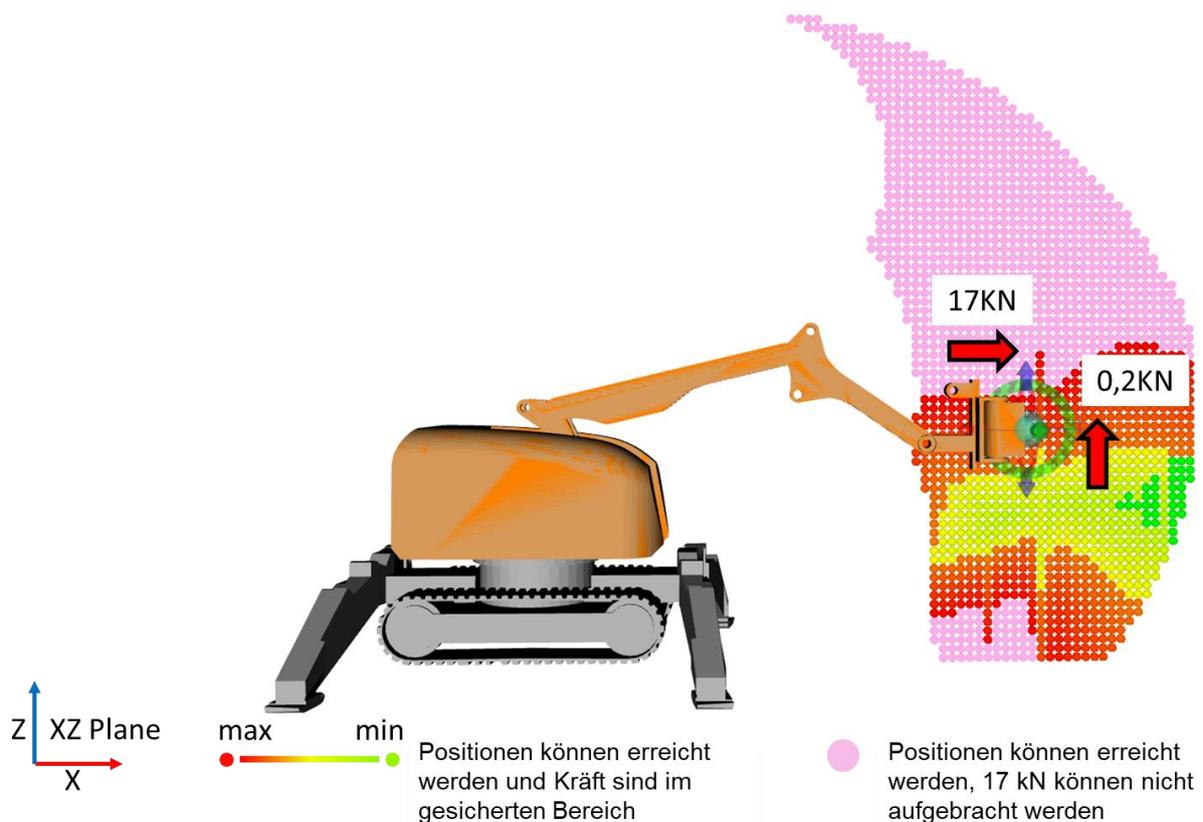
$$\text{Target Pose} = \{X_n, Y_0, Z_n, 1, 0, 0, 0\}$$

Die Ergebnisse dieser Bewegungsplanungen werden erfasst und eine Erreichbarkeitskarte erstellt, die die erreichbaren Positionen des Roboters in der XZ-Ebene darstellt. Zudem wird diese um die Gelenkstellung für die Berechnung der Kraftkarte ergänzt.

## Ermittlung der statischen Kräfte

Abbildung 11

Für die Ermittlung der statischen Prozesskräfte wurden, wie zuvor beschrieben, Kräfte  $F_H = 17 \text{ kN}$  und  $F_V = 0,2 \text{ kN}$  angenommen. Diese leiten sich aus der erforderlichen statischen Anpresskraft von  $17 \text{ kN}$  ab

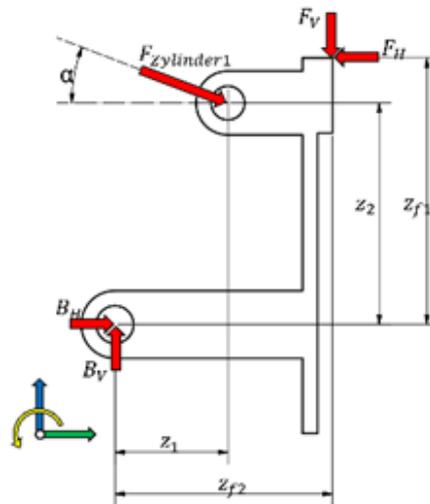


Zur Berechnung der statischen Kräfte der Hydraulikzylinder wird die notwendige Sollkraft des Endeffektors benötigt. Diese kann zum Beispiel eine notwendige Anpresskraft oder die Gewichtskraft eines zu tragenden Objektes sein.

Ist diese bekannt, können durch die Bestimmung des statischen Kräfte- und Momentengleichgewichts die für diese Position und Sollkräfte notwendigen Druckkräfte der Hydraulikzylinder der einzelnen Glieder bestimmt werden. Die weiteren Rechnungen folgen dem folgenden Beispiel.

Abbildung 12

$F_H$  horizontale Sollkraft,  $F_V$  vertikale Sollkraft,  $B_H$  horizontale Lagerkraft,  $B_V$  vertikale Lagerkraft,  $z_{f1}$  vertikaler Abstand zum Kraftangriffspunkt,  $z_{f2}$  horizontaler Abstand zum Kraftangriffspunkt,  $z_1$  horizontaler Abstand zum Zylinderangriffspunkt,  $z_2$  vertikaler Abstand zum Zylinderangriffspunkt,  $\alpha$  Winkel zwischen  $F_{Zylinder1}$  und der Horizontalen



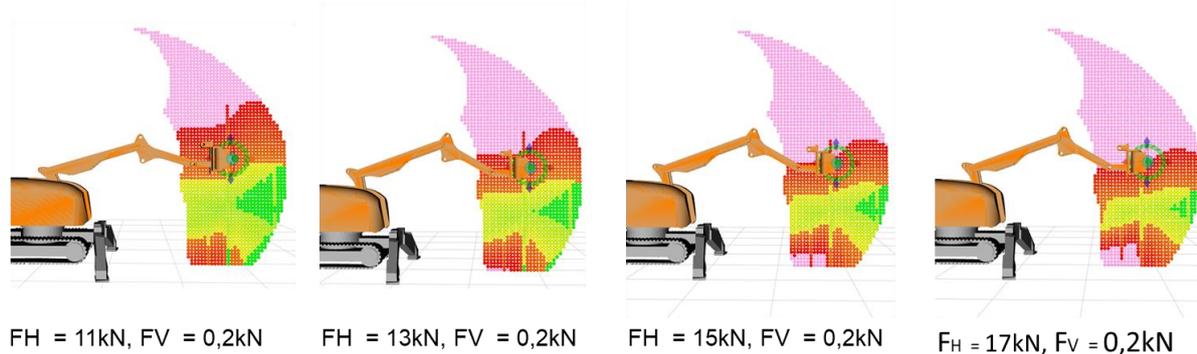
$$F_{cylinder1} = \frac{F_H z_{f1} - F_V z_{f2}}{z_2 \cos(\alpha) + z_1 \sin(\alpha)}$$

$$B_H = F_H - F_{cylinder1} \cos(\alpha)$$

$$B_V = F_V + F_{cylinder1} \sin(\alpha)$$

Durch dieses Vorgehen werden sukzessive alle Zylinderkräfte des Arms bestimmt. Anschließend werden die von den Zylindern aufzubringenden Kräfte verglichen und der höchstbelastete Zylinder bestimmt. Falls die hier notwendige Kraft die für den Zylinder mögliche Kraft übersteigt, ist diese Position mit der benötigten Endeffektorkraft nicht möglich. Durch Iteration aller erfassten Gelenkstellungen wird so die Erreichbarkeitskarte um die Kraftwerte ergänzt, die anschließend sowohl alle erreichbaren Positionen, sowie alle für die geforderten Kräfte zulässigen Positionen beinhaltet. Zur späteren farblichen Kennzeichnung der erreichbaren Positionen wird farblich unterschieden in Erreichbar, Kraftwert übersteigt zulässigen Wert (Lila). Erreichbar und Kraftwerte innerhalb des Sollwerts wird in der Farbrange Rot bis Grün dargestellt. Zur Berechnung der Farbwerte, wird als Grundlage der am stärksten belastete Zylinder extrahiert und anschließend wird die Auslastung auf die Farbskala angewandt (Rot = stark belastet, Grün = minimal belastet).

Abbildung 13  
Simulationsergebnisse mit unterschiedlichen Kraftkonfigurationen



### Experimental Evaluation

Zur Sicherung der Ergebnisse wurden die Simulationsergebnisse anhand von Experimenten mit der (teil-) automatisierten Baumaschine überprüft. Die Experimente evaluieren im ersten Schritt die Erreichbarkeitskarte und aufbauend darauf die Kraftkarte.

Zur Evaluation der erreichten Positionen wurden zehn Randpositionen aus den möglichen Positionen aus der Erreichbarkeitskarte mit dem BROKK angefahren und entsprechend erfasst. So konnte überprüft werden, ob die Position erreicht werden konnte und folglich, ob die Erreichbarkeitskarte mit der des (teil-) automatisierten Baumaschine übereinstimmt. Aufgrund der Größe der ermittelten Daten konnte nur eine Auswahl an Positionen überprüft werden.

Es zeigt sich, dass alle zehn Randpositionen mit dem BROKK 170 angefahren werden (Abbildung 14 Test mit dem BROKK 170 durchgeführt, getestet mit fünf zufällig ausgewählten Zielpositionen aus der Erreichbarkeitskarte)

Abbildung 14  
Test mit dem BROKK 170 durchgeführt, getestet mit fünf zufällig ausgewählten Zielpositionen aus der Erreichbarkeitskarte



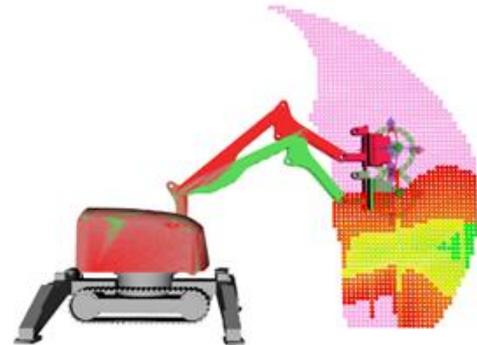
Um die in der Simulation berechneten Kraftwerte zu überprüfen, wurde eine Kraftmessdose am Endeffektor der Baumaschine (BROKK 170) montiert (siehe Abb. 6). Die horizontale Kraft auf den Endeffektor der Baumaschine wurde über das Messgerät (HBM U2B 100 kN) gemessen. Die Positionen wurden gewählt, um die Kraftfähigkeit des BROKK 170 zu testen:

- Position 1) resultierende Kraft ist  $> 17\text{ kN}$
- Position 2) die resultierende Kraft ist  $< 17\text{ kN}$

In der ersten Position erreichte der BROKK 170 einen statischen Druck von  $18,25\text{ kN}$ , in der zweiten Position wurden nur noch  $9,5\text{ kN}$  statischer Druck aufgebracht.

Abbildung 15

Test mit dem BROKK 170 durchgeführt, getestet mit fünf zufällig ausgewählten Zielpositionen aus der Erreichbarkeitskarte .



### Einordnung der Ergebnisse

Die vorliegende Ergebnisse skizzieren eine vielversprechende Möglichkeit, den Schneidprozess von Betonbauteilen sowohl für Mensch als auch für Maschine sicherer zu gestalten. Die erfolgreiche Implementierung des Algorithmus wird durch die Evaluation der Ergebnisse bestätigt. Allerdings offenbart die Erfassung mittels einer Kraftdose gewisse Beschränkungen in Bezug auf die Auswertung der Ergebnisse. Für eine umfassendere Auswertung der Kräfteinleitungskarte wäre eine direkte Messung des Zylinderdrucks erforderlich.

Die Erkenntnisse verdeutlichen, dass mit geringfügigen Anpassungen die Ergebnisse in die Planung und Durchführung des Schneidprozesses integriert werden können. Eine Erweiterung der Berechnungen um das Gewicht der Gelenke könnte die Genauigkeit der Simulation erhöhen.

Die Ergebnisse bilden den ersten Schritt in Richtung weiterer Assistenzsysteme, die den Fahrer einer Baumaschine kontinuierlich unterstützen können. Zukünftige Arbeiten könnten die Integration von Vibrationsfeedback in die Steuerungseinheit der Baumaschine vorsehen. Bei Überschreitung kritischer Schwellenwerte würde der Bediener durch das Feedback auf eine mögliche Überlastung aufmerksam gemacht werden. Die entwickelte Funktion könnte auf eine breitere Palette von Baumaschinen ausgedehnt werden. Durch die Integration von Werkzeugschnittstellen könnten auch Werkzeuginformationen ausgelesen werden, die in die Kraftanalyse einfließen könnten und das Personal entsprechend informieren würden <sup>44</sup>.

Die Kombination aus Erreichbarkeitskarten und Kraftinformationen kann zudem das Steuerpersonal dabei unterstützen, geeignete Aufstellorte für ferngesteuerte Maschinen schneller zu identifizieren. Dadurch könnten sowohl die Maschine geschont als auch Arbeitszeit eingespart werden.

Das Auslesen der Achspositionen eröffnet eine Grundlage für zukünftige Entwicklungen. Die Erfassung des Schwerpunkts und der Zylinderauslastung könnte ermöglichen, dass die Maschinensteuerung automatisch ein weiteres Bewegen der Achse in Richtung Gefahrenzone blockiert, um die Belastung für die Maschine zu minimieren. Dies würde die Sicherheit der Anwendung weiter verbessern.

## Entwicklung der Sägevorrichtung

Im Rahmen der Entwicklung der Sägevorrichtung wurden zwei verschiedene Endeffektoren konzipiert, die jeweils unterschiedliche Systemauslegungen aufweisen. Diese Variabilität in der Gestaltung ermöglicht eine gezielte Anpassung an die spezifischen Anforderungen des Schneidprozesses. Die Konstruktion der Vorrichtung wurde auf Grundlage der vorangegangenen Vortests sowie der ermittelten Kräfte und Belastungen entwickelt. Dabei wurden nicht nur technische Gesichtspunkte berücksichtigt, sondern auch die Machbarkeit der Fertigung der Bauteile in der hauseigenen Werkstatt des Lehrstuhls. Dieser Ansatz gewährleistet eine umfassende Betrachtung der praktischen Umsetzbarkeit im Hinblick auf die vorhandenen Ressourcen und technischen Kapazitäten.

### Bestimmung der Vergleichskraft und Einflussfaktoren

Der statische Bauteilfestigkeitsnachweis erfolgt angelehnt an die Rechnerischer Festigkeitsnachweis von Maschinenbauteilen (FKM) Richtlinie. Als Nennbelastung zur Konstruktion des Endeffektors dient die von Hilti bereitgestellte notwendige Mindestzugkraft für Befestigungselemente von 8,5 kN<sup>19</sup>.

Als Belastungsart wird eine niedrige, noch nicht näher bestimmte Grundlast angenommen, die stark von den Schnittprozessparametern abhängt und eine Belastungsspitze, welche nach Erfahrungsberichten durch Verkanten des Sägeblattes im Beton auftreten könnte. Die Höhe der Belastungsspitze ist zu diesem Zeitpunkt ebenfalls nicht näher bekannt, allerdings sollte sie in den internen Berechnungen des Sägeherstellers zur Bestimmung der notwendigen Mindestzugkraft enthalten sein. Diese Werte gilt es in den ersten Schnittversuchen zu bestimmen und zu validieren.

Bei dieser Belastungsspitze handelt es sich um die maximal zu erwartende Kraft im Schneidprozess durch eine Fehlfunktion, welche nur sehr selten auftreten sollte. Da keine allgemeingültigen Faktoren für die Berücksichtigung der Belastungsspitzen zur Verfügung stehen, kann nach<sup>61</sup> vereinfachend das Produkt aus Anwendungsfaktor  $K_A$  und Nennbelastung für den statischen Nachweis verwendet werden.

Der Anwendungsfaktor  $K_A$  wird<sup>61</sup> nach für schlagartige Beanspruchungen mit einem Bereich zwischen 2,0 und 3,0 angegeben. An dieser Stelle wird entschieden, einen eventuellen Fehler in die sichere Richtung zu begehen und auf den größten Wert des Bereichs zurückgegriffen.

Somit ergibt sich  $K_A$  zu 3,0.

Der Gesamtsicherheitsfaktor  $j_{ges}$  ergibt sich nach FKM – Richtlinie zu

$$j_{ges} = j_s \cdot j_f$$

mit

$$j_f = \max\left(\frac{j_m}{j_s} \frac{R_p}{R_m}; \frac{j_p}{j_s}\right)$$

$j_f$	Teilsicherheitsfaktor bezüglich des Materials
$j_s$	Teilsicherheitsfaktor bezüglich der Last
$j_m$	Teilsicherheit gegen Bruch

$j_p$	Teilsicherheit gegen Fließen
$R_p$	Fließgrenze
$R_m$	Zugfestigkeit

Der Teilsicherheitsfaktor bezüglich der Last  $j_s$  wird als 0,9 angenommen. Da bereits Sicherheitsfaktoren in den Herstellervorgaben enthalten sind und der Anwendungsfaktor vergleichsweise hoch angesetzt wird, sollte die Lastannahme als gesichert angenommen werden können. Dennoch wird hier zusätzlich aus Sicherheitsgründen ein geringer Teilsicherheitsfaktor hinzugefügt, um eventuelle Folgen durch falsche Lastannahmen zu verringern.

Die Teilsicherheitsfaktoren  $j_m$  und  $j_p$  ergeben sich nach FKM - Richtlinie für eine niedrige Auftretenswahrscheinlichkeit und hohe Schadensfolgen zu  $j_m = 1,8$  und  $j_p = 1,35$  aus der folgenden Tabelle:

Tabelle 4  
FKM Richtlinie <sup>52</sup>

$j_m   j_p$		Schadensfolgen		
		hoch	mittel	niedrig
Wahrscheinlichkeit des Auftretens	hoch	2,0   1,5	1,85   1,4	1,75   1,3
	niedrig	1,8   1,35	1,7   1,25	1,6   1,2

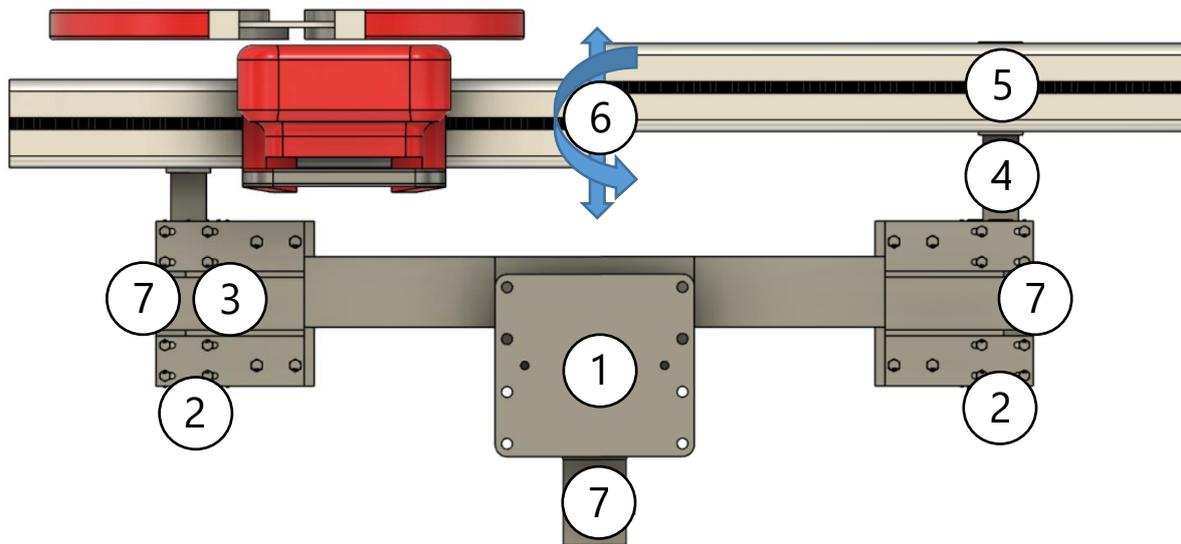
Für das verwendete Material S235 JR ergibt sich nach <sup>61</sup>  $R_p = 235 \text{ N/mm}^2$  und  $R_m = 360 \text{ N/mm}^2$ .

Somit ergibt sich ein Gesamtsicherheitsfaktor  $j_{ges}$  von 1,5. Diese Werte dienen im Weiteren zur konstruktiven Ausgestaltung des Endeffektors.

## Konzept des ersten Prototyps

Abbildung 16

Erster Endeffektor 1) Drehgelenk mit Bolzen gesichert 2) Motoren zur Feinanpassung der Linearführung der Hilti-Säge 3) Linearführung mit Gleitlagern 4) Stahlprofilarme zum Führen der Linearführung der Hilti-Säge 5) Gekürzte Konsolen zur Befestigung der Linearführung der Hilti-Säge und der Stahlprofilarme 6) Bewegungsmöglichkeiten der Linearführung (linear und rotatorisch) 7) Auflagerpunkte der Säge



Im Zuge der Optimierung von Sägeprozessen wurde ein spezifischer Endeffektor entwickelt, der eine Hilti Betonsäge trägt. Auf Basis einer ausführlichen Beratung mit Fachpersonal von Hilti wurde für das Design eine seitliche Sägenkonfiguration gewählt. Dies bedeutet konkret, dass die Adapterplatte des Brokks so positioniert ist, dass sie sich neben der Schiene befindet, wobei allerdings genug Abstand gewährleistet ist, damit die Säge an der Halteplatte vorbei manövrieren kann.

Ein Hauptmerkmal des Entwurfs ist die Linearführung der Säge, die über seitlich angreifende Stahlprofile realisiert wird. Diese Profile sind über vier Linearlager pro Seite mit dem Hauptgestell der Säge verbunden. Durch diese Verbindung entsteht ein stabiles System. Zusätzlich sind die Stahlprofilarme direkt an die Linearführung der Säge angeschlossen und werden mittels Steppermotor an die gewünschte Position gefahren, was eine präzise Feinanpassung des Systems ermöglicht.

Abbildung 17

Versuche mit dem ersten Endeffektor auf der Referenzbaustelle



Ein weiteres charakteristisches Merkmal dieses Endeffektors ist die Halteplatte, die über ein Kippgelenk mit dem Hauptgestell verbunden ist. Gemäß Konzeptzeichnung und weiterer technischer Ausführungen bietet diese Konfiguration mehrere Vorteile:

- Eine reduzierte Aufbauhöhe durch die seitliche Befestigung der Halteplatte.
- Die Möglichkeit, die volle Länge der Linearführung der Säge zu nutzen, da diese von unten angegriffen wird.
- Die beiden Stahlprofilarme, die für eine gute Beweglichkeit sorgen.

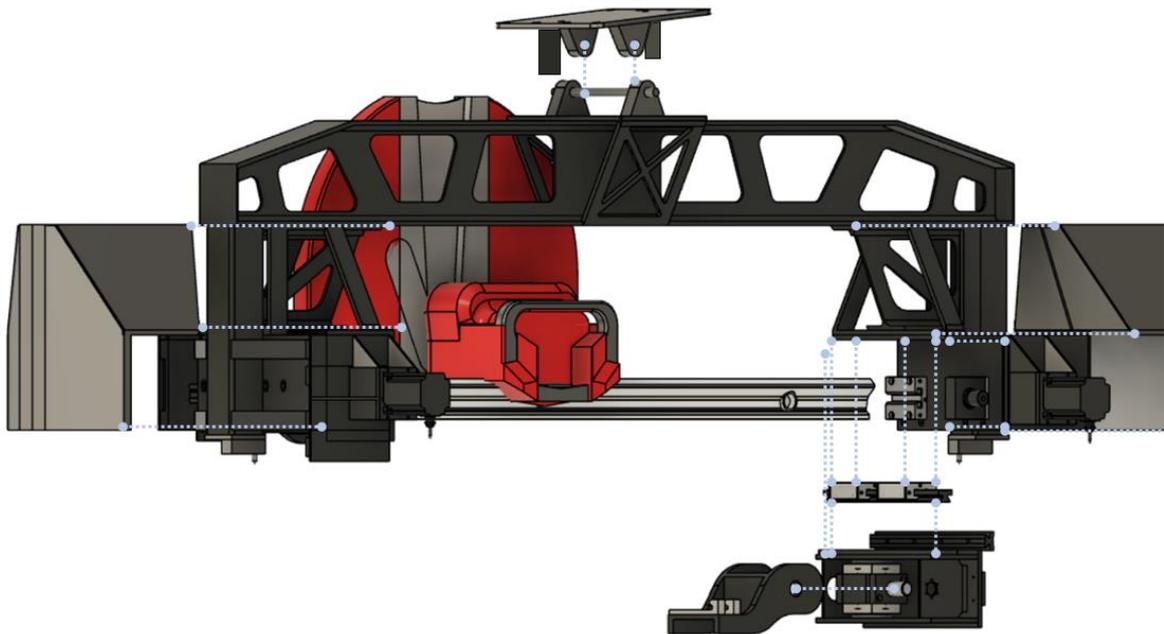
Allerdings gibt es auch Nachteile bei diesem Design:

- Ein großes seitliches Moment zwischen Säge und Halteplatte.
- Die Notwendigkeit, dass die Stahlprofilarme keinerlei Spiel aufweisen dürfen, um Vibrationen im System zu verhindern.
- Durch das untere Fassen der Linearführung der Säge wird die ursprünglich von der Hiltisäge vorgegebene Höhe der Sägenkonstruktion nicht eingehalten, wodurch die Schnitttiefe reduziert wird.

Tests zeigten, dass das Hauptgestell durch die drei Auflagepunkte stabil an der Wand sitzt. Die Stahlprofilarme und infolgedessen die Linearführung der Säge konnten mithilfe des Motors effizient bewegt werden. Dennoch, aus Sicherheitsbedenken wegen des seitlichen Moments, wurde entschieden, das Konzept weiterzuentwickeln.

## Konzept des zweiten Prototypens

Abbildung 17  
Explosionsgrafik des zweiten Endeffektors



Im Zuge der Weiterentwicklung wurde ein zweiter Sägenendeffektor für die Hilti Betonsäge konzipiert, dessen Design signifikant überarbeitet wurde, um den Hebel zwischen der Säge und der Halteplatte des BROKK 170 zu minimieren. Basierend auf der Konzeptzeichnung und den zuvor gesammelten Erfahrungen wurde die Säge vor der Halteplatte des BROKKs positioniert, wodurch seitliche Momente eliminiert wurden, die zuvor zu Verdrehungen des Arms führen konnten.

Das Rahmendesign basiert auf einem IPE 220-Profil, welches zur Gewichtsoptimierung modifiziert wurde. Im Unterschied zum ersten Endeffektor, der auf drei Kontaktpunkten auflag, verwendet dieser Endeffektor zwei Kraftsensoren als Auflageflächen, die an beiden Enden der Säge angebracht sind. Das bewegliche Gelenk zwischen der Halteplatte und dem Endeffektor wurde beibehalten. Zur Kontrolle der Bewegungen wurden seitlich zwei Gummidämpfer integriert, die den Bewegungsradius des Gelenks regulieren. Weiterhin ist eine Feinanpassung der Sägeposition über ein Linearsystem möglich. Hierbei können beide Enden der Linearachse der Säge bewegt werden. Hierdurch kann sich die Säge rotatorisch als auch translatorisch bewegen. Mit einer Länge von 220 cm bietet die Säge eine hohe Flexibilität in unterschiedlichen Einsatzsituationen.

Vorteile dieses Endeffektors sind:

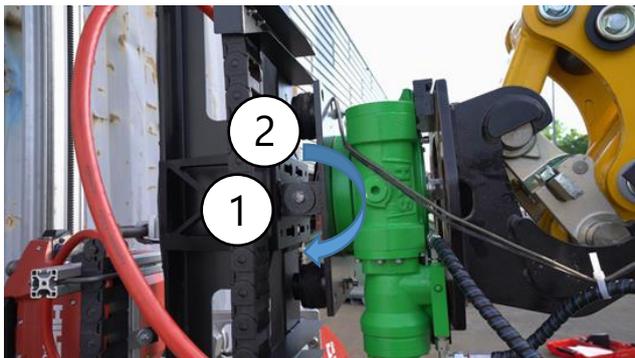
- Minimale Verdrehungen des BROKK 170-Arms
- Eine robustere Rahmenkonstruktion durch den Verzicht auf Lineararme, wodurch eine stabilere Führung und Kompensation von Schwingungen möglich ist
- Ein kompakteres Design
- Die Linearschiene befindet sich in einem optimalen Abstand zur Wand

Dennoch gibt es auch Nachteile:

- Eine erhöhte Bauhöhe, wodurch der BROKK eine größere Standfläche benötigt
- Die Linearschiene der Säge kann aufgrund der Endbefestigung nicht bis zur Wand geführt werden

Im Rahmen der durchgeführten Tests hat sich der überarbeitete Endeffektor als robust erwiesen. Die Linearführung ermöglicht die gewünschte Feinanpassung der Linearführung der Säge. Aufgrund der präzisen Konstruktion und geringen Toleranzen treten keine Schwingungen im System auf.

Abbildung 18  
Drehgelenk des Endeffektors 1) Drehgelenk mit Bolzen gesichert 2)  
Anpressfeder zur Dämpfung der Bewegung

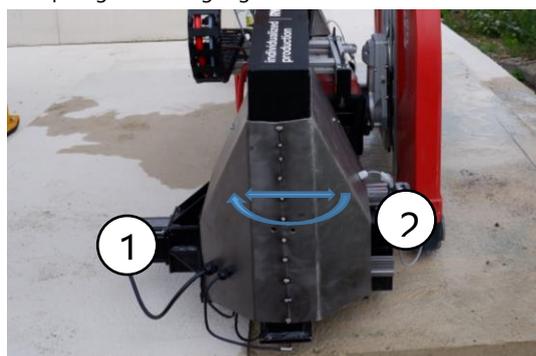


### Drehgelenk zum Kraftausgleich

Wie in dem Anforderungsbogen bestimmt, ist es von hoher Wichtigkeit, dass beide Auflagerpunkte der Säge während des Prozesses Kontakt zu der Betonoberfläche haben. Dabei reichen schon leichte Ungenauigkeiten in der Oberfläche aus, dass die ganze Last des Prozesses auf nur einem Auflager liegt. Dies kann der BROKK durch seine Steuerung nicht ausgleichen. Diesem unerwünschten Belastungsfall kann entgegen gewirkt werden, indem ein weiteres Gelenk in die Sägevorrichtung eingebaut wird.

Wie in der Abbildung 18 zu sehen, besteht das System aus einem Bolzen, welcher die Säge und die Halteplatte an dem Drehgelenk verbindet. Über den Bolzen lässt sich auch die Säge schnell von dem BROKK lösen. Damit die Säge, wenn sie bewegt wird, sich geführt um das Gelenk bewegt, bedarf es eine Dämpfereinheit. Diese ist so ausgelegt, dass die Bewegung um den Bolzen eingestellt werden kann.

Abbildung 19  
Linearsystem zum Bewegen der Sägeschiene 1) Stepper Motor zu  
Steuerung der Schienenkonstruktion 2) Anpressfeder zur  
Dämpfung der Bewegung

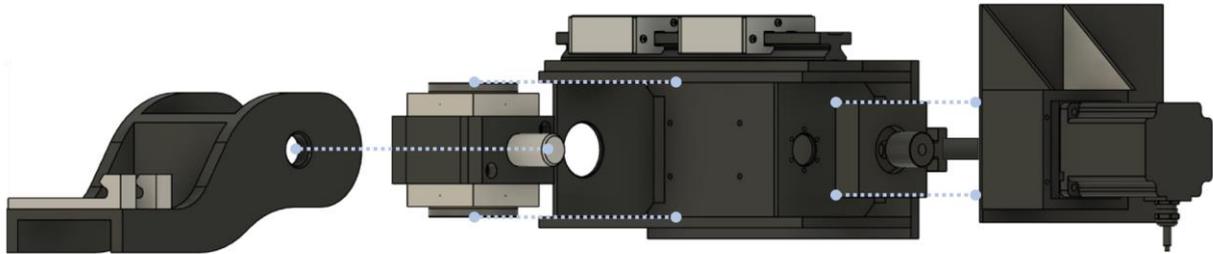


### Aktuatorik zum Positionsausgleich

Eine zentrale Funktion des Endeffektors, die von wesentlicher Bedeutung für einen erfolgreichen Einsatz auf der Baustelle ist, besteht in der Möglichkeit zur präzisen Ausrichtung der Sägeschiene. Hierfür wurde ein System entwickelt, das die Schiene auf beiden Seiten des Systems greift und stabilisiert. Die Konstruktion dieser Vorrichtung stellt eine anspruchsvolle Aufgabe dar, da die auftretenden Schnittkräfte durch die Linearführung übertragen werden müssen.

Die Sägevorrichtung ist so konzipiert, dass sie in der Lage ist, Ausgleichsbewegungen von bis zu 80 mm zu ermöglichen. Dies geschieht sowohl durch translatorische Bewegungen als auch durch rotatorische Bewegungen der Schiene. Für translatorische Bewegungen werden beide Motoren synchron gesteuert, während für rotatorische Bewegungen eine asynchrone Ansteuerung der Motoren erfolgt.

Abbildung 20  
Linearsystem zum Bewegen der Sägeschiene (Explosionsgrafik)



Die Rotationsbewegung erfordert auf der einen Seite ein losgelagertes Gelenk und auf der anderen Seite ein festgelagertes Gelenk. Die Schiene wird durch eigens entwickelte Schienenschuhe geführt, welche die Hilti-Schiene halten und mit der Gleitlagerkonstruktion verbinden. Für die Rotationsbewegung wurde ein separates Rotationslager in einem groß dimensionierten U-Profil integriert. Dieses U-Profil dient zur Befestigung der Linearschienen von der Firma Icus. Die Linearschienen sind über Führungswagen mit dem äußeren Rahmen verbunden. Diese Führungswagen bestehen aus Kunststofflagern, die besonders widerstandsfähig gegen Schmutz und Wasser sind. Jeweils vier Führungswagen sind auf jeder Seite der Konstruktion angebracht.

Die Bewegung der U-Profile erfolgt mithilfe von außenliegenden Nema 34 Schrittmotoren. Die Gewindemutter, die im U-Profil sitzt, verhindert seitliches Gleiten der U-Profile und somit auch der Schiene durch die Säge. Dies wird durch die Wahl einer geringen Gewindesteigung erreicht.

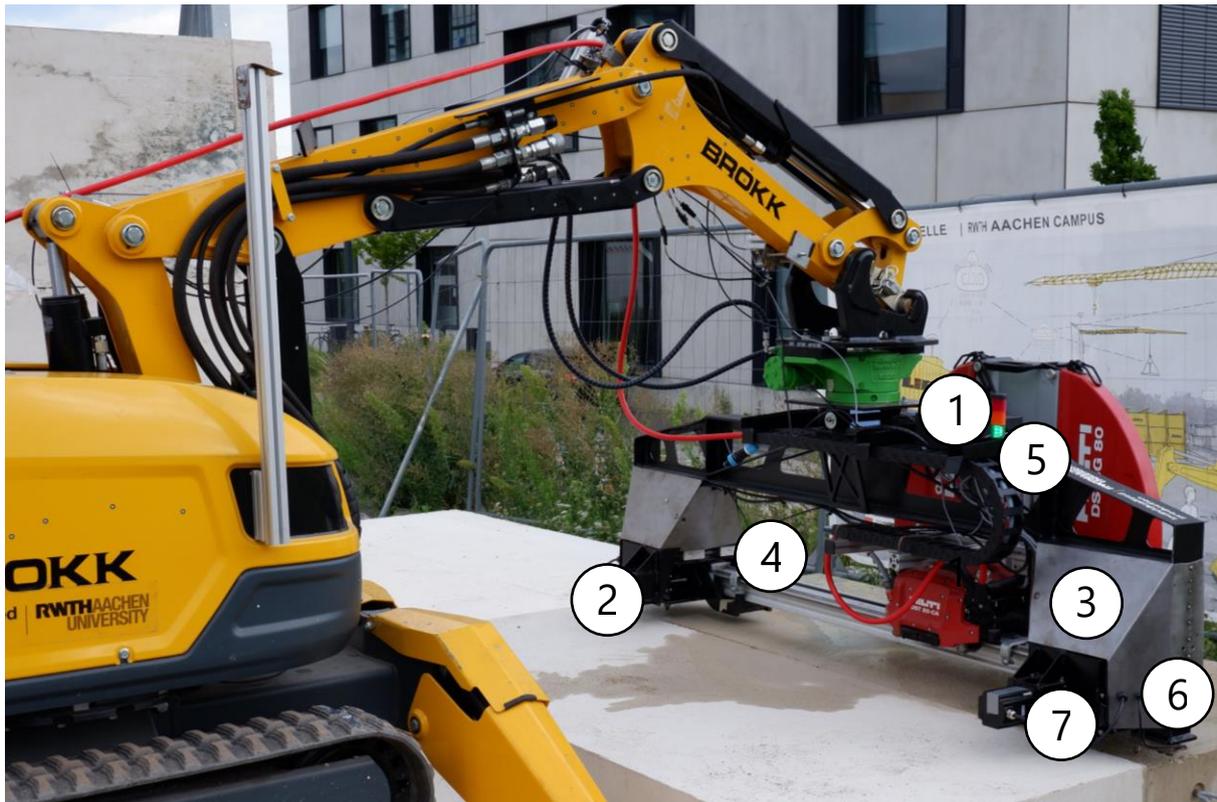
## Elektrische Steuerung der Betonsägevorrichtung

Wie schon im Abschnitt zur Auslegung und Entwicklung der Mechanik erläutert, ist neben der Elektronik der Hilti Säge auch die Struktur der Säge mit eigener Steuerung ausgestattet, diese dient nicht nur der Steuerung der beiden Stepper Motoren, sondern auch der Überwachung des Schneideprozesses zur Gewährleistung eines sicheren Schneidevorgangs.

Abbildung 21

Verbaute Steuerung, Sensorik und Aktuatorik

1) Steuerungskasten für die Mikrocontroller 2) Igus NEMA 34 Stepper Motoren 3) Igus Stepper Treiber 4) Laserempfänger 5) LED-Lichttampel zur Zustandsbeschreibung der Säge 6) Kraftsensoren 7) Endschalter zum Ausrichten der Lineartechnik



### Steuerungseinheit

Wie bereits im Abschnitt zur Auslegung und Entwicklung der Mechanik erläutert, wurde neben der Elektronik der Hilti Säge auch die Sägestruktur mit einer eigenen Steuerung ausgestattet. Diese Steuerung erfüllt nicht nur die Funktion der Steuerung der beiden Stepper Motoren, sondern überwacht auch den Schneideprozess, um einen sicheren Ablauf zu gewährleisten.

Die Steppersteuerung und Logik wird durch einen STM32-Mikrocontroller realisiert. Dieser STM32 übernimmt die logische Steuerung der Motoren sowie der LED-Lichttampel und empfängt die Steuerungsbefehle über das ROS-Framework. ROS Serial wird verwendet, um die Steuerungsbefehle zu senden und zu empfangen. Der STM32 veröffentlicht die Positionsdaten der Säge, sodass sie von anderen ROS-Komponenten genutzt werden können, und subscribt gleichzeitig auf die Steuerungsbefehle, um die Bewegungen der Säge zu steuern. Dieser bidirektionale Kommunikationsfluss ermöglicht eine präzise und reaktionsschnelle Steuerung des Schneideprozesses.

Die Laserempfänger werden über eine serielle Schnittstelle ausgelesen, und die gewonnenen Daten werden zur Steuerung des PID-Regelungssystems verwendet. Dieser Regelkreis dient dazu, die Schiene präzise auszurichten und die Abweichungen von der vorgegebenen Schnittlinie zu minimieren.

Die Integration des STM32-Mikrocontrollers in die Steuerung der Säge ermöglicht eine umfassende Kontrolle über den Schneideprozess und gewährleistet sowohl die Sicherheit als auch die Präzision der Sägeoperationen durch die enge Anbindung an das ROS-Framework.

### Motoren

Die Motorsteuerung stellt einen kritischen Aspekt im Betrieb von technischen Vorrichtungen dar. Bei diesem System werden Nema 34-Motoren verwendet, die über eine Schutzklasse von IP65 verfügen. Die integrierte Wellendichtung dient als Schutz gegen das Eindringen von Wasser, um die Funktionalität des Motors zu erhalten.

Die zugehörigen Treibereinheiten stammen von der Firma Icus. Um den Treiber vor Umwelteinflüssen zu schützen, ist er unter seitlichen Blechverkleidungen positioniert, was ihm einen Schutz vor dem Schnittwasser der Säge bietet.

Für die Steuerung der Motoren wird der STM 32 verwendet. Dieser nutzt die AccelStepper Library zur Implementierung der Motorsteuerungslogik. Es ist zu bemerken, dass diese Motoren in der Lage sind, die Vorrichtung in jeglicher Lage zu betreiben. Ein signifikantes Rastmoment von 0,21 Nm und ein Haltemoment von 5,9 Nm dienen dazu, ungewollte Bewegungen der Linearführung effektiv zu verhindern.

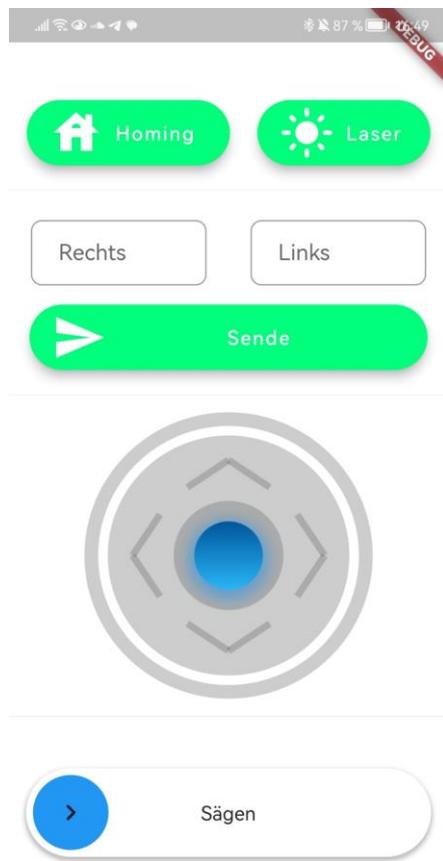
Die Startposition der Motoren wird durch an dem Rahmen des Endeffektors befestigten Endhalter gefunden. Somit kann ein Verrutschen der Start- und Endposition verhindert werden.

### Positionierungsvorrichtung der Säge

Die Ausrichtung der Säge spielt eine entscheidende Rolle für die spätere Akzeptanz der Sägevorrichtung. Die DIN 18202 Ebenheitstoleranzen von Bauteilen so darf z.B. ein 4m langes Bauteil keine größere Längenabweichung von bis zu 20mm haben. Die folgenden entwickelten Verfahren bauen auf dem Sägevorrichtungshardware auf, mit dem Ziel eines schnellen und toleranzgerechten Ausrichtungsverfahrens. Die Verfahren werden in dem Versuchsabschnitt auf der Referenzbaustelle miteinander verglichen.

## Steuerungsapplikation

Abbildung 22  
Handy-Applikation zur Steuerung der Säge



Um den einfachen Zugriff auf die entwickelten Positionierungsanwendungen zu ermöglichen, wurde eine benutzerfreundliche Android-App entwickelt. Diese App ermöglicht eine intuitive Steuerung der Betonsägevorrichtung und wurde mithilfe von Flutter<sup>2</sup> erstellt, einer plattformübergreifenden Entwicklungsumgebung für die Erstellung von Anwendungen.

Damit Anwender die App nutzen können, müssen sie sich im Netzwerk des BROKKS befinden, um eine Verbindung zur Sägevorrichtung herzustellen. Nach erfolgreicher Verbindung stehen den Benutzenden verschiedene Steuerungsfunktionen zur Verfügung, darunter das präzise Anfahren der Position, das Laser Grading sowie das Homing der Position. Ein wesentliches Sicherheitsfeature wurde ebenfalls in die App integriert, um versehentliche Bewegungen der Motoren während des Schneideprozesses zu verhindern. Dieses Feature blockiert die Motoren, um ungewollte Bewegungen zu unterbinden.

Die Android-App sendet Steuerungsdaten als JSON über das TCP-Protokoll an einen dedizierten TCP-Server. Dieser Server übersetzt die Steuerungsbefehle in ROS-Nachrichten und leitet sie direkt an die Betonsägevorrichtung weiter. Dies ermöglicht eine nahtlose Kommunikation zwischen der App und der Sägevorrichtung und gewährleistet eine präzise und zuverlässige Steuerung.

Die Anwendung wurde so entworfen, dass sie auch in anderen Netzwerken funktioniert. Dies ermöglicht eine flexible Anpassung an verschiedene Umgebungen, da die IP-Adresse konfiguriert werden kann. Bei wechselndem Netzwerk kann die Säge immer noch erreicht werden.

Damit die Säge nicht im Schneideprozess versehentlich angesteuert wird, muss die Säge in der App erst aktiviert werden. Auf diese Weise wird verhindert, dass versehentlich Positionen gesendet werden, die zu einem Unfall führen.

### Anfahren von direkten Positionen

Den beiden Motoren kann über ROS eine Position vorgegeben werden. Dies geschieht über ein ROS-topics. Hierfür kann an die ROS-topics (*position/motor1* und *position/motor2*) eine Position gesendet werden. Die Accelstepper Library, welche für die Motorsteuerung verwendet wird, nimmt die über ROS gesendeten Positionsinformationen entgegen. Nach Erhalt der Daten sorgt die Bibliothek dafür, dass die Motoren die gewünschten Positionen mit der entsprechenden Beschleunigungs- und Geschwindigkeitsprofilierung anfahren. Dies gewährleistet ein präzises und effizientes Erreichen der Zielpositionen in automatisierten Abläufen.

## Automatische Ausrichtung mittels weiterentwickelten Laser Grading

Laser Grading ist eine fortschrittliche Technologie, die in der Baubranche eingesetzt wird, um präzise Nivellierungs- und Planierungsarbeiten durchzuführen. Diese Technik nutzt Laserstrahlen, um die genaue Höhenposition eines Baumaschinen-Arbeitswerkzeugs zu bestimmen und entsprechende Anpassungen in Echtzeit vorzunehmen. Dies ermöglicht eine äußerst präzise Kontrolle der Geländeform und -ebenheit während Bau- und Planierungsprozessen.

Der Prozess beginnt mit der Installation eines rotierenden Lasers auf einem festen Punkt. Der Laserstrahl wird dann über das gesamte Baufeld projiziert. Baumaschinen wie z.B. Bulldozer sind mit Laserempfänger ausgestattet, die den Laserstrahl erfassen und die Höhenposition des Arbeitswerkzeugs kontinuierlich überwachen.

Abbildung 23  
Laserempfänger



Quelle:  
<https://www.bouwlasonline.nl/product/androtec-mtr-95rg/>

Die Informationen des Laserstrahls werden an ein Steuerungssystem in der Baumaschine übertragen, das die Position des Arbeitswerkzeugs relativ zur gewünschten Geländehöhe steuert. Dies ermöglicht eine präzise Anpassung des Geländes gemäß den vorgegebenen Plänen. Wenn die Baumaschine über den Boden fährt, wird das Arbeitswerkzeug automatisch angehoben oder abgesenkt, um den Boden auf die gewünschte Ebene zu planieren. Dieser Prozess erfolgt in Echtzeit und ermöglicht es, unmittelbar auf Geländeänderungen zu reagieren<sup>22</sup>.

Analog zu dem genannten Verfahren wurden zwei Laserempfänger (Androtec MTR-90RF) in der Betonsägevorrichtung integriert, um das Baustellenpersonal in die Lage zu versetzen, eine präzise Schnittlinie mittels Laser vorzugeben. Die beiden Laserempfänger geben über eine serielle Schnittstelle die Laserposition auf dem Laserempfänger wieder (siehe Abbildung 42 Finales Demonstratorkonzept). Diese vorgegebene Laserlinie wird von der Sägevorrichtung erkannt, woraufhin die Säge automatisch ausgerichtet wird, um die gewünschte Position zu erreichen. Die Laserempfänger sind in der Lage, die Position der gesetzten Laserlinie zu erfassen. Auf diese Weise kann die Abweichung der Ist-Position der Schienenführung ermittelt werden.

Die Schienenführung kann über zwei Motoren gesteuert werden, um sie so auszurichten, dass sie exakt der zuvor mit dem Laser gesetzten Linie entspricht. Um die beiden Motoren präzise zur gewünschten Position zu steuern, wurde ein PID-Regler (Proportional-Integral-Derivative) implementiert. Dieser Regler ermöglicht es, die Schienenführung mittels der Motoren kontinuierlich zu korrigieren und sie immer wieder zur Sollposition zu führen. Die PID-Regelung trägt dazu bei, die Schienenführung auf der genauen Linie zu halten und eventuelle Abweichungen zu minimieren.

In den Tests zeigt sich, dass die Position bis auf 2mm genau nachgeführt werden kann. Dies entspricht der geforderten Genauigkeit von max. 4mm (siehe Anforderungskatalog).

## Entwicklung der Steuerung für den BROKK 170

Die Rückbauarbeiten erfordern aufgrund ihrer schweren Einsatzbedingungen Aktuatoren mit hoher Robustheit, Zuverlässigkeit und der Fähigkeit, erheblichen Prozesskräften standzuhalten. Die Entwicklung eines robotergestützten Systems für derartige Aufgaben in Außenumgebungen erfordert bedeutende Aufwände. Zurzeit werden infolgedessen Rückbaumaschinen nach wie vor von menschlichen Bedienern direkt oder ferngesteuert, wobei sich der Bediener in der Nähe der Maschine befindet<sup>12</sup>. Dadurch werden die Bediener einer Reihe von Risiken ausgesetzt, die untrennbar mit der Baustelle verbunden sind. Dazu gehören Gefahren wie Staubbelastung, das Risiko von Unfällen durch die Nähe zu schweren Maschinen, Lärmbelastung und mögliche Materialfallen. Zusätzlich können Wetterbedingungen wie Regen, Wind oder extreme Temperaturen die Arbeitssituation erschweren und das Risiko von Verletzungen erhöhen. Der Umgang mit gefährlichen Materialien und Substanzen während des Rückbaus kann ebenfalls eine potenzielle Gesundheitsgefährdung darstellen. Es ist daher von entscheidender Bedeutung, geeignete Schutzmaßnahmen und Sicherheitsprotokolle zu implementieren, um die Bediener vor diesen potenziellen Risiken zu schützen und die Arbeitssicherheit zu gewährleisten.

Abbildung 24  
Konventionelle Fernsteuerung, wobei der Bediener sich in der Nähe der Maschine befindet<sup>32</sup>



Baumaschinenhersteller haben sich bis jetzt darauf konzentriert, Mängel, Komfort und Sicherheit zu verbessern, um die Aktuatoren der Maschinen in verschiedenen Situationen vielseitig einsetzbar zu machen. Dennoch werden diese Maschinen nach wie vor überwiegend von menschlichen Bedienern direkt oder aus der Ferne gesteuert, wobei der Bediener in der Nähe der Maschine steht (siehe Abbildung 24). Die Steuerung erfolgt über einzelne Joysticks oder Hebel auf Gelenkebene. Eine effektive Bedienung dieser Maschinen erfordert aufgrund ihrer vielen Freiheitsgrade und der komplexen Koordination mehrerer Gelenke eine umfangreiche Schulung<sup>33</sup>. Allerdings sind selbst erfahrene Bediener nach einer monatelangen Schulung von den täglichen Arbeitsbedingungen beeinflusst, was zu einer Abnahme der lokalen Genauigkeit und der Arbeitseffizienz führt<sup>53</sup>.

Um die Automatisierung auf Rückbaustellen voranzutreiben, liegt ein Fokus in der Forschung darauf, industrielle Roboter in die Bauprozesse zu integrieren. Ein solches System ist das Robotic Facade Disassembly and Refurbishment System (RFDRS)<sup>37</sup>, das einen robotergestützten Rückbauansatz mit Bewegungsprogrammierung verwendet, um das Zerlegen mehrschichtiger Fassadenstrukturen zu automatisieren. Traditionelle industrielle Roboter mit elektrisch betriebenen Manipulatoren haben jedoch Einschränkungen wie ein niedriges Nutzlast-Gewicht-Verhältnis und Anfälligkeit für Vibrationen und Stöße<sup>43</sup>. Folglich ist der Einsatz solcher Systeme auf bestimmte Arten von Arbeiten beschränkt, aufgrund dieser inhärenten Einschränkungen industrieller Roboter.

Aus diesem Grund hat die Idee, den Grad der Maschinenautonomie in vorhandenen schweren Baumaschinen zu erhöhen, das Interesse von Forschern geweckt<sup>31</sup>. Eine bemerkenswerte Studie von Lampinen et al. konzentriert sich darauf, einen Industriebrecherarm mit einem visuellen Wahrnehmungssystem aufzurüsten, um das Brechen von Steinen autonom zu ermöglichen<sup>30</sup>. Die Effektivität des Systems hängt jedoch stark von den autonomen Komponenten ab, insbesondere dem Visionssystem, für das 4733 Fotos von Feldtests zur Erkennung von Steinen benötigt wurden. Sie berichteten von einer Erfolgsrate von 34% bei der Steinertrümmerung.

Angesichts der bestehenden Herausforderungen und Anforderungen im Rückbau besteht eine wachsende Nachfrage nach alternativen Ansätzen zur Verbesserung der Maschinenautonomie. Derzeit erfüllt keine Roboterplattform vollständig die Anforderungen für kontrollierten und automatisierten Rückbau. Autonome Lösungen haben bei ähnlichen Baumaßnahmen verschiedene potenzielle Vorteile gezeigt<sup>26; 21</sup>. Ein systematischer Übergang zu einem semi-autonomen Ansatz wird als entscheidender Schritt zur weiteren Entwicklung des Rückbauprozesses betrachtet. Angesichts der dynamischen Natur der Aufgabe, bei der das Ziel kontinuierlich wechselt, sollte ein vollständig autonomer Roboter in der Lage sein, seine Umgebung zu verstehen und das am besten geeignete Ziel für die Rückbautätigkeiten entsprechend zu wählen. Durch die Integration von menschlichen Bedienern in den Steuerungsprozess und die Möglichkeit, interaktiv die Zielaktion festzulegen, kann die kognitive Belastung für Roboter reduziert werden. Gleichzeitig kann der Roboter die Zielaktion in präzise Steuerung und Koordination mehrerer Gelenke umwandeln und so die Sicherheit und Effizienz der Arbeiten gewährleisten. Diese Arbeit baut auf diesem Aspekt des semi-autonomen Ansatzes auf.

Im Gegensatz zu konventionellen Fernsteuerungsmethoden, bei denen der Bediener jedes Gelenk kontinuierlich steuern muss, ermöglicht das vorgeschlagene semi-autonome Konzept dem Bediener, den Roboter über ein abstraktes Ziel zu steuern. Durch die Festlegung der Zielaktion durch dieses Ziel werden die entsprechenden Gelenkbewegungen je nach verschiedenen Planungsergebnissen erzeugt, wie zum Beispiel das Bewegen des Hammers in Richtung des Ziels oder das Aktivieren der Hammerbewegung. Auf diese Weise entfällt die Notwendigkeit für die Bediener, die Abbruchmaschine im Detail zu steuern. Gleichzeitig wird die Kontrollierbarkeit und Sicherheit durch die Vorvisualisierung der geplanten Bewegung gewährleistet und die Bediener werden aus der unmittelbaren Nähe der Abbruchmaschine und der Baustelle entfernt.

Der Rest des Abschnitts ist wie folgt organisiert: zunächst stellen wir eine Liste grundlegender Hardware-Anpassungen vor, um eine normale ferngesteuerte Abbruchmaschine in einen programmierbaren Roboter umzuwandeln. Zweitens geben wir einen systematischen Überblick über den Informationsfluss zwischen jeder Komponente. Anschließend führen wir die Planungs- und Steuerungsalgorithmen ein, die eingesetzt werden, um die erforderlichen Fähigkeiten für den robotergestützten Rückbau zu erreichen. Der erste Teil zeigt die Entwicklung und die Ergebnisse der Rückbauarbeit mit einem Hammer. Dies resultiert daraus, dass die Weiterentwicklung der Abbruchmaschine in einen Roboter parallel zur Entwicklung der Sägevorrichtung erfolgte, und daher stand die Sägevorrichtung im ersten Teil des Projekts nicht zur Verfügung. In diesem Teil lag der Fokus der Arbeit darauf, die Kontrollierbarkeit während des Rückbaus und die Sicherheit für den Bediener zu gewährleisten. Im zweiten Teil des

Projekts, wird die weiterentwickelte Baumaschine weiterhin eingesetzt, jedoch mit der Sägevorrichtung, um die Betonteile selektiv für die Wiederverwendung zurückzubauen.

## Systemübersicht

In den folgenden Unterabschnitten beschreiben wir das Gesamtkonzept des semi-autonomen Ansatzes, gefolgt von der Hardwarebeschreibung und den erforderlichen Modifikationen.

### Konzept des semi-autonomen Ansatzes

Das Hauptziel der Entwicklung eines semi-autonomen Robotersystems besteht darin, die Sicherheit des Bedieners zu verbessern, indem seine direkte Exposition gegenüber gefährlichen Abbruchszenen minimiert wird und die Notwendigkeit einer ständigen manuellen Steuerung der Maschine auf Gelenkebene reduziert wird. Dieses Ziel entspricht dem Konzept autonomer Roboter, bei dem Aufgaben ohne menschliche Intervention ausgeführt werden. Allerdings führt die herausfordernde Natur von Baustellen, die dynamischen und komplexen Umgebungen mit zahlreichen Variablen wie wechselnden Bedingungen und menschlicher Präsenz sind, im Vergleich zu kontrollierten Produktionsanlagen zusätzliche Komplexitäten mit sich. Daher konzentriert sich unsere vorgeschlagene Lösung darauf, dem menschlichen Bediener die Definition von Zielaktion für den Roboter zu ermöglichen. Dadurch streben wir an, die kognitive Belastung des Roboters zu verringern, während wir die Sicherheit und die Gesamtsystemrobustheit verbessern.

Abbildung 25  
BROKK 170 (links) und die geometrische Darstellung der Gelenke (rechts) <sup>32</sup>

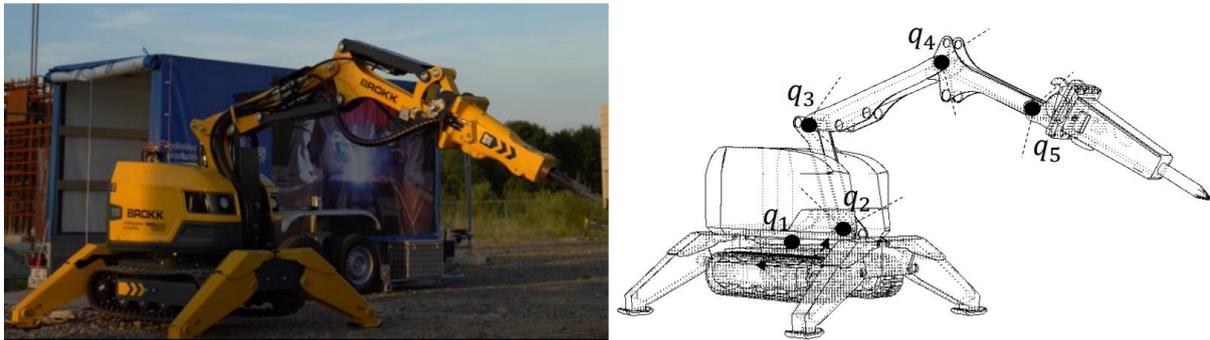
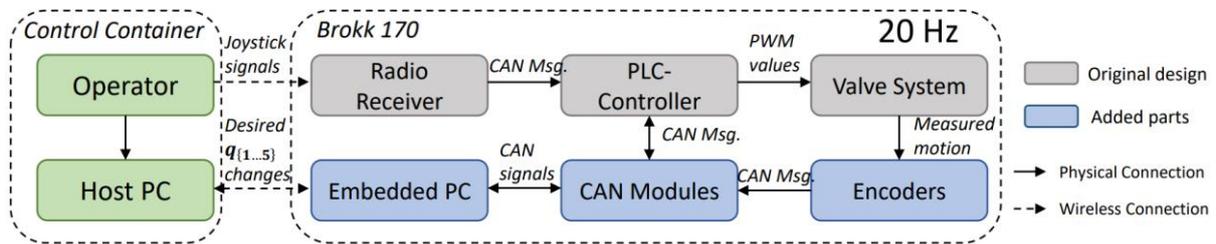


Abbildung 26

Schematische Systemübersicht der Kernkomponente des BROKK 170. Die Komponenten, die der ursprünglichen Maschine hinzugefügt wurden, sind blau dargestellt, während die bereits der Maschine gehörenden Komponenten in grau dargestellt sind.

32

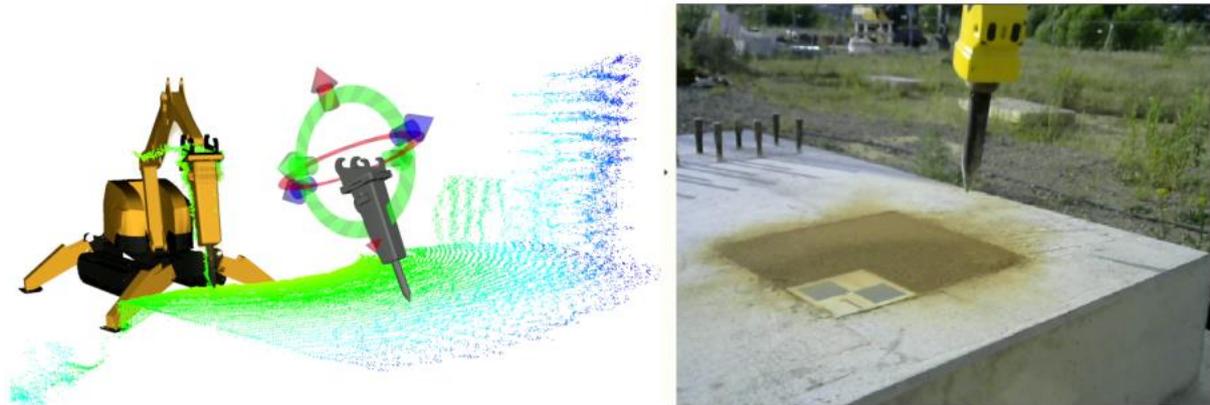


## BROKK 170

BROKK 170, die im Rahmen des Projekts in einen Roboter umgewandelt wird, nutzt wie auch andere moderne Baumaschinen, Komponenten wie Aktuatoren und Sensoren, die über einen Controller Area Network (CAN) Bus mit der Maschinensteuerungseinheit (MCU) verbunden sind. Wenn der Bediener Befehle über das Steuergerät, wie Joysticks, sendet, werden spezifische CAN-Nachrichten generiert und an den Programmable Logic Controller (PLC) Controller weitergeleitet, wo sie in entsprechende Pulsweitenmodulation (PWM) Signale mit spezifischen Spannungsebenen umgewandelt werden. Die Leistungselektronik empfängt diese Signale und steuert die mechanischen Komponenten der Maschine. Abbildung 26 veranschaulicht die ursprüngliche Hardware-Architektur (in grau) und die zusätzliche Hardware (in blau), die hinzugefügt wurde.

Um den Bedienern zu ermöglichen, die Abbruchmaschine für den semi-autonomen Abbruchprozess interaktiv zu programmieren, wird eine Kommunikationsverbindung mittels eines eingebetteten PCs, Jetson AGX Xavier, hergestellt. Dieser eingebettete PC ist mit einem CAN-Bus-Controller ausgestattet und fungiert als Brücke, die eingehende CAN-Bus-Nachrichten speichert und an den Controller des BROKK 170 weiterleitet. Diese Einrichtung erweitert die ursprüngliche Verbindung zwischen dem Steuergerät (z.B. Funkempfänger) und dem Controller, wie in Abbildung 26 gezeigt. Mit dieser Konfiguration kann die Maschine sowohl über die originalen Joystick-Signale ferngesteuert werden als auch Signale empfangen, die von Algorithmen berechnet werden, die im Programmmodus auf dem Host-PC implementiert sind. Diese berechneten Signale ermöglichen optimierte und kontrollierte Bewegungen. Der eingebettete PC kommuniziert drahtlos mit dem Host-PC und tauscht Maschinenzustände und visuelle Informationen des entfernten Arbeitsbereichs aus. Diese drahtlose Kommunikation erleichtert die interaktive Programmierung der Abbruchmaschine und ermöglicht eine semi-autonome Bedienung durch den Austausch von Informationen zwischen dem eingebetteten PC und dem Host-PC.

Abbildung 27  
Erfasste visuelle Information in 3D (links) und 2D (rechts) <sup>32</sup>



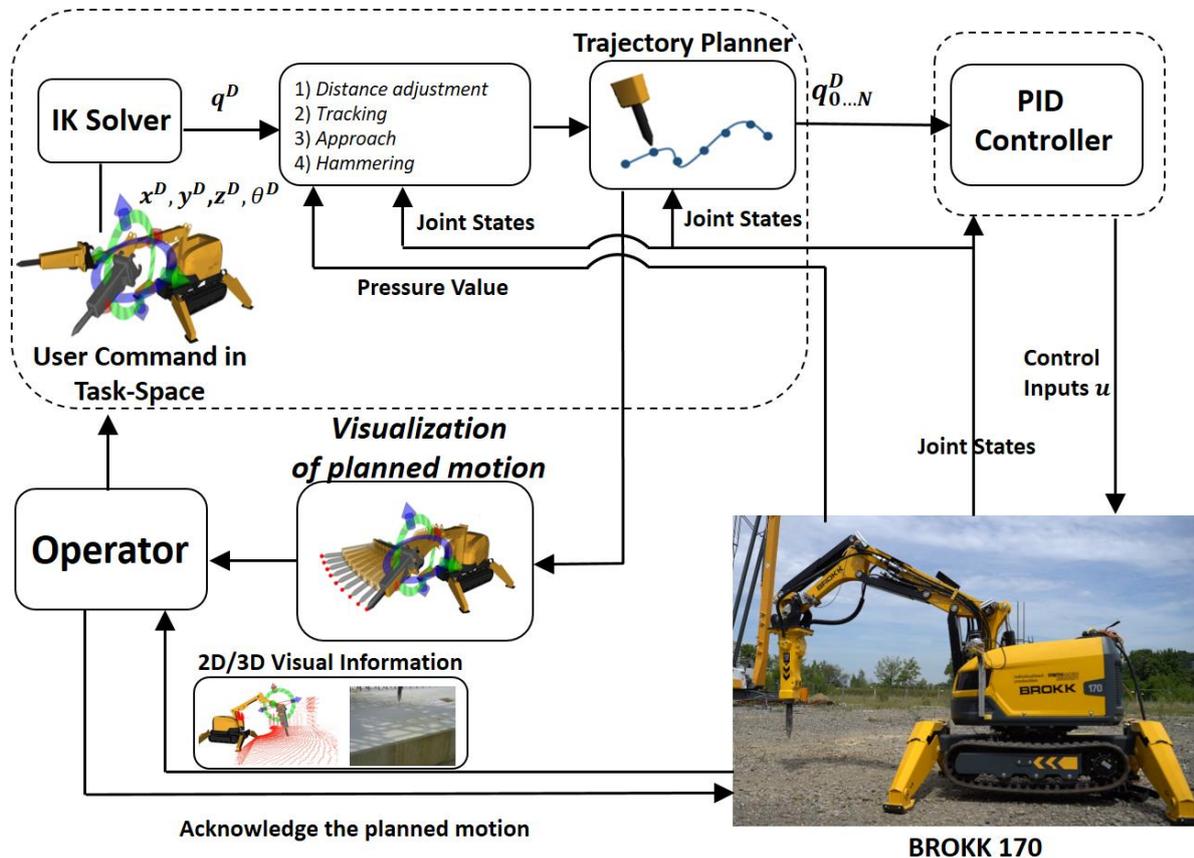
Zur Gewährleistung der Sicherheit des Bedieners wird dieser aus unmittelbarer Nähe der Abbruchmaschine und der Baustelle entfernt. Stattdessen beobachtet der Bediener den entfernten Arbeitsbereich mithilfe von visuellen Sensoren, die jeweils 3D-Punktwolken und 2D-Bilder erfassen. Der Mangel an Tiefenwahrnehmung in 2D-visuellen Informationen stellt Herausforderungen dar, um die räumlichen Beziehungen und Entfernungen in der Szene genau wahrzunehmen, siehe Abbildung 27. Durch die Nutzung von 3D-Visionsinformationen können die Bediener Tiefeninformationen ableiten, wodurch ihre kognitive Belastung verringert wird und potenzielle Fehler in ihrer Interpretation der Umgebung minimiert werden.

Die erfassten Daten werden drahtlos an den Bediener übertragen, wobei WLAN mit dem 802.11ac-Standard verwendet wird. Aufgrund der Datenmengenbegrenzung und der Einschränkungen des drahtlosen Netzwerks ist die Bildrate auf 2 Hz für 3D-Informationen und 25 Hz für 2D-Informationen begrenzt. Die Gesamtarchitektur des Systems, wie in Abbildung 28 dargestellt, bietet einen Überblick über die Komponenten und deren Interaktionen im vorgeschlagenen halbautonomen Abbruchsystem.

## Steuerungsverfahren

Abbildung 28

Systemarchitektur. Basierend auf den erfassten visuellen Informationen des Arbeitsbereichs definiert der Bediener die gewünschte Position für den Hammer, die vom Trajektorien-Controller in entsprechende Steuersignale umgewandelt wird. Die geplante Bewegung wird dem Bediener visualisiert und wird nur ausgeführt, wenn der Bediener sie bestätigt<sup>32</sup>



Der vorgeschlagene Ansatz (Abbildung 28) folgt einer Methodik, bei der sowohl der Bediener als auch der Roboter gleichzeitig der erfolgreichen Rückbauarbeit beisteuern können, anstatt sich ausschließlich auf Fernsteuerung oder volle Autonomie vom Roboter zu verlassen.

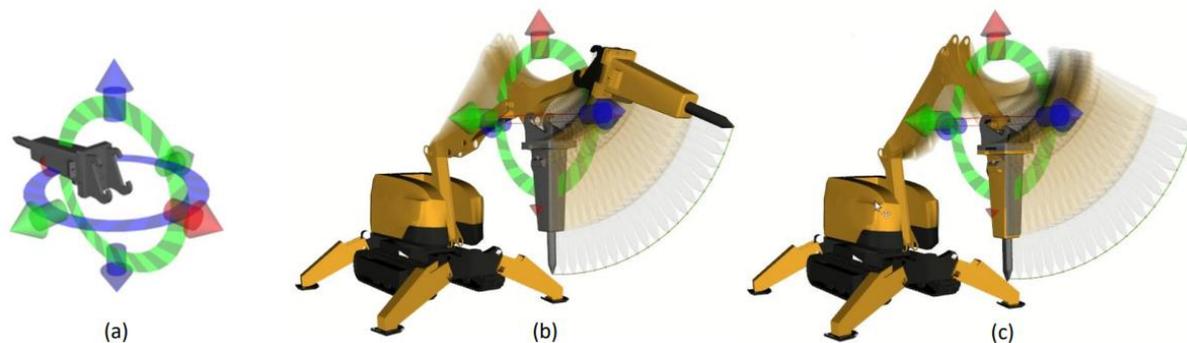
## Planungsverfahren

Der Bewegungsplaner ist dafür verantwortlich, die vom Bediener in die entsprechenden Betriebsmodi umzuwandeln, basierend auf einem ereignisgesteuerten Zustandsautomaten. Hierbei werden der aktuelle Zustand der Maschine, d.h. der Druckwert, der Strom und die gewünschte Zielaktion, berücksichtigt, um den Übergang zwischen den Zuständen zu definieren.

Abbildung 29

Interaktiver Marker; b) Gemäß der gewünschten Pose des Hammers generiert der Bewegungsplaner die entsprechenden

Gelenkbewegungen; c) Erst nach Bestätigung durch den Bediener wird die geplante Bewegung an die reale Maschine weitergeleitet<sup>32</sup>



### Definition der Zielaktion

Wir haben das Programm RViz verwendet, um interaktive Marker zu implementieren. Diese Marker dienen als visuelle Steuerungen, die es Benutzern ermöglichen, mit einem Roboter in einer vollständig immersiven 3D-Umgebung zu interagieren. Diese Umgebung umfasst Echtzeit-Rückmeldungen zum Status des Roboters und nutzt verschiedene 3D-Sensorinformationen wie Laserscans und RGB-D-Punktwolken. Benutzer können leicht mit diesen Markern interagieren, indem sie sie mit der Maus manipulieren. Jeder Marker bietet die Möglichkeit, bis zu sechs Freiheitsgrade zu steuern, einschließlich Position und Orientierung. Darüber hinaus haben Entwickler die Flexibilität, benutzerdefinierte Formen mit diesen Markern zu verknüpfen, um beispielsweise Werkzeuge oder den Endeffektor des Roboters darzustellen. Wie in Abbildung 29 dargestellt, zeigt ein interaktiver Marker ein Hämmermodell. Der Bediener kann die gewünschte Position des Hammers definieren, indem er aktiv mit dem interaktiven Marker interagiert.

### Ereignisgesteuerter Zustandsautomat

Für den Zustandsautomat verwenden wir eine vordefinierte Logikreihenfolge, die aus vier Zuständen besteht: *Distanzanpassung*, *Platzierung*, *Druckaufbau* und *Hämmern*.

Der BROKK 170 Manipulator ist ein hydraulischer Seriengelenk-Manipulator mit fünf rotatorischen Gelenken, siehe Abbildung 24. Unter diesen Gelenken ist das zweite Gelenk  $q_2$  mechanisch mit  $q_3$  gekoppelt. Der Maschinenhersteller hat  $q_2$  so konzipiert, dass es die Reichweite des Manipulators anpasst, und dementsprechend das Kommunikationsprotokoll so implementiert, dass  $q_2$  nicht mit den anderen Gelenken zusammen gesteuert werden kann. Dadurch stellt sich die Frage, wann  $q_2$  und wann die anderen Gelenke genutzt werden sollen, um die vom Bediener definierten gewünschten Zielposition  $x_D = [x_D, y_D, z_D, \theta_D]^T$  zu erreichen. In unserem Ansatz überprüfen wir zunächst den Abstand zwischen  $q_2$  und  $x_D$  für die gewünschte Zielposition  $x_D$ . Durch experimentelle Analyse haben wir festgestellt, dass, wenn dieser Abstand im Bereich von [1,7 m, 2,4 m] liegt, die Zielposition innerhalb der Reichweite des BROKK 170 liegt. Im Modus der *Distanzanpassung* wird nur  $q_2$  aktiviert, bis der Abstand zum Ziel innerhalb dieses Bereichs liegt. Sobald das Abstandskriterium erfüllt ist, wechselt das System in den nächsten Modus, die *Platzierung*.

Im Platzierungsmodus wird eine Trajektorie geplant, die eine Einschränkung für  $q_2$  enthält, um seine aktuelle Position beizubehalten und seine Nutzung zu verhindern. Diese Einschränkung gewährleistet, dass eine Trajektorie im Gelenkraum  $q_D$  definiert wird, die den Hammer zu dem gewünschten  $x_D$  bringt, ohne  $q_2$  einzubeziehen. Die geplante Trajektorie wird zuerst dem Bediener visualisiert und dann von der Steuerung auf niedriger Ebene in der Verfolgungsphase überprüft. Durch Überwachung der Zustände

von  $q_{1,3,4,5}$  und dem Vergleich mit dem finalen Trajektorienwegpunkt  $q_D$  erfolgt ein Übergang von *Distanzanpassung* zu *Druckaufbau*.

Der Hammer von BROKK 170 wird hydraulisch angetrieben, wobei die Kolbenbewegung im Zylinder die Hämmer-Bewegung erzeugt. Während des Hämmerns bewegt sich der Meißel, der am Hammer befestigt ist, etwa 15 cm vor und zurück. Das Ziel der Annäherung ist es, den Hammer in unmittelbare Nähe zur Oberfläche des Zielobjekts zu positionieren und den Meißel gegen sie zu drücken, um eine effektive Wirkung beim Hämmeren zu gewährleisten. Der Druck in der Haupt-Hydraulikpumpe erhöht sich, wenn der Hammer auf Widerstand von der Oberfläche trifft und nach unten drückt. Daher dient der Druckwert der Hauptpumpe als Auslöser für den Übergang zum nächsten Zustand, dem *Hämmeren*. Genauer gesagt, wenn der Druck 100 bar überschreitet, während der Hammer in negativer z-Richtung bewegt wird, wird die Bewegung gestoppt und der anschließende Hämmervorgang eingeleitet.

Eine angemessene Entfernung zwischen dem Meißel und der Oberfläche des Zielobjekts ist entscheidend für ein erfolgreiches Hämmeren. Während des Hämmerns wird die Oberfläche zerstört, wodurch sich der Abstand zwischen dem Meißel und der Oberfläche automatisch vergrößert. Wenn der Abstand jedoch zu groß wird, kann der Meißel die Oberfläche möglicherweise nicht effektiv treffen. Um dies zu beheben, wird das Gelenk  $q_5$  während des Hämmerns allmählich in Richtung der Oberfläche gedreht (angenommen, die Oberfläche befindet sich unter dem Hammer), um während des Hämmerns einen kleinen Abstand beizubehalten.

In der aktuellen Konfiguration wird die Entscheidung, wann der Hämmervorgang zu starten und zu beenden ist, intuitiv von einem menschlichen Bediener getroffen, der den entfernten Arbeitsplatz durch erfasste visuelle Informationen, siehe Abbildung 27, beobachtet. Sobald der Zielpunkt ordnungsgemäß gehämmer ist, kann der Bediener eine neue Zielposition definieren, indem er das interaktive Hammermodell neu positioniert, was anschließend den Zustand der Distanzjustierung auslöst, um die Aufgabe fortzusetzen.

## Bewegungsplaner

Im Zusammenhang mit der Bewegungsplanung gehen wir weiter auf den *Platzierungs*-Aspekt ein. Unser Ziel ist es, eine Trajektorie zu planen und präzise zu verfolgen, um den Hammer an das gewünschte Zielpunkt im Arbeitsraum  $x_D$  zu positionieren. Um dies zu erreichen, wandeln wir zunächst die definierte gewünschte Pose  $x_D$  mithilfe eines inversen kinematischen Solvers in die entsprechenden Gelenkwinkelwerte  $q_D$  um. Anhand der berechneten  $q_D$  generiert der Trajektorienplaner Wegpunkte von der aktuellen Gelenkkonfiguration. Die gewünschten Änderungen zwischen diesen Wegpunkten werden dann in Steuereingaben umgewandelt, speziell in PWM-Werte, durch die Implementierung eines Lowlevel-Reglers.

Um kollisionsfreie Trajektorien zu erzeugen, verwenden wir das Bewegungsplanungsframework MoveIt!<sup>17</sup>. Dieses Framework nutzt die Methode des Rapidly Exploring Random Tree (RRT) aus der Open Motion Planning Library (OMPL)<sup>56</sup>, um aktuelle und gewünschte Endpositionen zu sampeln und Suchbäume zu konstruieren. Die generierten Trajektorien werden mithilfe einer quintischen Polynomspline erstellt und interpoliert. Um eine Closed-Loop Regelung zu ermöglichen, implementieren wir ein Steuersystem auf Basis des ROS (Robot Operating System) Steuerframeworks. Das Steuerungsloop des Systems arbeitet in einer vordefinierten Frequenz von 20 Hz.

In jeder Iteration aktualisiert das Steuersystem die Sensordaten, wie zum Beispiel die Gelenkzustände des Roboters, und berechnet die Befehle für jedes Gelenk, um den Roboter zur gewünschten Pose zu führen, die vom Bediener definiert wurde. Bevor die berechneten Gelenkbefehle an den Lowlevel-Regler weitergeleitet werden, um in tatsächliche Bewegungen umgewandelt zu werden, hat der Bediener die Möglichkeit, die definierte Zielposition des Hammers und die entsprechenden Manipulatorbewegungen

---

zu beobachten. Sobald der Bediener mit den geplanten Bewegungen zufrieden ist, können sie als tatsächliche Bewegungen ausgeführt werden.

### Lowlevel-Regler

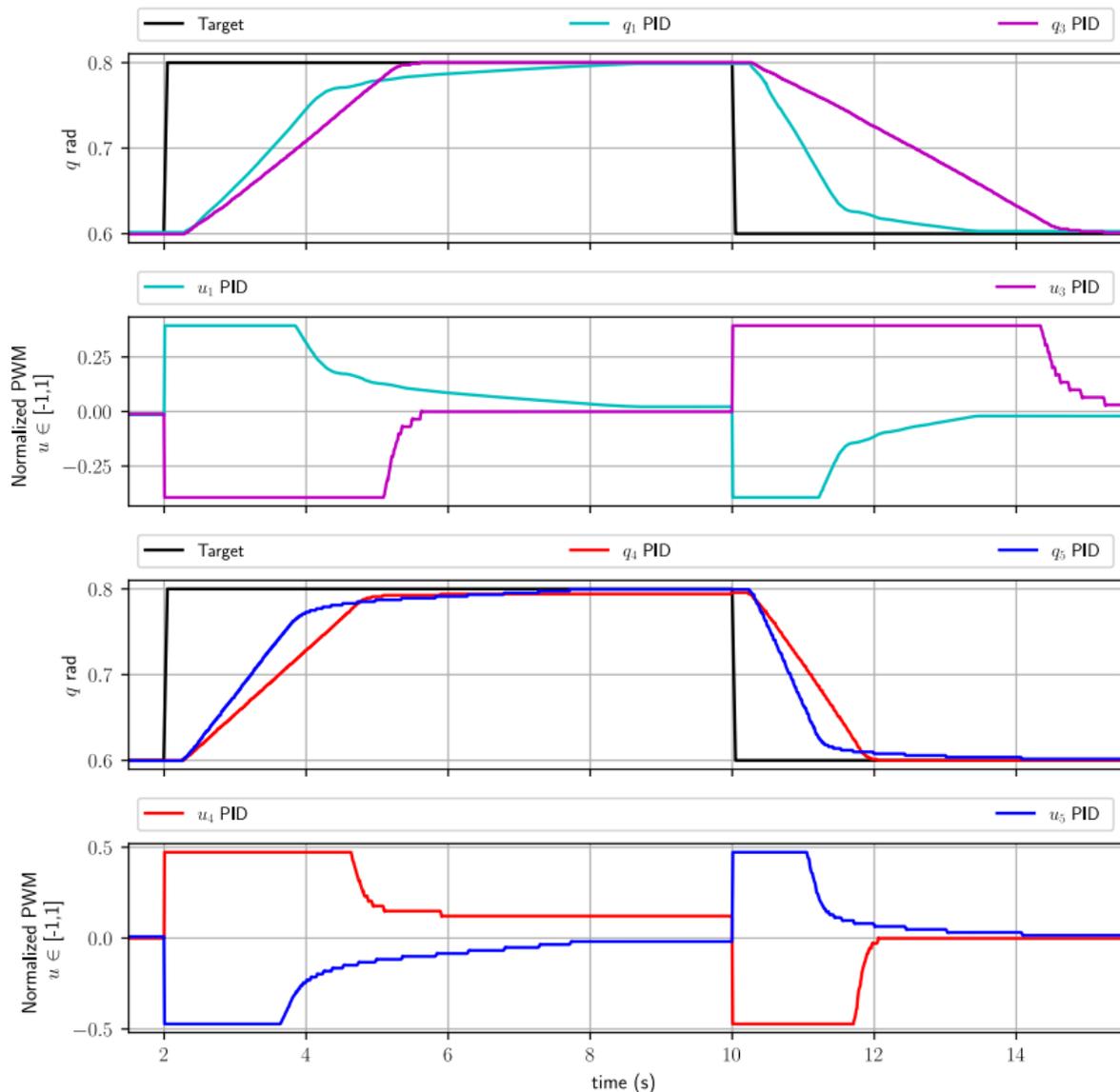
Das Ziel des Lowlevel-Reglers in dieser Arbeit besteht darin, geeignete Steuerungssignale zu bestimmen, speziell PWM-Werte für das Ventilsystem, basierend auf den gegebenen tatsächlichen und gewünschten Gelenkzuständen. Während analytische Regelungstechniken wie Sliding-Mode-Control<sup>38</sup> und adaptive Regler<sup>27</sup> für ähnliche hydraulische Anwendungen vorgeschlagen wurden, kann ihre Umsetzung herausfordernd sein, aufgrund des Mangels an genauen Maschinenmodellen. Die meisten Maschinenhersteller liefern keine umfassenden Beschreibungen ihrer Maschinen und der zugrunde liegenden Systemdynamik, was es schwierig macht, ein analytisches Modell zu erstellen.

In dieser Arbeit wird ein Proportional-Integral-Differential (PID)-Regler für den Lowlevel-Regler verwendet. Die Reglerparameterwerte werden angepasst, um hauptsächlich ein Überschwingen der Gelenke zu verhindern und unbeabsichtigte Kollisionen mit der Umgebung zu vermeiden. Der PID-Regler wird aufgrund seiner Einfachheit und Robustheit gewählt, da er nicht auf genaue Systemmodelle angewiesen ist. Durch die angemessene Abstimmung der Reglerparameterwerte werden die Steuerungssignale optimiert, um die gewünschte Gelenkbewegung zu erreichen.

### Experimente mit dem Hammer

Die Experimente sind zunächst darauf ausgelegt, die Leistung des Lowlevel-Reglers mithilfe von Puls-Tests zu bewerten. Anschließend wird die Leistung der Trajektorienverfolgung in der Tool-Center-Point(TCP)-Ebene bewertet, wobei eine Positions-Trajektorie berechnet wird, indem die gewünschte Hammerpose des Bedieners berücksichtigt wird. Danach zeigen wir die Leistung des implementierten Frameworks in einem Feldtest.

Abbildung 30  
Ergebnis von Pulse-Tests und die entsprechenden PWM-Werte <sup>32</sup>



### Puls-Tests

Die Puls-Tests werden durchgeführt, um die Leistung des Lowlevel-Reglers unter verschiedenen Bedingungen zu bewerten, wie Bewegungen in Richtung und entgegen der Schwerkraft in verschiedenen Richtungen. In diesen Tests wird die Pulszeit auf 8 Sekunden eingestellt. Die PID-Parameterwerte werden manuell eingestellt, indem ihre Werte schrittweise erhöht und die Leistung des Systems verglichen wird. Bei diesem manuellen Abstimmungsprozess wird besonderes Augenmerk darauf gelegt, ein Überschwingen zu vermeiden, da die Sicherheit eine entscheidende Rolle spielt, wenn die Bewegung der Maschine das Ziel überschreitet und unerwartete Strukturen erfasst.

Die Leistung kann in Abbildung 30 beobachtet werden. Während der implementierte PID-Regler zufriedenstellende Ergebnisse hinsichtlich Überschwingen und Anstiegszeit während der Puls-Tests liefert, deuten die Unterschiede in den Einschwing- und Anstiegszeiten in zwei verschiedenen Rotationsrichtungen, d. H. In Richtung und entgegen der Schwerkraft, auf das nichtlineare Verhalten des

Systems hin. Diese Nichtlinearität sollte in zukünftigen Untersuchungen weiter erforscht werden, um ihre Auswirkungen besser zu verstehen und den Regelansatz zu verfeinern.

## Trajektorienverfolgung

Das Ziel dieses Experiments ist es, die Tracking-Performance des implementierten Frameworks in der TCP-Ebene zu evaluieren. Dazu startet BROKK 170 von einer vordefinierten Anfangsposition  $X_s = [x_s, y_s, z_s, \theta_s]^T = [1.96, -1.17, 1.69, 1.04]^T$  und bewegt sich zur vordefinierten Endeffektor-Position  $X_{d1} = [2.47, 0.01, 2.12, 0.38]^T$ . Anschließend bewegt sich der Roboter von  $X_{d1}$  zur nächsten gewünschten Position  $X_{d2} = [1.84, 1.16, 1.78, 0.11]^T$ . Diese Trajektorie wird fünfmal wiederholt, um die Konsistenz des Ergebnis zu bewerten.

Die Ergebnisse des Experiments sind in Abbildung 31 und 32 dargestellt. Für die erste gewünschte TCP-Position  $X_{d1}$  erreicht das vorgeschlagene System einen Positionsfehler von 2,5 cm und einen Orientierungsfehler von 0,02 rad. Der Tracking-Fehler verringert sich während der zweiten Position  $X_{d2}$ , insbesondere wenn sich die Gelenke stark in Richtung der Schwerkraft bewegen. Wie in dem vorherigen Pulstest gezeigt, rotieren die Gelenke mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten, abhängig von der Richtung. Für  $X_{d1}$  rotieren die Gelenke von  $q_s = [2,10, 0,64, 1,13, 0,60, 2,01]$  zu  $q_{d1} = [1,55, 0,64, 1,06, 1,30, 1,56]$  entlang der generierten Joint-Space-Trajektorien. Ähnlich rotieren die Gelenke für die zweite gewünschte TCP-Position  $X_{d2}$  von  $q_{d1}$  zu  $q_{d2} = [1,01, 0,64, 0,60, 0,78, 0,35]$ . Das Gelenk  $q_4$  dreht sich für  $X_{d1}$  in positiver Richtung, während es sich für  $X_{d2}$  in negativer Richtung dreht. Die Ergebnisse des Pulstests zeigen, dass das Gelenk  $q_4$  schnellere Aufstiegs- und Einschwingzeiten aufweist, wenn es sich in negativer Richtung dreht, was den leicht größeren Tracking-Fehler erklärt, der für  $X_{d1}$  beobachtet wird, bei dem sich  $q_4$  in positiver Richtung dreht. Dennoch zeigt Abbildung 32, dass der Tracking-Fehler für beide Positionen kleiner als 3cm bleibt.

Abbildung 31

Die vom Bediener definierte gewünschte Pose in der TCP-Ebene und die Snapshots von BROKK 170 <sup>32</sup>

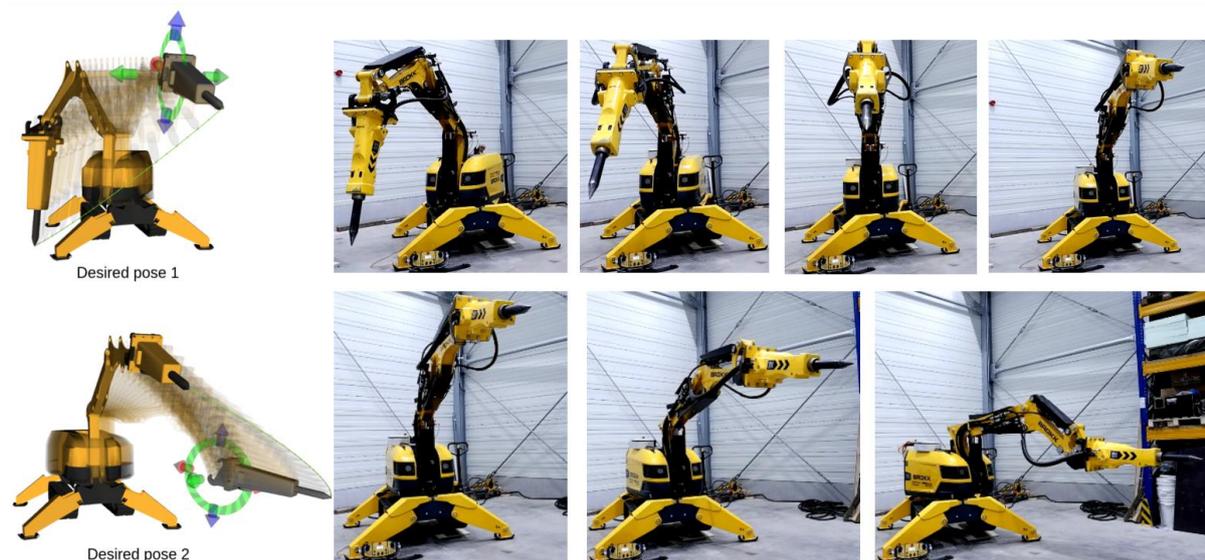
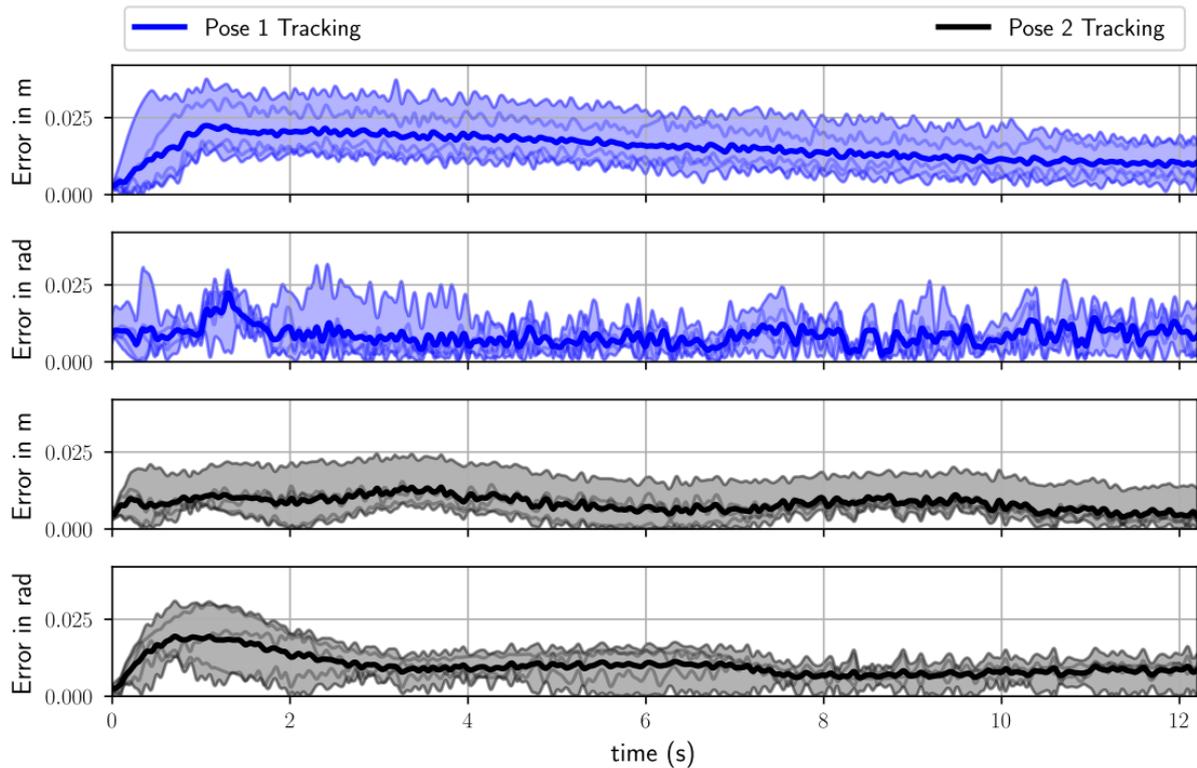


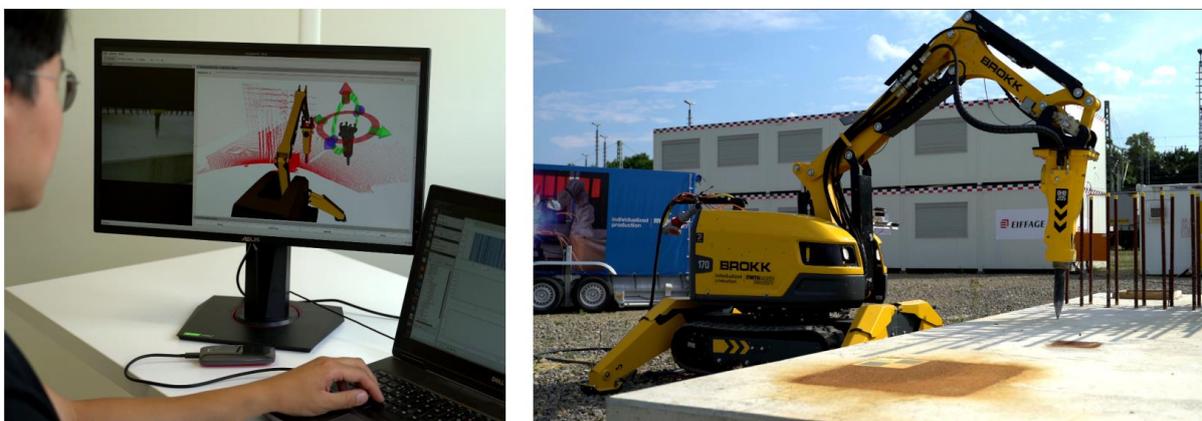
Abbildung 32  
Trajektorienverfolgung Ergebnis für die gewünschte Pose 1 und 2 <sup>32</sup>



### Feldexperiment

Um die Leistung des vorgestellten Systems zu demonstrieren, wird BROKK 170 vor einer Betonstruktur positioniert, und der Manipulator führt den Rückbauprozess mit der vorgeschlagenen Methode aus. Während dieses Prozesses interagiert der Bediener mit dem interaktiven Hammermodell und nutzt die bereitgestellten visuellen Informationen, siehe Abbildung 31, um das gewünschte Abbruchziel zu definieren. Der Bediener befindet sich in einem Steuerungscontainer etwa 20 Meter entfernt von der Abbruchstelle.

Abbildung 33  
Der Bediener arbeitet in einem Steuerungscontainer, der die Fernarbeitsumgebung überwacht und dabei 2D- und 3D-Visuelle Information nutzt (links). Der Zustand der Maschine wird dem Bediener ebenfalls zusammen mit dem interaktiven Hammermodell zur Verfügung gestellt, um die gewünschte Hammerposition zu definieren; Experimenteller Aufbau (rechts) <sup>32</sup>



Das vorgeschlagene System zeigt vielversprechende Fähigkeiten, um Strukturen in einer semi-autonomen Methode präzise abzubauen und dabei die Überwachung und Sicherheit des menschlichen Bedieners während des gesamten Prozesses zu gewährleisten. Abbildung 32 zeigt ein Bild des Druckprofils und bietet Einblicke in die Übergänge zwischen den verschiedenen Zuständen. Der menschliche Bediener behält die Möglichkeit, geplante Bewegungen zu modifizieren oder Aktionen zu bestätigen, was zu Stillstand zwischen den vordefinierten Zuständen führt. Zum Beispiel erhöht sich im Zustand *Druckaufbau* der Druckwert allmählich, bis die Spitze des Hammers mit der Oberfläche des Objekts in Kontakt kommt, was zu einem deutlichen Anstieg des Drucks führt. Sobald der Druckwert die Schwelle von 100 bar überschreitet, wechselt der Zustand von *Druckaufbau* zu *Hämmern*.

Abbildung 34

Druckprofil aus einem Hammersversuch. Zuerst werden die Gelenke auf getrennte Weise aktiviert, um die Entfernung ( $q_2$ ) anzupassen (rot) und die gewünschte Hammerpose ( $q_{1,3,4,5}$ ) zu verfolgen (violett). Der Manipulator bewegt sich nach unten, um den Meißel (grün) zu drücken. Danach folgt das Hämmern (grau) <sup>32</sup>

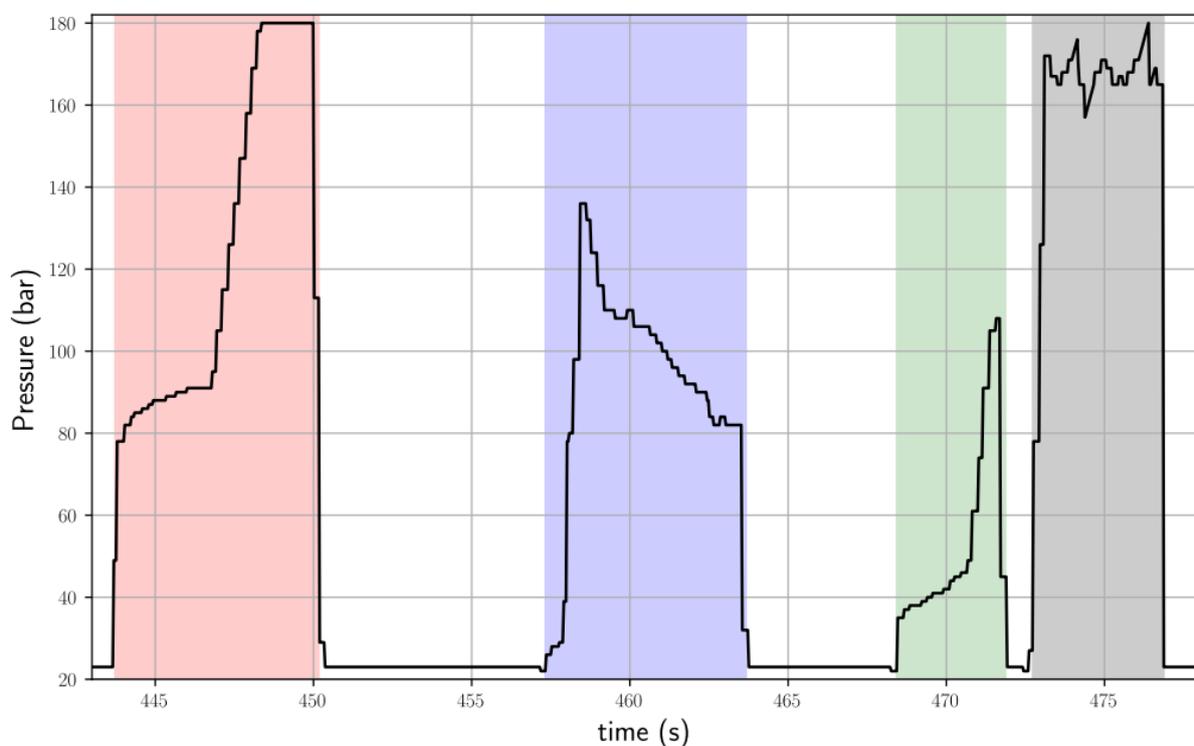
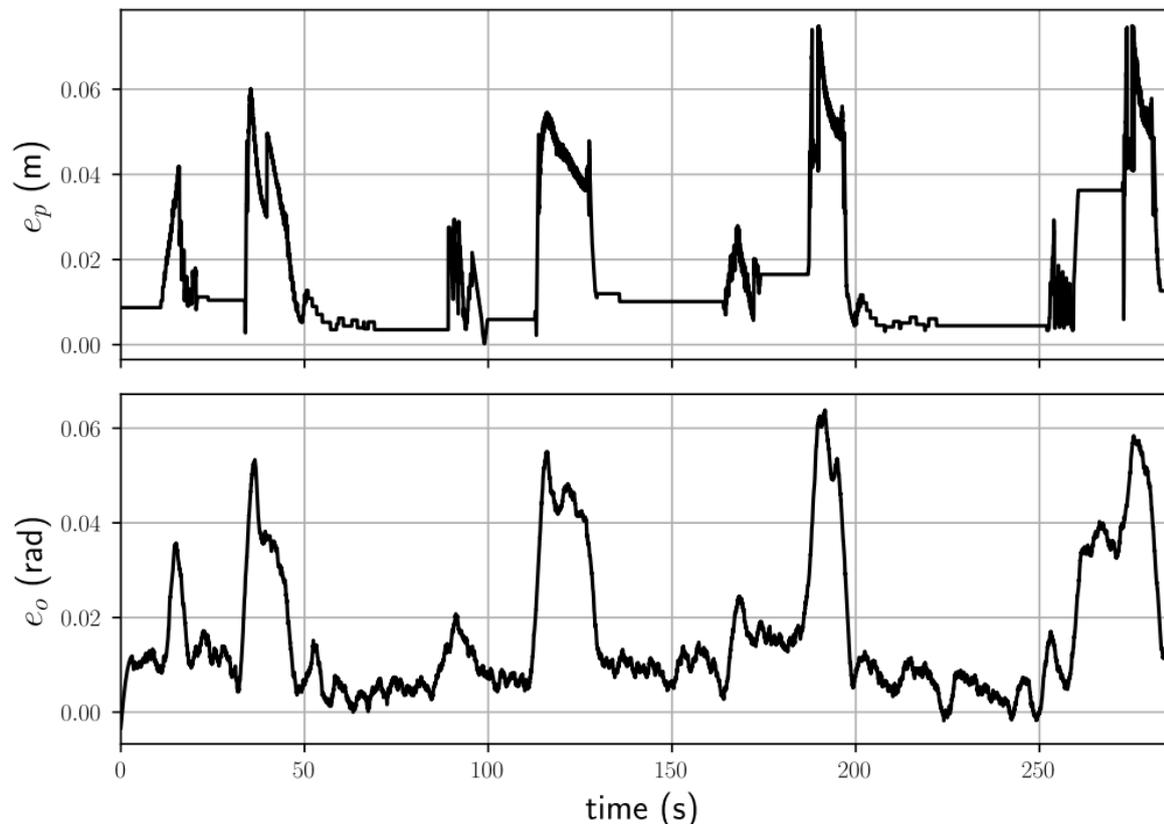


Abbildung 35 zeigt, dass der Tracking-Fehler während des Rückbaus minimal bleibt, was auf eine präzise Tracking-Leistung hindeutet. Wie in der Abbildung 36 und 37 dargestellt, bietet die vorgeschlagene semi-autonome Rückbaumethode eine Lösung, um Staub und Risiken, die mit der Nähe des Menschen zu schweren Maschinen auf Abbruchstellen verbunden sind, zu reduzieren und gleichzeitig die Sicherheit und Genauigkeit durch die Integration des menschlichen Bedieners in die Planung zu erhöhen. Insbesondere die Integration der Denkfähigkeit des menschlichen Bedieners bei der Definition des Abbauziels und die Vorvisualisierung der geplanten Bewegung für den Bediener tragen dazu bei, die Kontrollierbarkeit und Sicherheit des Abbauprozesses zu verbessern.

Abbildung 35  
Error in der TCP-Ebene während des Rückbaus<sup>32</sup>



### Zusammenfassung vom Experiment mit dem Hammer

Die vorgestellte Methodik ermöglicht einen semi-autonomen Ansatz für Rückbautätigkeiten vor, bei dem eine kommerziell erhältliche Abbruchmaschine in einen Roboter weiterentwickelt wird. Ausgestattet mit visuellen Sensoren ermöglicht der Roboter dem menschlichen Bediener die Fernüberwachung des Arbeitsbereichs. Der Bediener kann den gewünschten Hammerpunkt durch die interaktive Platzierung eines Hammermodells definieren. Ein Trajektorienverfolgungsplaner wurde vorgestellt, um präzise Steuerung sowohl auf Gelenk- als auch auf Aufgabenebene zu erreichen. Vor der Ausführung wird die geplante Bewegung dem Bediener visualisiert, was die Möglichkeit der Vorausplanung und weiteren Optimierung ermöglicht.

Experimentelle Ergebnisse zeigen die Leistungsfähigkeit der vorgeschlagenen Methodik für den semi-autonomen Rückbau. Die Feldtests zeigen jedoch Vorteile und Einschränkungen gleichzeitig auf. Der vorgestellte Ansatz bietet das Potenzial, die Sicherheit der Arbeiterinnen und Arbeiter zu verbessern, indem die Notwendigkeit einer direkten Nähe zwischen menschlichen Bedienern und der Maschine oder dem Arbeitsbereich reduziert wird, wodurch verbundene Risiken und Gefahren auf der Baustelle reduziert werden. Zusätzlich kann die Überprüfung und Anpassung der geplanten Bewegung die Kontrollierbarkeit des Rückbauprozesses erheblich verbessern. Traditionelle Fernsteuerungstechniken haben Schwierigkeiten mit der präzisen Steuerung von Baumaschinen aufgrund ihrer komplexen Freiheitsgrade und erfordern umfangreiches Training und Erfahrung. Die Visualisierung der geplanten Bewegung und die Möglichkeit der Bewegungsoptimierung für schwere Baumaschinen erhöhen die Gesamtsicherheit und Effizienz des Prozesses, insbesondere wenn Präzision in der Aufgabe erforderlich ist.

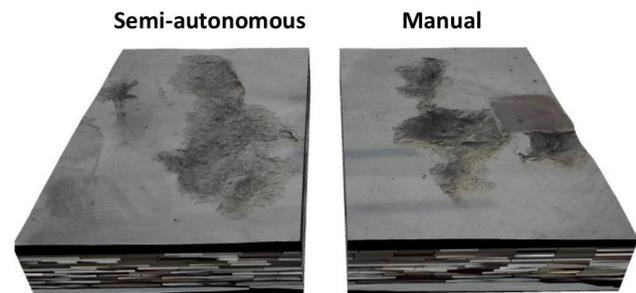
Die Integration von Robotertechnologie in der Bauindustrie bietet vielversprechende Möglichkeiten zur Verbesserung von On-Site-Operationen und der Zusammenarbeit zwischen menschlichen Bedienern und Robotern, wie in den durchgeführten Experimenten gezeigt wurde. Ein entscheidender Erfolg für die erfolgreiche Implementierung solcher aufstrebenden Technologien ist jedoch eine stabile und latenzminimale Kommunikation zwischen dem menschlichen Bediener und dem Roboter, um minimale Datenübertragungsverzögerungen zu gewährleisten. In unseren Experimenten wurde der Arbeitsplatz fernüberwacht und die visuellen Informationen über WLAN an den Bediener übertragen. Hier stellte sich die kontinuierliche Übertragung von erfassten visuellen Informationen über WLAN als Herausforderung dar, da die Punktwolken-Daten, auch nach Auflösungs- und Scanbereichsreduktion, mehrere Dutzend Megabyte erreichten. Dies unterstreicht die Notwendigkeit einer robusteren drahtlosen Kommunikationslösung. Obwohl etablierte Kompressionstechniken existieren, erfordert ihre Anwendung oft Rechenzeit, insbesondere wenn sie auf eingebetteten PCs durchgeführt werden. Dies stellt eine kritische Herausforderung dar, da der menschliche Bediener stark auf räumliches Bewusstsein des Arbeitsbereichs angewiesen ist. Eine mögliche Lösung, um dieser Herausforderung zu begegnen, besteht darin, den 5G-Mobilfunkstandard zu nutzen. Die Verwendung von 5G für drahtlose Kommunikation auf Baustellen ist jedoch weitgehend unerforscht. Ein bedeutendes Hindernis in den vorhandenen Forschungslücken besteht darin, ein 5G-Netzwerk vor Ort zu installieren. Im Gegensatz zu vielen industriellen Produktionsumgebungen unterliegt der Arbeitsbereich auf Baustellen kontinuierlichen Infrastrukturveränderungen. Beispielsweise entwickelt sich der Arbeitsbereich in Bauprojekten, während die Struktur errichtet wird. Daher werden die effiziente Bereitstellung eines 5G-Netzwerks vor Ort und seine effektive Integration in die Steuerung von Baumaschinen derzeit in einer separaten Forschungsrichtung untersucht <sup>35</sup>.

Abbildung 36

Snapshots von der konventionellen Fernsteuerung (oben) und der vorgestellten semi-autonomen Methode (unten) <sup>32</sup>



Abbildung 37  
Ergebnis vom Hämmern <sup>32</sup>



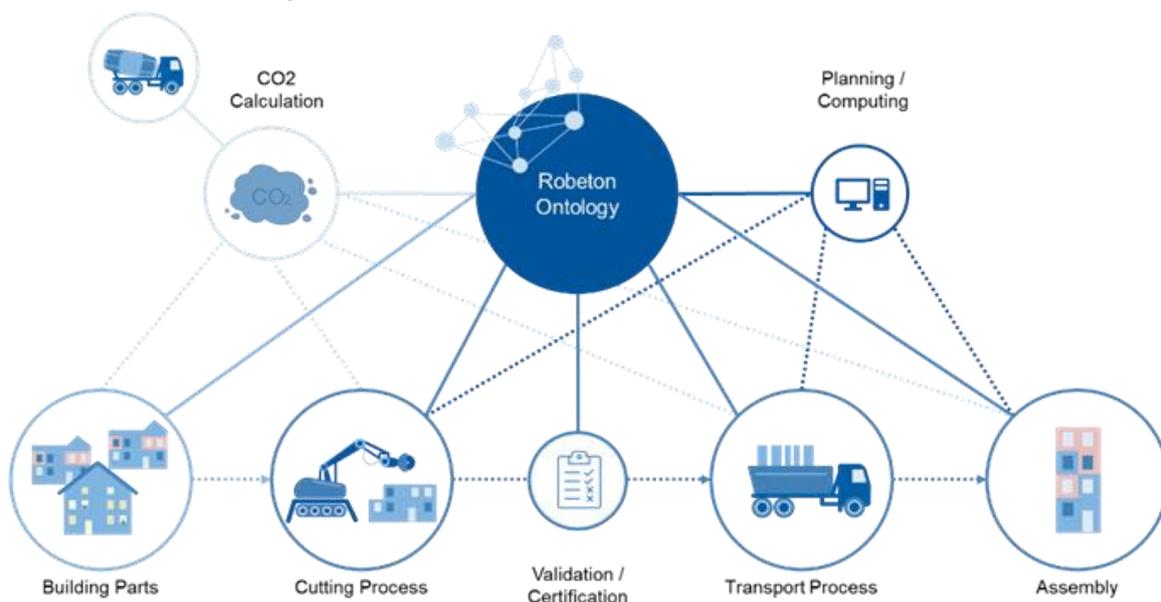
In diesem Experiment mit dem Hammer wurde die Möglichkeit der Erhöhung der Kontrollierbarkeit und Sicherheit durch die Integration der Robotertechnologie und Weiterentwicklung von BROKK 170 gezeigt. Da der Hammer als primäres Werkzeug benutzt wurde, konnte der Aspekt der Wiederverwendung von Materialien in dem ersten Experiment nicht adressiert werden. Basierend auf der Entwicklung von dem ersten Teil wird der Hammer nun mit einer Wandsäge ersetzt, um die vorgestellte Methodik hinsichtlich des selektiven Rückbaus zu untersuchen.

## Entwicklung von Schnittstelle zum BIM und Integration der Information

Die aktuelle Forschung beschäftigt sich mit der zerstörungsfreien Rückgewinnung von Bauteilen aus abgerissenen Gebäuden als Quelle für neue Baumaterialien <sup>34</sup>. Durch präzises Ausschneiden von Betonteilen aus den abzubrechenden Gebäuden können neue Bauteile hergestellt werden, die dann in neuen Gebäuden Verwendung finden können.

Für die Wiederverwendung müssen die extrahierten Komponenten jedoch intensiven speziellen Tests unterzogen werden <sup>4</sup>. Einer der Gründe dafür ist, dass heutige Planungsmodelle keine Verbindung zwischen abgerissenen und neu errichteten Gebäuden zulassen, da das aktuelle IFC-Modell nur eine ifcSite zulässt <sup>14</sup>. Da die Daten nicht auf das neue Modell übertragen werden können, gehen Informationen über die Bauteile wie Konstruktion, Bewehrung und Einbauort des Originalteils verloren.

Abbildung 38  
Abstrahierte ROBETON-Ontologie mit seinen Komponenten



Der Ansatz eines semantischen Prozessmodells, um einen neuen Informationsfluss für die Wiederverwendung von Baumaterialien über BIM hinaus zu ermöglichen, basiert auf der Entwicklung der Ontologie. Das Kapitel zeigt auf wie mithilfe einer eigens entwickelten ROBETON-Ontologie die beschriebenen Probleme nicht nur gelöst werden können, sondern auch die konsistente Erfassung des Schneidens, der Inspektion und des Montageprozesses möglich sind.

### Ontologien im Bauwesen

Ontologien haben sich als potenzielle Lösung für das Problem der semantischen Interoperabilität herausgebildet <sup>54; 62; 24; 15</sup>. Eine Ontologie ist eine formale Spezifikation von Konzepten in einem bestimmten Bereich, die eine logische Theorie und Fähigkeiten zur Schlussfolgerung neuer Erkenntnisse beinhaltet <sup>23</sup>. Sie bieten explizite Datensemantik und ermöglichen semantische Interoperabilität, indem sie Entitäten, Konzepte und ihre Beziehungen auf eine klare und eindeutige Weise darstellen <sup>48</sup>. Mehrere Ontologien wurden für den Bauwesenbereich entwickelt, darunter Ansätze wie die Übersetzung bestehender Modelle <sup>8; 13</sup> oder die Entwicklung neuer Zuordnungstechniken <sup>64</sup>.

Beispielsweise verbindet die Ontologie des Internet of Construction (IoC) verschiedene Teilbereiche des Bauwesens, einschließlich Stahlbau<sup>64; 28</sup>. Es gibt mehrere Ansätze, um einen digitalen Informationsfluss während des gesamten Bauzyklus zu ermöglichen. Die Digital Construction Ontologies (DiCon) bestehen aus sechs Modulen zur Spezifikation von Wissen im Bauwesen. Ziel der Ontologie ist es, die semantische Ebene dieser Herausforderung anzugehen, indem wesentliche Konzepte, Begriffe und Eigenschaften für Bau- und Renovierungsprojekte bereitgestellt werden. Sie repräsentiert die Entwicklung von Informationen über ein Gebäude über aufeinanderfolgende Phasen des Gebäudelebenszyklus hinweg. Darüber hinaus definieren die Ontologien die notwendigen Beziehungen zwischen Gebäudeelementen, Baueinheiten, Materialien und ihren Eigenschaften. Dies ebnet den Weg zur Integration von Informationen aus verschiedenen dezentralen Quellen über den gesamten Bauzyklus hinweg<sup>64</sup>.

Lee et al. entwickelten ein Ontologie-Modell, um die Informationsverarbeitung für vorgefertigte Bauprozesse und Montage vor Ort im Bauwesen zu unterstützen<sup>36</sup>.

Die gemeinsame Ontologie für das Logistikinformatikmanagement in der Bauindustrie von Zheng et al. ist eine Darstellung einer domänenspezifischen Ontologie als gemeinsame Informationsreferenz zur Standardisierung und Integration von Logistikinformatik im Bauwesen. Sie ermöglicht die Informationsinteroperabilität zwischen Logistikinformatikmanagement und Bauablaufmanagement und verbessert die Effizienz und Transparenz des Logistikinformatikmanagements. Dabei verknüpft sie Baustoffe mit Standorten, Status, Nutzern und Ausrüstung und wird anhand tatsächlicher Zeitplan- und Lieferdaten eines Bauprojekts bewertet<sup>63</sup>.

Die Building Product Ontology (BPO) definiert Konzepte zur schematischen Beschreibung von Baumaterialien. Sie bietet Methoden zur Definition von Montagestrukturen und Komponentenverbindungen sowie zur Zuordnung von Eigenschaften zu beliebigen Komponenten<sup>59</sup>. Janakiram et al. konzentrieren sich in ihrem Ontologie-Ansatz für die Lebenszyklusphasen von Gebäuden (BLS) auf eine effiziente Darstellung verschiedener Baulebenszyklusphasen. Es werden Stufen und Unterstufen im Lebenszyklus von Bauanlagen aufgezeigt<sup>25</sup>. Damit ermöglichen sie Herstellern, von Methoden des Semantic Web zu profitieren, ohne den Modellierungsprozess ihrer Produkte einzuschränken<sup>1</sup>.

Die ifcOWL-Ontologie basiert auf ifc:root, das Attribute enthält, die seine Verbindung mit Bauresourcen, Teilaufgaben und Komponenten ermöglichen. Die Ontologie für Bauprojektaufgaben (CTO) definiert Aufgaben im Zusammenhang mit Bauprojekten, darunter Installation, Entfernung, Modifikation, Inspektion und Reparatur<sup>8</sup>.

Die ifcOWL-DfMa-Ontologie erweitert die ifcOWL-Ontologie und strebt danach, das Vokabular des Bereichs des außenseitigen Bauwesens maschinenlesbar zu interpretieren, gemäß Referenz<sup>20</sup>.

Bisher ermöglichen Ontologien im Bauwesen die Verknüpfung heterogener und unstrukturierter Daten, einschließlich verschiedener Informationsquellen wie BIM- oder Zeitplandaten. Darüber hinaus wird empfohlen, dass sich die Ontologie auf eine spezifische Anwendung oder ein bestimmtes Problem konzentriert, das als Geltungsbereich der Ontologie definiert ist. Bisher konzentrierten sich jedoch frühere Arbeiten hauptsächlich darauf, allgemeine Bauvorgänge zu beschreiben, und nicht darauf, einen Informationsfluss für die Wiederverwendung von Betonkomponenten zu ermöglichen. Daher konzentriert sich die folgende Methodik darauf, ein semantisches Prozessmodell zur Verknüpfung von Informationen über Betonkomponenten entlang der gesamten Prozesskette zu entwickeln.

## Scope & competency questions

Die primäre Methode, die zur Erstellung der Ontologie verwendet wurde, wird im Leitfaden "Ontology Development 101: A Guide to Creating Your First Ontology" von Noy und McGuinness<sup>45</sup> ausführlich erläutert. Unter Verwendung des ausgewählten Leitfadens besteht der erste Schritt im iterativen Prozess

darin, den Fokus und den Umfang der Ontologie festzulegen. Dies wird durch die Beantwortung von drei Fragen zur Abgrenzung (SCQ) erreicht.

*SCQ1 Welches Fachgebiet sollte die Ontologie abdecken?*

Das Fachgebiet umfasst Prozesse des Rückbaus zur Wiederverwendung von Betonelementen.

*SCQ2 Was ist der Zweck der Ontologie?*

Der Zweck der Ontologie besteht darin, Informationen zu Bauteilen im gesamten Prozess der Demontage zu verknüpfen. Dieses Modell verbindet nicht nur Informationen aus bestehenden und neuen Gebäuden, sondern ermöglicht auch die Darstellung von Zwischenschritten, wie der Komponententestung und dem Transport. Mit diesem ganzheitlichen Ansatz wird es möglich, die Historie der Komponente sowie den Test- und Transportprozess bis zu ihrer Wiedereinbindung in ein neues Gebäude nachzuverfolgen.

*SCQ3 Welche Art von Fragen sollte die Ontologie beantworten können?*

Die Ontologie sollte die Verbindung zwischen den Informationen über das Element aus dem ursprünglichen Gebäude, den Zwischenschritten zur Extraktion und Validierung des Elements für die Wiederverwendung sowie dem neuen Gebäude, in dem es wiedereingebaut wird, beschreiben. Dies bedeutet, dass sie Fragen zu den Eigenschaften des Elements beantworten und Informationen über den Schneidprozess bereitstellen sollte. Gleichzeitig sollten Fragen zum Transport- und Inspektionsprozess sowie zu den Eigenschaften des neuen Gebäudes beantwortet werden. Der resultierende Datensatz sollte einen kontinuierlichen Informationsfluss entlang der gesamten Prozesskette ermöglichen.

Basierend auf der Spezifikation des Geltungsbereichs wurde eine Reihe von Kompetenzfragen (CQ) entwickelt, die sich auf das ROBETON-Projekt und frühere Forschungsergebnisse im Bereich Linked Data beziehen. Sie können in Tabelle 5 gefunden werden. Die Art dieser Kompetenzfragen ist technisch und funktional und skizziert die genauen Abfragen, die die Ontologie einmal bewältigen können soll, wenn sie erstellt ist. Die folgende Liste ist eine erste Zusammenfassung möglicher Fragen, die verschiedene Informationsbereiche abdecken. Zum Beispiel müssen Details über die Wand-Eigenschaften des bestehenden Gebäudes sowie die Anforderungen des neuen Gebäudes zugänglich sein, um die möglichen Wiederverwendungsanwendungen festzustellen. Weitere Informationen sind notwendig, um den Demontageprozess selbst zu ermöglichen, z. B. muss der Standort der Wand im Gebäude bekannt sein, um den (halb-)automatisierten Bauroboter zu positionieren. Darüber hinaus können Informationen über den Prozess selbst für Qualitätskontrolle und Dokumentation gespeichert werden. Die Zertifizierung der Komponente für die weitere Verwendung stellt jedoch nach wie vor eine Herausforderung dar. Daher muss die Ontologie auch Informationen enthalten, um die Grundlage für den Genehmigungsprozess zu liefern. Während der Umsetzung der Ontologie wird bewertet, welche Fragen fehlen und hinzugefügt werden müssen, um den gesamten Prozess vollständig abzudecken.

Tabelle 5  
Competency Questions

Type	Nr.	Questions
Wand Eigenschaften	CQ1	Wie ist die Betonzusammensetzung des bestehenden Gebäudes?
	CQ2	Wie ist die Bewehrung der Wand des bestehenden Gebäudes?
	CQ3	Was sind die Anforderungen an Beton und Bewehrung des neuen Gebäudes?
Wand Position	CQ4	Wo befindet sich die Wand, die durchtrennt werden soll?
Schneidewerkzeug	CQ5	Wo sind die Schnittpositionen für das Bauteil an der Wand?
	CQ6	Welche Maschine und welches Werkzeug werden zum Schneiden des Bauteils verwendet?
	CQ7	Wo befindet sich die Maschine auf der Baustelle, um den Schneidevorgang durchzuführen?
	CQ8	Wie hoch ist die maximale Prozesskraft für die Maschine?
	CQ9	Wie hoch ist die maximale Kraft, die die Maschine aufbringen kann?
Prozess Informationen	CQ10	Wie lange dauert der Schneidevorgang?
	CQ11	Wie viel Energie wurde verbraucht?
Inspektion Prozess	CQ12	Wie sieht die Schnittfläche des Bauteils aus?
	CQ13	Ist eine Nachbehandlung erforderlich?
	CQ14	Welches Bauteilzertifikat ist für die Weiterverwendung erforderlich?
	CQ15	Was ist für die Bauteilzertifizierung erforderlich?
Transport	CQ16	Ist der LKW in der Lage, das Element zu transportieren?
	CQ17	Auf welcher Baustelle soll das Bauteil wieder eingebaut werden?
	CQ18	Wann muss das Bauteil auf der neuen Baustelle sein?
Zusammenbau	CQ19	Welche Bauteile werden miteinander verbunden?
	CQ20	Welche Verbindungsmethode wird verwendet?

### Wiederverwendung vorhandener Konzepte

Das Prinzip von Linked Data betont die Wiederverwendung von bereits existierenden Ontologien. Unsere Untersuchung des aktuellen Stands der Ontologien in der Domänen-Dekonstruktion hat jedoch einen Mangel an adäquaten Ansätzen ergeben. Keine der existierenden Lösungen kann die Kompetenzfragen vollständig adressieren, insbesondere im Kontext der (teil-) automatischen Dekonstruktion und Wiederverwendbarkeit von Elementen. Dennoch gibt es ausgereifte Ontologien für Konzepte im Zusammenhang mit Bauelementen, Element-Metadaten und Bauprozessen, von denen wir glauben, dass sie auf dieses Modell angewendet werden können. Unser Ziel ist es, die Interoperabilität

durch die Einbindung dieser Ontologien zu verbessern. Eine Zusammenfassung der Ontologien, die wir verwenden oder verknüpfen werden, finden Sie in Tabelle 6.

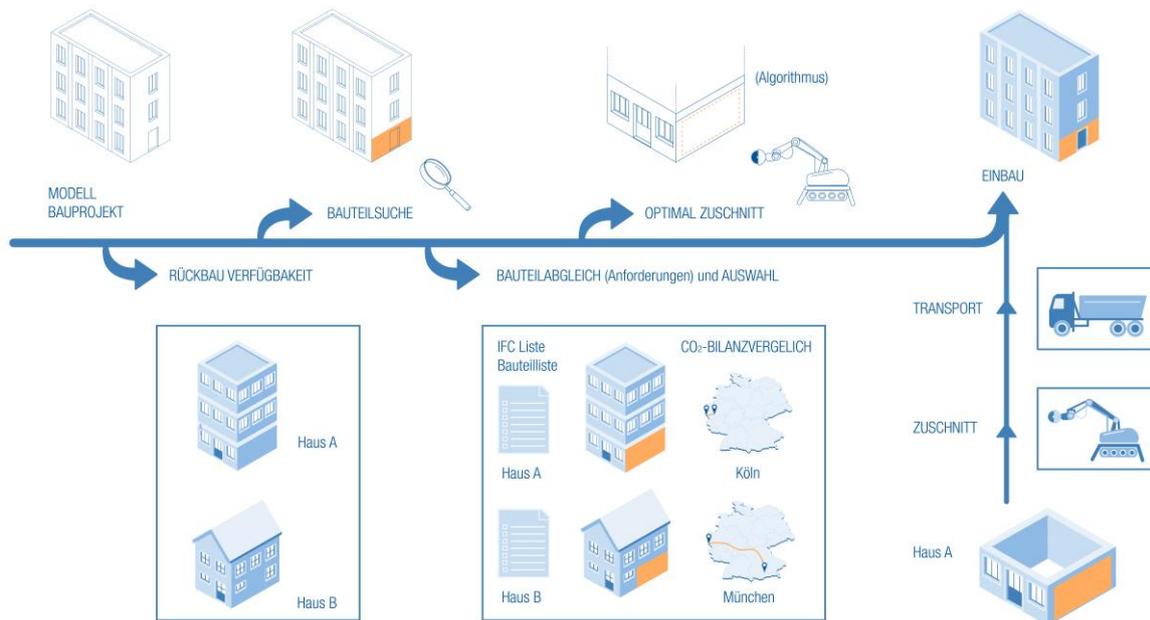
Tabelle 6  
Überblick über die verbundenen Ontologien

Namespaces	Hauptklassen / Schwerpunkt und Zweck der Ontologie	Reference
bot	<i>bot:Zone, bot:Element, bot:Interface</i> Ontologie, die die zentralen topologischen Konzepte eines Gebäudes und die Beziehungen zwischen diesen Konzepten beschreibt. Eine der zentralen Ontologien, die innerhalb der Linked Building Data (LBD) Gruppe eingeführt wurde.	10; 10
ifc	<i>Ifc:Root</i> Web Ontology Language (OWL) Darstellung des Industry Foundation Classes (IFC) Schemas	7; 7
ioc	<i>ioc:process</i> Im Rahmen von IoC entwickelte Ontologie zur Beschreibung von Prozessen und Prozess-Metadaten	Im Druck (noch nicht veröffentlicht)
opm	<i>opm:PropertyState</i> Eine Ontologie zur Beschreibung von Eigenschaften, die sich im Laufe der Zeit ändern	39; 39
schema	<i>schema:Thing</i> Gemeinsames Projekt zur Entwicklung von Schemata für die Strukturierung von Daten	55; 55

Während sich die erste Iteration der Ontologie vor allem auf eine breitere Sicht der Prozesse und ihrer Beziehungen konzentriert, haben weitere Entwicklungen die Tiefe erhöht. So wurde beispielsweise bei der Aufstellung der Kompetenzfragen und der Analyse der Prozesskette deutlich, dass Größe und Gewicht der Bauteile begrenzende Faktoren für den Transport sind. Zusätzliche Anforderungen an den Zerspanungsprozess und das daraus resultierende Zusammenfügen mehrerer Elemente werden in die Ontologie aufgenommen. Daher wurde der Top-Down-Ansatz für die Ontologieentwicklung, der mit der Definition der allgemeinsten Konzepte beginnt und diese anschließend verfeinert, nach Noy und McGuinness<sup>45</sup> angewendet.

## Entwicklung einer Beispielanwendung

Abbildung 39  
Ontologie Prozesskette



### Probeanwendung zur Evaluation des Systems

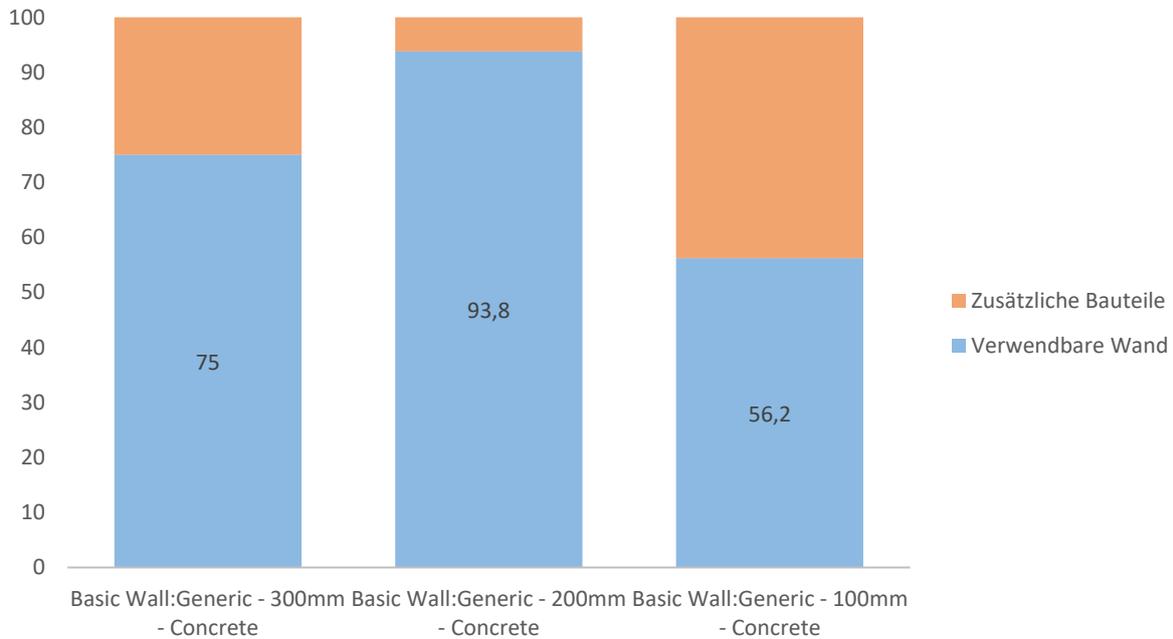
Zur Ermittlung der Anzahl und Größe der wiederverwendbaren Wände werden die Gebäudemodelle zunächst aus der Modellierungssoftware Revit in das IFC-Format exportiert. Hierbei wurde für dieses Beispiel das IFC 4.0 Format in der ReferenceView Architecture gewählt. Anschließend erfolgt die Konvertierung der IFC-Dateien des Bestands- und Neubaus in RDF (Resource Description Format) - Tripel, um diese als Ontologien im Turtle-Format weiterzuverwenden. Stardog Cloud dient dabei als Datenbank zur Speicherung der Wissensgraphen und zur Abfrage von Daten. Ein Python-Programm ermöglicht das Erstellen der Datenbanken und das Hochladen der Turtle-Dateien. Auf diese Weise entstehen getrennte Datenbanken für die Gebäudeinformationen des neuen Gebäudes und des Bestandsgebäudes (siehe Abbildung 42 Finales Demonstratorkonzept).

### SPARQL-Anfragen und Auswertung

Die benötigten Informationen aus der Datenbank werden mithilfe von SPARQL-Anfragen abgefragt, einer graphenbasierten Abfragesprache für Inhalte aus dem RDF-Format. Zunächst werden alle Elemente des Typs "beo:Wall" abgefragt. Anschließend werden weitere Informationen zu diesen Elementen extrahiert, wie zum Beispiel der Wandtyp, die Länge, Höhe, Oberfläche und das Volumen der Wand. Die Wandflächen jedes Wandtyps werden aufsummiert, um den prozentualen Anteil der wiederverwendbaren Wände aus dem Bestandsgebäude für das neue Gebäude zu ermitteln. Die Ergebnisse werden in einem Graphen dargestellt, bei dem auf der X-Achse jeder Wandtyp des neuen Gebäudes aufgeführt ist und auf der Y-Achse der jeweilige prozentuale Anteil der wiederverwendbaren Wände angegeben wird. Zum Beispiel zeigt das Ergebnis, dass für den ersten Wandtyp "Basic Wall

Generic - 1000m - Concrete" keine wiederverwendbaren Wände aus dem Bestandsgebäude mit dem gleichen Wandtyp zur Verfügung stehen, während für den vierten Wandtyp "Basic Wall Generic 400mm - Concrete" 62,8 % der erforderlichen Wandlänge aus dem Bestandsgebäude stammen können und nur 37,2 % neu hergestellt werden müssen.

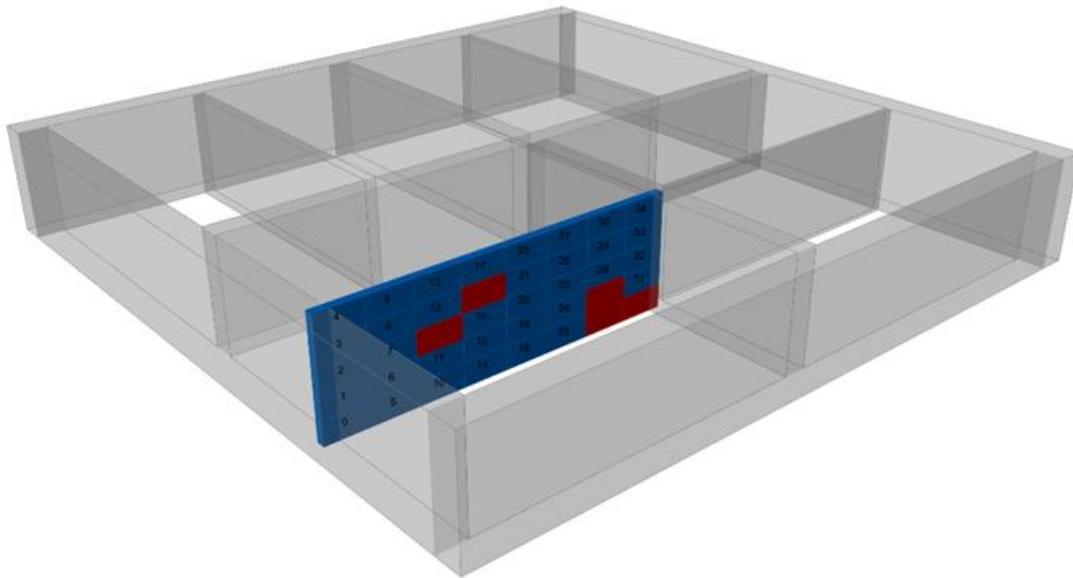
Abbildung 40  
Vergleich der Bauteile



In Abbildung 41 wird eine exemplarische Wand dargestellt, bestehend aus blauen und roten Rechtecken. Die blauen markieren das Element, das wiederverwendet werden kann, da die Vorabtests positiv waren, die roten können nicht wiederverwendet werden. An dieser Stelle der Wand gibt es einige Beschädigungen, daher sind sie nicht qualifiziert. Basierend auf der gewünschten Geometrie der Elemente durch die Architekten berechnet ein Algorithmus das bestmögliche Layout für die Einzelteile. Zusätzlich können die Ecken der Rechtecke genutzt werden, um die Säge zu positionieren und einen präzisen, teilweise automatisierten Schneidprozess zu ermöglichen.

Abbildung 41

Abbildung einer Wand mit weiter nutzbaren und nicht einsetzbaren Rechtecken, welche durch den Robeton-Prozess herausgetrennt werden können



Als zweite Validierung des vorgeschlagenen Ansatzes wird die Verknüpfung von CO<sub>2</sub>-Daten und infolgedessen die Angemessenheit des gewählten bestehenden Gebäudes als sekundäre Bauressource auf der Grundlage der CO<sub>2</sub>-Berechnung durchgeführt. Vereinfacht wurden nur die CO<sub>2</sub>-Emissionen während des Transports berücksichtigt. Für eine umfassende CO<sub>2</sub>-Analyse müssen andere Prozesse (Transport auf der Baustelle, Wiederinstallation auf der neuen Baustelle, Transport zu einer möglichen Zwischenlagerstätte usw.) und deren Auswirkungen einbezogen werden. Durch die Überprüfung der verfügbaren Materialien aus verschiedenen Objekten in Bezug auf ihre Entfernung zum neuen Standort und die CO<sub>2</sub>-Emissionen während des Transports kann eine Bewertung der Angemessenheit der Wiederverwendung dieser Elemente durchgeführt werden.

Zur Berechnung der CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem Transport von Betonkomponenten vom bestehenden Gebäude zur neuen Baustelle werden neben der Abfrage der Wände auch die Standorte der Gebäude durch eine SPARQL-Abfrage bestimmt. Dazu werden zunächst die in Revit definierten Projekadressen abgefragt, um die geografische Breite und Länge der Standorte beider Gebäude mit Hilfe der OpenCage-Geocoding-API zu bestimmen<sup>47</sup>. Anschließend kann die geodätische Entfernung zwischen den Gebäuden mit der Geopy-Bibliothek berechnet werden. Zur Berechnung der Emissionen aus dem Transport wird vom deutschen Umweltbundesamt<sup>42</sup> eine Emission von etwa 68 g/tkm für den Lkw-Transport (24-40 Tonnen, durchschnittliche Ladung) angenommen. Basierend darauf wird zunächst das Gesamtvolumen der wiederverwendbaren Wände ermittelt und dann mit der angenommenen Betondichte von 2,6 t/m<sup>3</sup>, der Entfernung zwischen den Gebäuden und der geschätzten Emission multipliziert (Volumen des Betons [m<sup>3</sup>] \* Dichte des Betons [t/m<sup>3</sup>] \* Emission [68 g/tkm] \* Entfernung [km] = [g CO<sub>2</sub>]).

Für die Berechnung der Emissionen im Zusammenhang mit der Produktion von Beton ist insbesondere die Produktion von Zement relevant. Diese kann jedoch aufgrund von Faktoren wie dem Klinkermaterial, der Primärenergiequelle, dem Produktionsprozess und dem geografischen Standort erheblich variieren. Für normalfeste Betonmischungen mit Portlandzement als einzigem Bindemittel kann dennoch von einer Richtlinien- CO<sub>2</sub>-Emission von etwa 290-320 kg CO<sub>2</sub> e/m<sup>3</sup> ausgegangen werden<sup>65</sup>. In einer Fallstudie mit einem bestehenden Gebäude in Krefeld und eine Neubau in Aachen wurde eine Transportdistanz von ungefähr 68,9 km ermittelt. Zusätzlich wurde ein wiederverwendbares Betonvolumen von 44,88 m<sup>3</sup>

identifiziert, was in Transportemissionen von etwa  $(44,88 \text{ m}^3 * 2,6 \text{ t/m}^3 * 68 \text{ g/tkm} * 68,9 \text{ km} * 0,001 \text{ kg/g})$  546,7 kg CO<sub>2</sub> resultiert. Im Gegensatz dazu würde die Produktion von neuem Beton etwa  $(44,88 \text{ m}^3 * 290 \text{ kg CO}_2\text{e/m}^3)$  13.015,2 kg CO<sub>2</sub> freisetzen.

Weitere Validierungen und die Verknüpfung von Datenbanken für die anderen Prozesse entlang der kreisförmigen Betonmodule werden in weiteren Forschungsarbeiten behandelt.

### Ausblick auf mögliche weitere Punkte

Wie die erste Entwicklung einer ROBETON-Ontologie gezeigt hat, lassen sich essentielle Prozesse (Qualitätsprüfung, Verfügbarkeitsprüfung, Transport etc.) in einer eigenen Datenbank verbinden, den gerade hier stoßen klassische Methoden wie dem BIM an ihre Grenzen. Die gezeigte Integrierung einer ontologiebasierten Datenbank zur Ermittlung der CO<sub>2</sub> Einsparung könnte in die bestehenden Planungstools weiter eingebaut werden. So könnte z.B. ein Revit-Tool entwickelt werden, welches in dem Designprozess mögliche Gebäudebestände abfragt und passende Bauteile direkt anbietet. So kann frühzeitig in der Entwurfsphase auf kompatible Bauteilgeometrien eingegangen werden.

## Entwicklung des Demonstrators

Abbildung 42  
Finales Demonstratorkonzept



Abbildung 43  
Zusammengesetzter Demonstrator auf der  
Referenzbaustelle



Nach der Evaluierung der möglichen Konzepte für den Prozessablauf wurde ein Demonstrator entwickelt, um das Set-Up und die entwickelten Technologien auf der Referenzbaustelle in Aachen zu validieren. Das entwickelte Demonstratorkonzept ist in Abbildung 42 dargestellt und wurde auf der Referenzbaustelle umgesetzt (siehe Abbildung 43). Es bietet die Möglichkeit, die entwickelten Innovationen unter realistischen Bedingungen zu untersuchen. So kann für die späteren Tests des Systems auf den Baustellen eine sichere Handhabung gewährleistet werden.

Um dies zu ermöglichen, wurde eine spezielle Konstruktion entworfen, die vorgefertigte Betonbauteile vertikal einspannen kann, um sie anschließend präzise zu zerteilen. Die Konstruktion besteht aus zwei Stahlrahmen, die aus verzinktem Stahl hergestellt wurden. Diese Stahlrahmen werden an den Fußpunkten mit der Fundamentplatte verschraubt, wobei spezielle Bolzenanker verwendet werden, um eine kraftschlüssige Verbindung zum Boden herzustellen. Ein besonderer Dank gilt der Firma Kerschgens Werkstoffe & Mehr GmbH, die als Sponsor für die Entwicklung dieses Demonstrators agierte und die beiden Stahlrahmen herstellte.

Jeder der Rahmen kann Kräften von bis zu 17 kN standhalten, was dem maximalen Anpressdruck der Baumaschine entspricht. Die Betonteile werden hinten mit Bolzenankern des Typs HST2 kraftschlüssig am Rahmen verbunden. Dabei werden die Rahmen seitlich über Stahlseile abgespannt, hierfür sind Ösen in den oberen Teil der Rahmen verschraubt, hier können die Stahlseile verbunden werden, auf dem Boden werden die Stahlseile an Bolzenankern befestigt. Zwischen den beiden Rahmen läuft ein innenliegendes Stahlkabel, dieses verbindet die beiden Rahmen. Durch die seitliche Absicherung können die Rahmen auch ohne die vorderen Betonbauteile aufgestellt werden. Diese Konstruktion erlaubt eine schnelle Montage und ermöglicht die Konfiguration realistischer Baustellenszenarien. Die Montage der Bauteile verlief wie in der Planung vorgesehen und funktionierte reibungslos.

Für die Evaluierung unter realen Bedingungen wurden spezielle Fertigbauteile entwickelt, die an bestehende Wandbauteile angelehnt sind und eine standardmäßige Bewehrung aufweisen. Diese Fertigbauteile wurden in enger Anlehnung an tatsächliche Wandstrukturen konzipiert, um eine realistische Prüfung der Sägeprozesse zu ermöglichen.

Die Bauteile wurden mit seitlichen Ösen ausgestattet, die es ermöglichen, sie mithilfe eines Krans zu bewegen und zu verschieben. Diese Vorrichtung erleichtert nicht nur den Transport der Bauteile, sondern ermöglicht auch eine flexible Positionierung während der Sägeprozesse.

Die Abmessungen der Bauteile betragen 2,4 Meter in der Höhe und 2 Meter in der Breite, mit einer Dicke von 25 Zentimetern. Diese Abmessungen entsprechen einer realistischen Wandstärke und ermöglichen die Durchführung von Sägeprozessen unter Bedingungen, die dem tatsächlichen Einsatz auf Baustellen nahekommen. Die Bewehrung sind repräsentativ für übliche Wandbauteile, was eine genaue Evaluierung der Sägeprozesse unter realen Bedingungen gewährleistet. Die Abmessungen sind so gewählt, dass sich die Bauteile noch mit dem Baustellenkran bewegen lassen.

## Evaluation des Systems auf der Referenzbaustelle

Dieses Kapitel widmet sich der Evaluierung der entwickelten Betonsägeanlage auf der Referenzbaustelle in Aachen. Die Evaluierung konzentriert sich auf die Überprüfung der Leistungsfähigkeit, Funktionalität und Praxistauglichkeit der Betonsägeanlage unter realen Bedingungen. Dabei werden insbesondere folgende Hauptpunkte untersucht:

**Robustheit der Sägeanlage:** Es wird analysiert, wie robust die Betonsägeanlage in der Lage ist, Betonbauteile zu schneiden und dabei die entwickelte Konstruktion stabil zu halten. Dies beinhaltet die Fähigkeit, verschiedene Bauteilgeometrien und -größen zu bewältigen. Wichtig ist hier, dass der Schnitt sicher durchgeführt werden kann und es zu keinen gefährlichen Schwingungen im System kommt. Diese Testreihe ist die Grundlage für die Erfolgreiche Durchführung späterer Schnittversuche.

**Positionierungssysteme:** Im Rahmen des Projekts wurden unterschiedliche Verfahren zur Positionierung und Ausgleich der Ungenauigkeiten entwickelt (Laserempfänger, Kamera etc.) Die Leistung der verwendeten Positionierungssysteme wird bewertet, um festzustellen, wie effektiv sie die korrekte Positionierung der Bauteile für den Schneidprozess unterstützen. Hierbei werden Genauigkeit, Zuverlässigkeit und reibungslose Interaktion mit der Betonsägeanlage überprüft.

**Funktion des (teil-) automatisierten BROKKS 170:** Die Funktionalität der (teil-) automatisierten BROKK-Maschine wird analysiert, um zu verstehen, wie gut sie in Kombination mit der Betonsägeanlage arbeitet. Hierbei wird untersucht, inwieweit die Maschine den Schneidprozess unterstützt und wie nahtlos die Steuerung und Zusammenarbeit ablaufen.

**Schnittqualität:** Die Qualität der durch die Betonsägeanlage erzeugten Schnitte wird begutachtet. Hierbei wird die Genauigkeit, die Sauberkeit und die allgemeine Beschaffenheit der Schnitte bewertet.

**Abschließende Evaluation der KPIs:** Die im Vorfeld definierten Key Performance Indicators (KPIs) werden zusammenfassend überprüft und bewertet. Hierbei fließen die gesammelten Daten und Erkenntnisse aus den vorherigen Hauptpunkten ein, um eine umfassende Einschätzung der Gesamtleistung der Betonsägeanlage zu ermöglichen.

Die Ergebnisse dieser Evaluierung bieten vertiefte Einblicke in die Leistungsfähigkeit der Betonsägeanlage im realen Einsatzszenario und dienen dazu, ihre Effektivität und Verwendbarkeit in Bezug auf die genannten Hauptpunkte zu validieren.

### Robustheit der Sägeanlage

Abbildung 44  
Ausgleichsvorrichtung des Endeffektors



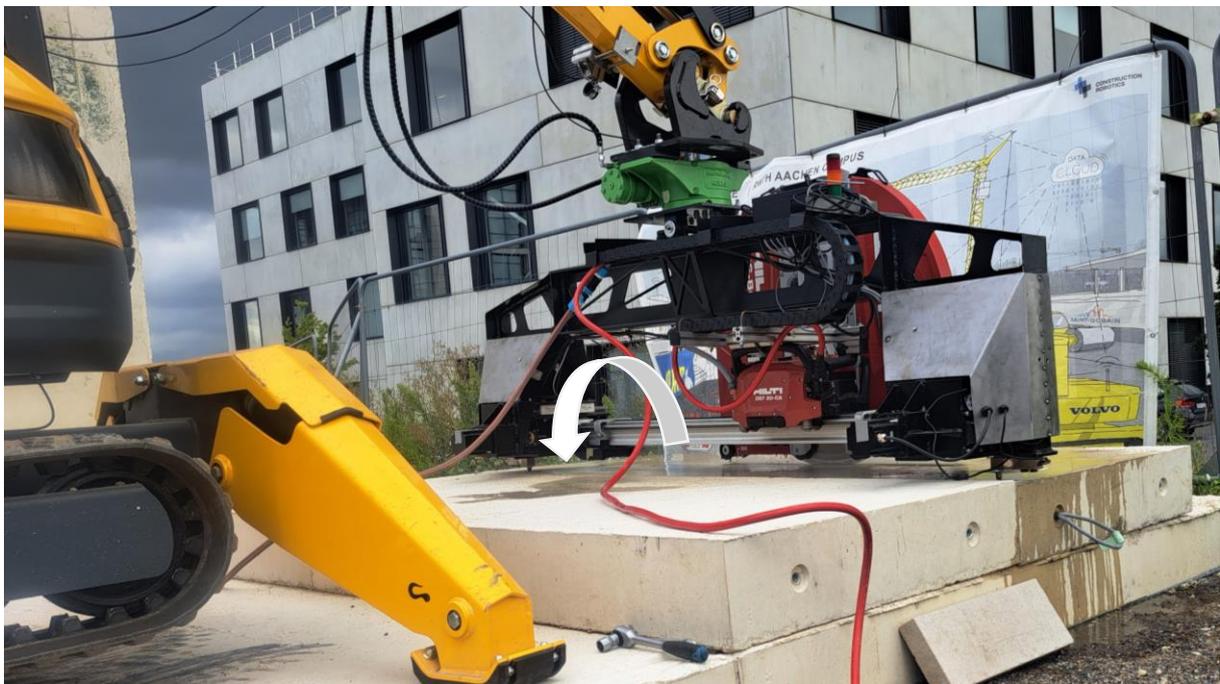
Für die ersten Schnittversuche wurde die Sägevorrichtung mithilfe des BROKKS auf einer Betonplatte positioniert. Im ersten Schritt war es wichtig, dass Faktoren, wie ein Absinken der Hydraulik, die bei einem vertikalen Schnitt zu erwarten sind, noch nicht auftauchen können.

Die ersten Tests mit dem Endeffektor zeigten, dass das Ausgleichsgelenk wie gewünscht funktioniert (siehe Abbildung 44). Die Sägeanlage war in der Lage,

Ungenauigkeiten auszugleichen und einen stabilen Schnittprozess zu gewährleisten. Die Tests begannen zunächst mit horizontalen Schnitten und einer mittleren Vorschubgeschwindigkeit der Säge. Das System zeigte noch Schwingungen, die in den nächsten Schritten ausgeglichen werden müssen. Es wurde deutlich, dass selbst geringfügige Bewegungen in der Linearführung bereits zu Vibrationen führen konnten. Hier zeigte sich, dass es wichtig war, den Entwicklungsfokus auf eine robuste Unterkonstruktion zu legen.

Bei einer leichten Bewegung in der Aufhängung besteht das Risiko, dass sich die Hilti Säge in der Laufschiene verdreht, da ein Moment beim Eintauchen der Säge entsteht. Die Verdrehung führt automatisch sogenannten Klemmern, dabei verdreht sich das Sägeblatt im Schnitt, welches zu einer erhöhten Reibung führt, welches folglich zum Blockieren des Motors führt (siehe Abbildung 45).

Abbildung 45  
Erste Schneideversuche mit dem zweiten Endeffektor



## Positionierungssysteme

Abbildung 46  
Laserempfänger zur automatischen Erfassung der Schnittkante

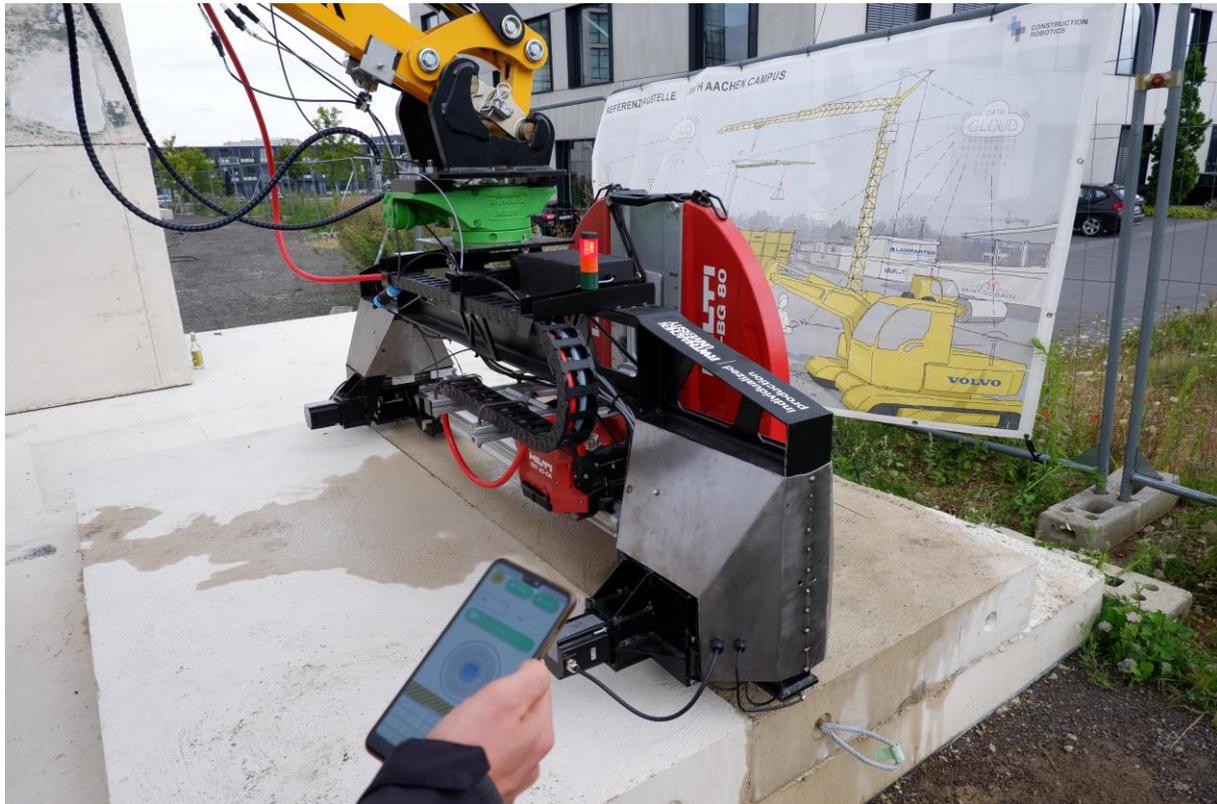


Im Rahmen systematischer Untersuchungen wurde die Effektivität eines Hilti Rotationslasers im Kontext des Laserpositionierungssystems evaluiert. Während dieser experimentellen Phasen wurden spezifische Modifikationen an den Beschleunigungsparametern durchgeführt, um eine optimierte Systemperformance zu gewährleisten. Simultan dazu wurde eine Sicherheitsarchitektur implementiert, die insbesondere das kontrollierte Abbremsen in den Peripheriezonen der Linearführung beinhaltet, mit dem Ziel, unkontrollierte Kollisionen mit den festgelegten Endpunkten zu vermeiden.

Eine signifikante Erkenntnis ist die adaptierte Fähigkeit des Systems, eine selbstständige Kalibrierung durchzuführen und konsistent die vorgegebene Nullposition zu detektieren. Dies wurde durch die präzise Konfiguration des PID-Reglers realisiert. Ein offener Aspekt, der weiterhin Untersuchungen erfordert, betrifft die Aufrechterhaltung der kalibrierten Beschleunigungswerte unter veränderten Lastbedingungen, speziell bei einer vertikalen Ausrichtung des Endeffektors.

Hinsichtlich der Messgenauigkeit konnte eine Positionierungspräzision von  $\pm 2$  mm festgestellt werden. Bei extremen Positionierungen stabilisiert sich das System innerhalb eines Zeitraums von 15 Sekunden. Ergänzend hierzu wurde festgestellt, dass konventionelle Linienlaser für die Detektion durch das System inadäquat sind. Basierend auf den aktuellen Erkenntnissen lassen sich ausschließlich Rotationslaser als kompatibel klassifizieren.

Abbildung 47  
Positionierungsanwendung auf dem Smartphone, Start der Laserausrichtung

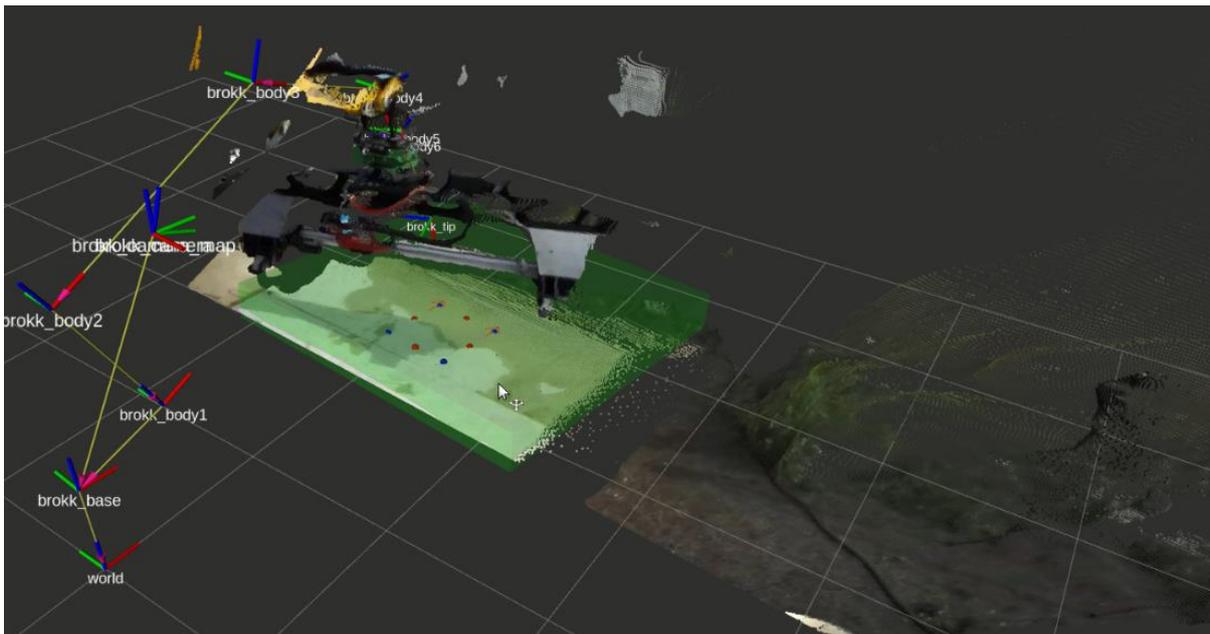
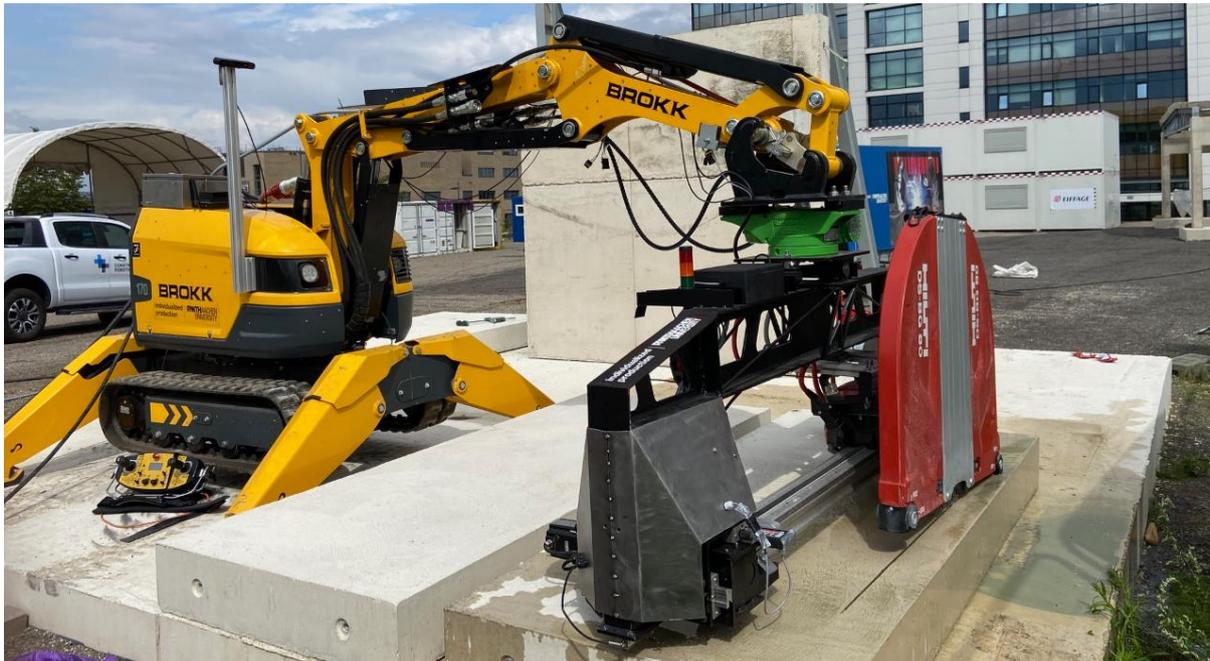


## Automatische Bauteilerkennung

Um das geplante System für den selektiven Schneideprozess zur Wiederverwendung von Materialien umzusetzen, haben wir zwei Hauptherausforderungen bezüglich der Steuerung identifiziert, die wir berücksichtigen und lösen müssen. Diese Herausforderungen beziehen sich auf (1) die präzise Regelung des Manipulators und (2) das Wahrnehmungssystem:

- **Präzise Regelung des Manipulators:** Das Steuersystem für den Roboter manipulator, der im selektiven Schneideprozess verwendet wird, muss mit Präzision und Genauigkeit entwickelt werden. Betonblöcke kommen in verschiedenen Größen und Formen vor, und der Schneideprozess erfordert kontrollierte und präzise Bewegungen, um genaue Schnitte zu gewährleisten, um das Potenzial der Wiederverwendung von dekonstruiertem Betonmaterial zu maximieren. Das Steuersystem des Manipulators sollte in der Lage sein, präzise und gleichzeitig robust genug zu sein, um diese anspruchsvolle Aufgabe zu bewältigen. Das Ergebnis von dem Experiment mit dem Hammer zeigt die Fähigkeit des entwickelten Systems sowohl entlang einer Trajektorie zu verfolgen und auch die gewünschte Gelenkbewegung in die entsprechenden Steuerungssignale umzusetzen. Da das Experiment mit der Sägevorrichtung basierend auf diesem Ergebnis durchgeführt wird, werden keine weiteren Experimente zur präzisen Regelung des Manipulators durchgeführt.
- **Wahrnehmungssystem:** Das Wahrnehmungssystem spielt eine entscheidende Rolle im selektiven Schneideprozess, da es das Ziel hat, den Betonblock genau zu identifizieren und von seiner Umgebung zu unterscheiden. Betonblöcke können in Farbe, Textur und struktureller Komplexität variieren, was ihre Erkennung herausfordernd macht. Darüber hinaus befinden sich ähnliche Strukturen wie Betonblöcke auf der Baustelle. In dieser Arbeitsumgebung sollte das Wahrnehmungssystem die Betonblöcke robust erkennen und klassifizieren.

Abbildung 48  
Arbeitsumgebung (oben) und der erkannte Betonblock (unten)

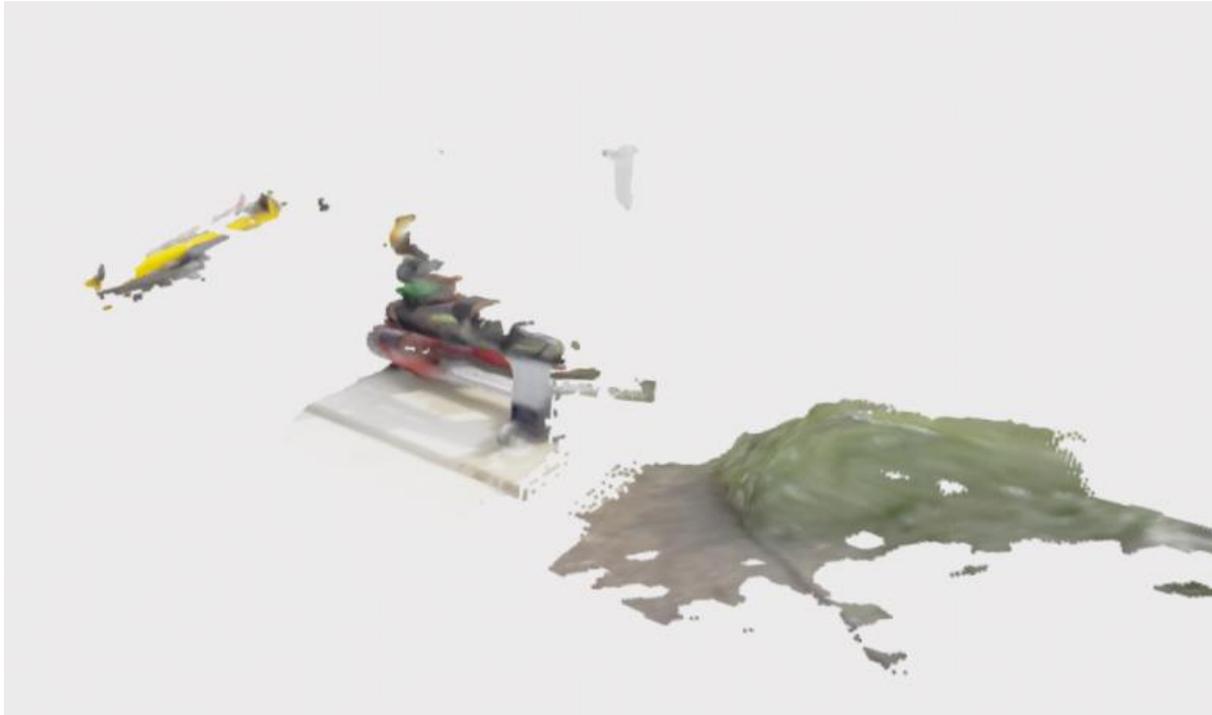


### Wahrnehmungssystem

In diesem Abschnitt wird erklärt, wie BROKK 170 den Betonblock von ihrer Arbeitsumgebung erkennt.

Der erste Schritt ist das Mapping. Hierfür wird das räumliche Mapping-Modul der Zed-Kamera verwendet. Die Kamera nutzt sowohl Tiefeninformationen als auch Farb-RGB-Bilder, um eine Karte der Welt, die sie sieht, zu erstellen. Die Umgebung wird für eine vordefinierte Zeit gemappt. Außerdem können wir den Mapping-Bereichsparameter anpassen, um potenziell unerwünschte Bereiche zu entfernen oder wichtige Teile in die Karte einzuschließen. Diese Karte wird dann dem Bediener im App-Fenster visualisiert (siehe Abbildung 49).

Abbildung 49  
Mappingergebnis visualisiert dem Bediener im App-Fenster



Als Nächstes bestimmen wir die Normalen für die gemappte Punktwolke. Hierfür unterteilen wir die Punktwolke in mehrere Bereiche und vergleichen die entsprechenden Normalen. Je nach der Varianz der Normalen wird der entsprechende Bereich als eine Ebene erkannt, siehe Abbildung 48. Der Bediener bestimmt den Schwellenwert für die Varianz. Ein kleiner Schwellenwert führt tendenziell zu weniger, aber qualitativ hochwertigeren Ebenen. Weiterhin besteht die Möglichkeit, weitere Parameterwerte für die Ebenenerkennung einzustellen:

- „coplanarity\_deg“ steuert die erlaubte Verteilung der Punktdistanzen von der Ebene. Größere Werte fördern eine engere Verteilung der Punkte um die angepasste Ebene.
- „outlier\_ratio“ legt das maximale zulässige Ausreißer-Verhältnis in einer zugehörigen Menge von Punkten fest, bevor sie abgelehnt wird.
- „min\_plane\_edge\_length“ legt die Mindestkantenlänge einer erkannten Ebene fest.
- „min\_num\_points“ legt die Mindestanzahl von Punkten fest, die eine Ebene enthalten muss, um erkannt zu werden.

Anschließend wählen wir die gewünschte Ebene mit Mausclick aus und projizieren dann die x- und y-Koordinaten vom Rahmen in das Koordinatensystem der Punktwolke. Wir überprüfen, welcher Punkt ausgewählt wurde. Basierend auf diesem ausgewählten Punkt vergleichen wir die Entfernungen zu allen Ebenen von Abbildung 50, um herauszufinden, welcher am nächsten liegt. Auf diese Weise haben wir die für uns interessante Ebene ausgewählt. Wir entfernen nun alle zuvor angezeigten Begrenzungsrahmen aus der Visualisierung, außer dem, den wir gerade ausgewählt haben, siehe Abbildung 51.

Nachdem die Ebene von Interesse ausgewählt worden ist, zeichnen wir ein vordefiniertes Muster auf die erkannte Ebene, um sie in kleinere Stücke zu schneiden. Das bedeutet, eine bestimmte Anzahl von Fliesen mit vordefinierten Abmessungen werden versucht auf die Ebene untergebracht zu werden. Falls

die Gesamtfläche der gewünschten Anzahl der Fliesen größer als die erkannte Ebene ist, wird die Information dem Bediener vermittelt und der Bediener kann neue Parameterwerte eingeben, ansonsten werden die Fliesen in Form von Eckpunkten zunächst auf die Ebene gebracht. Aus diesen Eckpunkten wird dann der Mittelpunkt bestimmt (siehe Abbildung 48 unten blaue Punkte), was dem Zielpunkt von der Sägevorrichtung entspricht (siehe Abbildung 48 unten rote Punkte).

Abbildung 50  
Erkannte Ebenen von der gemapten Punktwolke

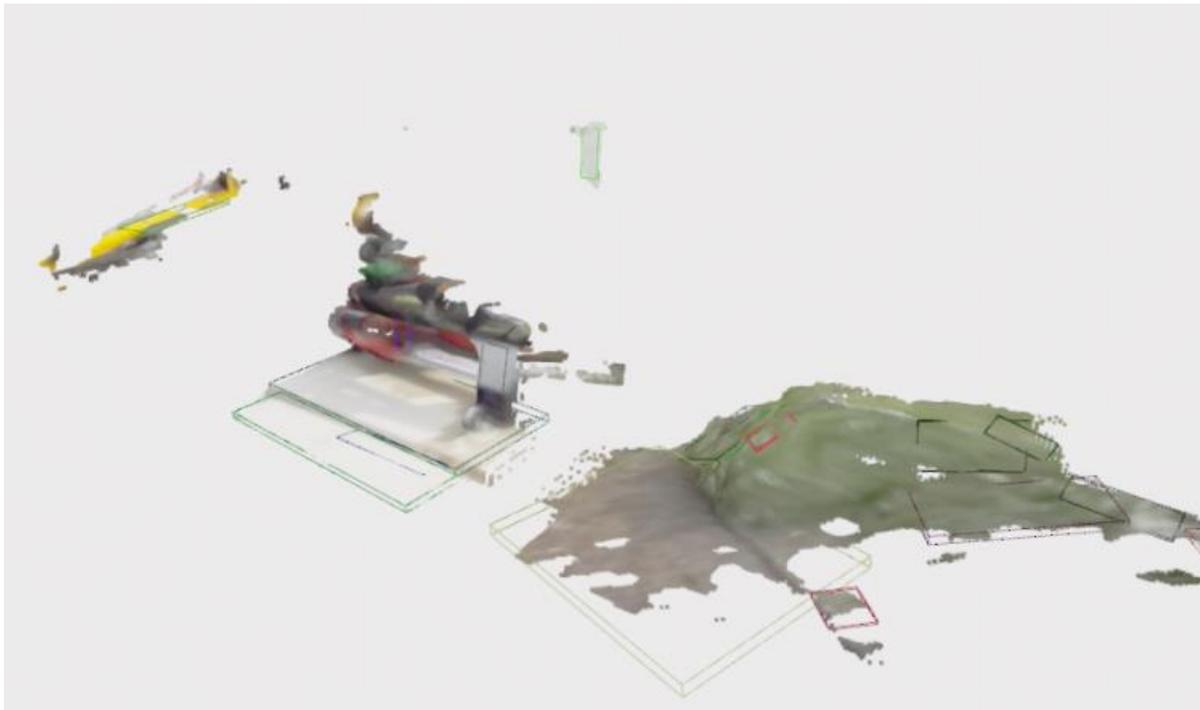
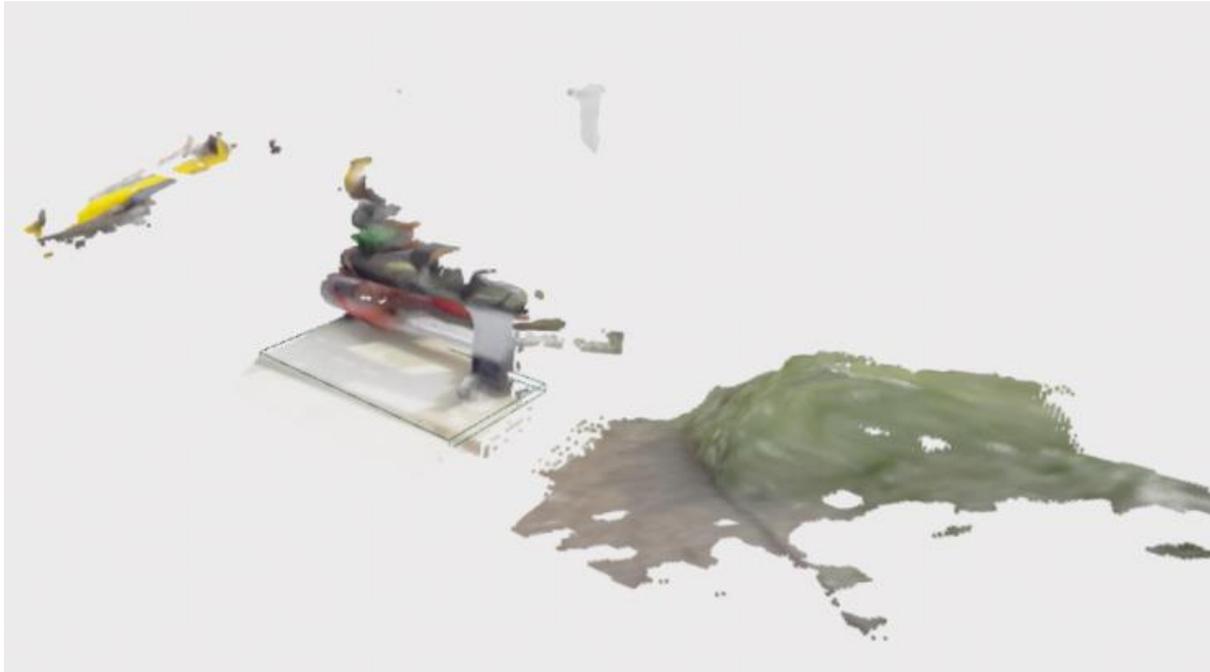


Abbildung 51  
Selektierte Ebene von der gemappten Punktwolke



Der weitere Verlauf des Arbeitsprozesses folgt einer ähnlichen Struktur wie im Experiment mit dem Hammer. Der ermittelte Zielpunkt wird dem Trajektorienplaner übergeben, um die entsprechenden notwendigen Gelenkbewegungen zu berechnen. Diese gewünschten Gelenkbewegungen werden zusammen mit der aktuellen Gelenkposition an den Lowlevel-Regler weitergeleitet, welcher die entsprechenden Steuerungssignale erzeugt. Sobald die Säge die Zielposition erreicht hat, wird Druck aufgebaut, indem die Säge in die negative z-Richtung bewegt wird. Dieser Druckaufbau spielt eine wichtige Rolle für einen sicheren Schneidprozess, da er verhindert, dass die Säge und das Sägeblatt während des Schneidens wackeln, was zu schweren Unfällen führen könnte. Sobald das Schneiden an einer Zielposition abgeschlossen ist, wird der BROKK 170 die Säge zur nächsten Zielposition positionieren und die Arbeitsschritte werden iterativ bis zur letzten Zielposition wiederholt.

## Schnittversuche

Im Folgenden werden die wichtigsten Testschritte und die dabei gemachten Erfahrungen und Anpassungen erläutert.

### **Test des Schneidverhaltens in liegender Konfiguration:**

Der zweite Versuch mit dem horizontalen Schneiden eines Bauteils hatte zum Ziel, die Stabilität der Sägeeinheit durch den Einsatz des Brokk-Roboters zu untersuchen, nachdem die Linearführung nachgestellt wurde. Von besonderer Bedeutung war dabei die Frage, ob der Brokk-Roboter genügend Anpresskraft aufbringen kann, um die Sägeeinheit während des Schneidvorgangs zu stabilisieren. Die Entscheidung, die Säge nicht direkt an einer Wand zu testen, erwies sich als vorteilhaft, da so das Risiko eines Absinkens des Brokk-Arms minimiert werden konnte. Das Hauptaugenmerk lag auf der Überprüfung der Stabilität und nicht auf der Schnittqualität an sich.

Abbildung 52  
Schneideversuche auf der Referenzbaustelle in liegender Konfiguration



Während der Versuche traten einige Ergebnisse zutage:

**Leichte Schwingungen:** Anfänglich wurden leichte Schwingungen beobachtet, die jedoch durch Anpassungen an der Linearführung erfolgreich eliminiert werden konnten. Gerade die Linearführung für die Feinverstellung stellt einen neuralgischen Punkt in der Entwicklung der Sägeeinheit dar. Die hohen Kräfte müssen aufgenommen werden können, gleichzeitig muss das System leichtgängig verstellbar sein.

**Eintauchtiefe der Säge:** Die Säge konnte erfolgreich bis zur maximal möglichen Schnitttiefe von 35 cm in das Bauteil eintauchen. Dieses Ergebnis zeigt die Effektivität des Sägevorgangs und bestätigt, dass die Sägeeinheit in der Lage ist, auch tiefere Einschnitte in Bauteile vorzunehmen. Dies ist die Voraussetzung für das Schneiden der Betonwand.

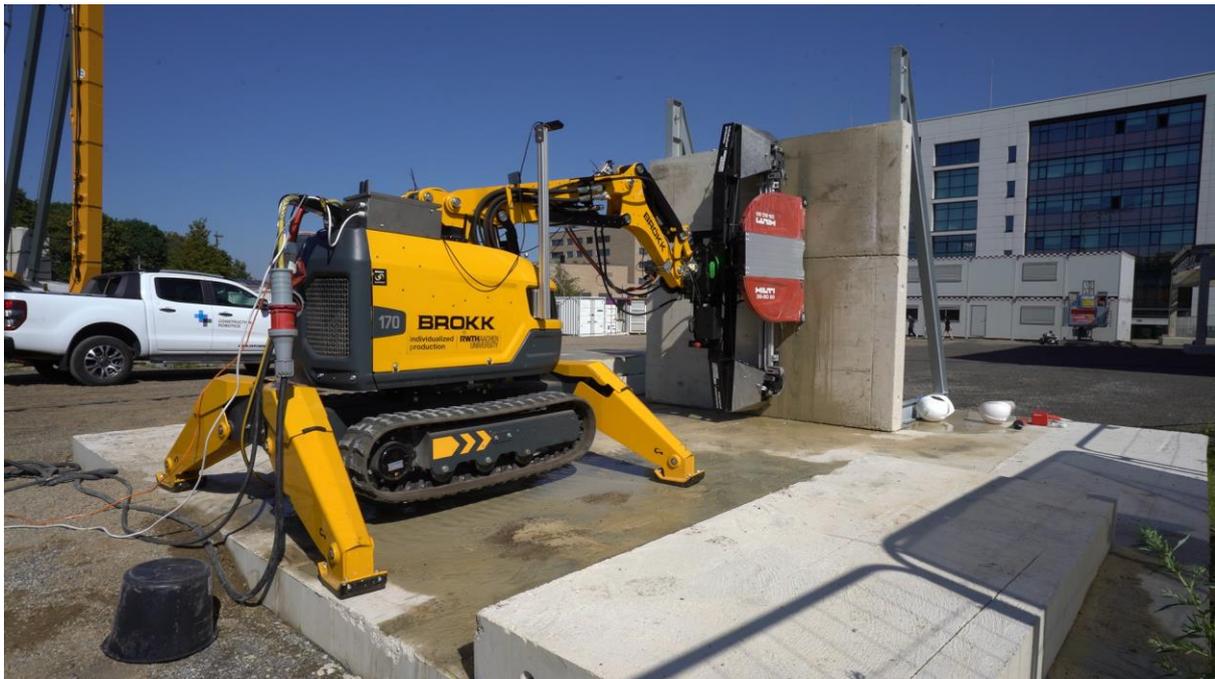
**Elektronik:** Um eine Überhitzung des Sägemotors zu vermeiden und die Staubentwicklung während des Schneidvorgangs einzudämmen, wird die Säge während des gesamten Schneidvorgangs aktiv mit Wasser gekühlt. Die umgebende Elektronik muss daher unbedingt vor dem Wasser geschützt werden. Während der Versuche ist kein Wasser in die Komponenten eingedrungen.

**Linearführung und Feinausrichtung:** Durch die Linearführung konnte die Säge ohne Einschränkungen an die gewünschte Stelle bewegt werden.

### Test des Schnittverhaltens bei stehender Konfiguration

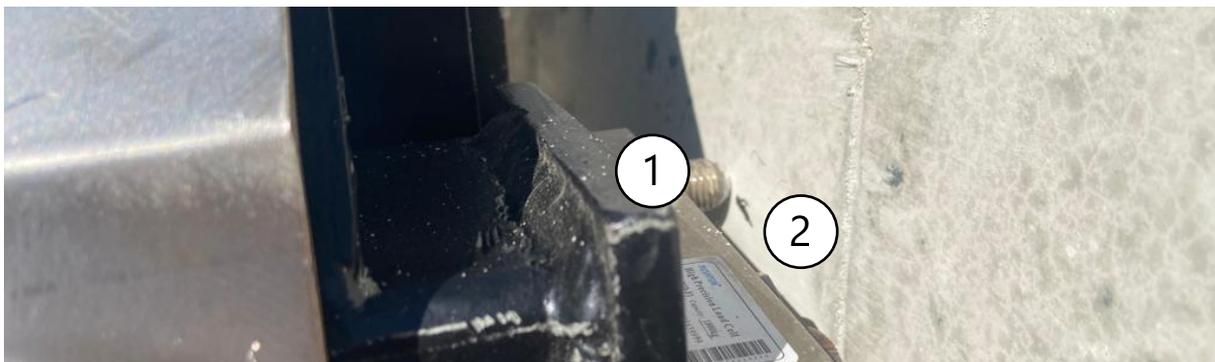
Die Funktion der (teil-)automatisierten BROKK-Maschine wurde im Rahmen der erfolgreichen Durchführung von Sägeschnitten an einer Betonwand getestet. Ein zentrales Element des Setups war die Nachführung der Absenkhydraulik durch die Brokk-Steuerung. Nachdem die Säge grob an der Betonwand positioniert wurde, wurde die Position des BROKK Arms gespeichert, so dass die Steuerung diese Position halten kann. Auf diese Weise kann die Beibehaltung der eingestellten Armposition gewährleistet werden. Diese Funktion war entscheidend, um dem kontinuierlichen Absinken des Arms entgegenzuwirken.

Abbildung 53  
Vertikaler Schnitt in die Betonwand



Vor den Schnitten wurden Hypothesen über das Absenkverhalten des mit der Säge verbundenen Arms überprüft. Besonders kritisch wäre ein Absinken während eines horizontalen Schnittes, da sich das Sägeblatt in der Schnittkante verkeilen könnte. Dieses Problem ist auch einer der Hauptgründe, warum es bisher keine vergleichbaren industriellen Lösungen gibt, da die Nachregelung der Hydraulik eine große Herausforderung darstellt.

Abbildung 54  
Test zur aktiven Positionsnachführung (1 Kontaktdorn der Säge, 2 Positionsmarke)



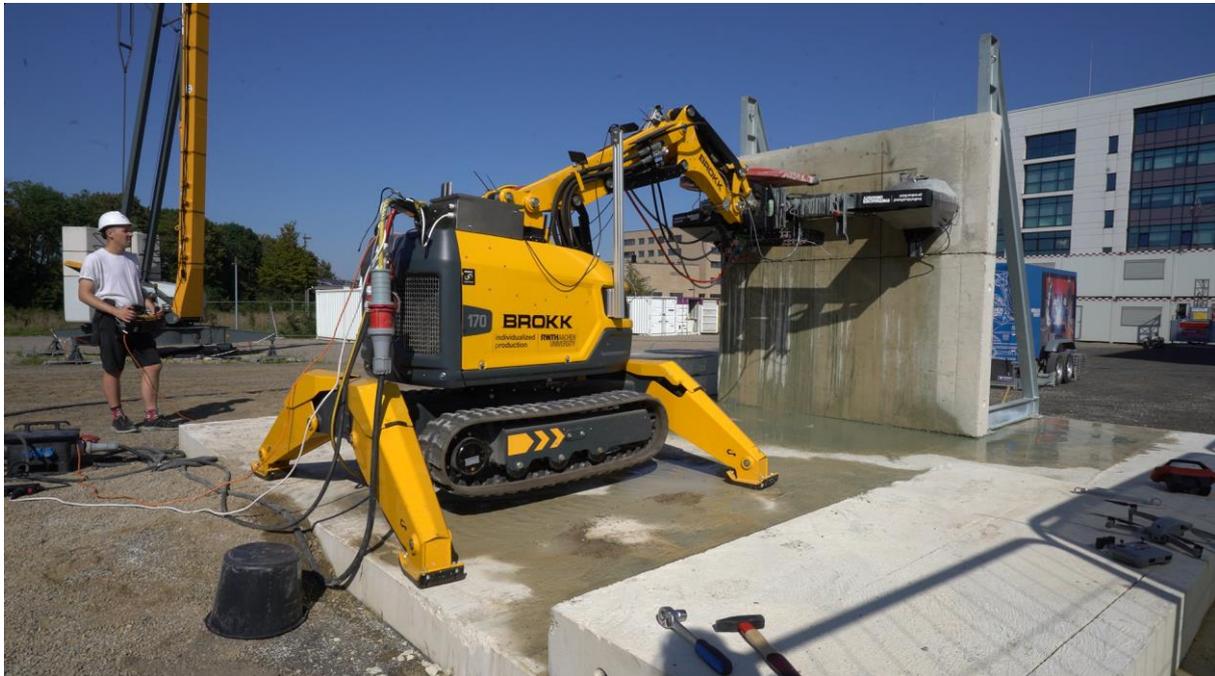
Folgende Punkte konnten in den Tests festgestellt werden:

**Nachsteuerung des Arms:** Es wurde deutlich, dass der Arm bei passiver Positionierung deutlich absinkt, während er bei aktiver Positionierung seine Position stabil hält (siehe Abbildung 54). Ohne aktive Steuerung, sind die Versuche nicht durchführbar.

**Durchschneiden durch die Bewehrung:** Die entwickelte Sägevorrückung erwies sich als funktionsfähig und konnte sogar durch Stahlbewehrung schneiden, ohne instabil zu werden. Dabei schnitt das Sägeblatt entlang eines Bewehrungsdrahtes. Diese neuralgische Schnittsituation gilt als Quelle für so genannte Klemmer. Die Tatsache, dass keine Schwingungen auftraten, beweist die Stabilität der Konstruktion.

**Horizontaler Schnitt:** Erstmals konnte gezeigt werden, dass mit einer hydraulischen (teil-)automatisierten Baumaschine horizontale geführte Schnitte in Beton möglich sind.

Abbildung 55  
Horizontaler Schnitt in die Betonwand



**Linearführung und Feinausrichtung:** Die Positionierung der Säge an der Betonwand zeigt, dass eine Feinausrichtung der Säge allein mit dem Hydraulikarm nicht möglich ist. Nach dem Anpressen der Säge an die Betonwand konnte die Säge mit Hilfe der Feinausrichtung in die gewünschte Position gefahren werden. Es zeigt sich, dass durch die Abstimmung der (teil-)automatisierten Baumaschine und der eingebauten Linearführung wertvolle Zeit eingespart werden kann. Diese würde durch eine aufwändige Feinpositionierung über den Hydraulikarm entstehen. Mit der entwickelten App kann die Säge schnell auf die Zielposition eingestellt werden (siehe Abbildung 47).

Abbildung 56  
Herausnahme des ausgetrennten Bauteils mittels eines Krans und zwei gesetzter Betonanker



Die Ergebnisse dieser Versuche waren viel versprechend. Ein Bauteil konnte erfolgreich und ohne Beschädigung aus der Betonwand herausgetrennt werden. Die entwickelte Sägevorrückung erwies sich als funktionsfähig und konnte sogar durch Stahlarmierungen schneiden, ohne instabil zu werden. Insbesondere der horizontale Schnitt in Verbindung mit der Feinausrichtung über eine Linearführung stellt einen wichtigen Schritt in Richtung einer (teil-)automatisierten Gewinnung von Betonbauteilen dar.

### Schnittqualität

Die Schnittqualität weicht nicht von der manuell geführten Variante ab. Hinzu kommt, dass die Sägevorrückung neben einem orthogonalen Schnitt in die Wand, auch unterschiedliche Schnittwinkel erlaubt. So lassen sich unterschiedliche Bauteilverzahnungen durch eine geneigte Schnittkante erzeugen.

### Abschließende Evaluation der KPIs

Die Projektziele in Form von KPIs werden im Folgenden betrachtet.

Die angestrebte Steigerung der Genauigkeit der Rückbautätigkeiten um 4-5% betrachtet die gesamte Prozesskette, einschließlich des Ausmessens der Bauteilposition und des Platzierens der Säge. Ein wesentlicher Vorteil des neuen Verfahrens ist die Reduzierung des Aufwands für einen Schnitt um mindestens 15% im Vergleich zum herkömmlichen manuellen Verfahren. Dabei spielt die Integration von Säge und Schiene in einem Schritt eine zentrale Rolle, da hierbei zahlreiche Zwischenschritte des manuellen Verfahrens entfallen. Diese umfassen unter anderem das Befestigen von den zwei Konsolen und dem Anbringen der Schiene auf diesen. Dann müssen manuell der Sägemotor und das Sägeblatt auf die Schiene gesetzt werden. In dem entwickelten Verfahren bleibt das System permanent zusammengesetzt. Dies spart Zeit, so lässt sich die Konstruktion in unter drei Minuten schnittbereit platzieren. Weiterhin kann eine millimetergenaue Schnittführung ermöglicht werden, was den Anforderungen an die Genauigkeit entspricht.

Die Arbeitsgeschwindigkeit der Arbeiterinnen und Arbeiter soll durch die Automatisierung um 20% gesteigert werden. Im Vergleich zum manuellen Anbringen der Säge, das bis zu 15 Minuten dauern kann, ermöglicht die Baumaschine eine Platzierung der Säge in nur 3 Minuten. Das hohe Eigengewicht der Säge und des Sägeblatts, das beim manuellen Anbringen eine Herausforderung darstellt, wird durch die Baumaschine gehandhabt. So kann die Säge ohne körperliche Belastung an, für das Personal schwer zu erreichenden Bereich, angebracht werden. Der Aufbau einer Hilfskonstruktion fällt somit weg. Ein weiterer Vorteil ist, dass das Sägeblatt nicht bei jeder Anwendung neu angebracht werden muss.

In Bezug auf die Arbeitssicherheit ergeben sich ebenfalls signifikante Verbesserungen. Die Belastung für die Bedienerinnen und Bediener wird durch die Baumaschine, die die 35kg schwere Säge fixiert, erheblich verringert. Das Anbringen der Schienenbefestigung, das Bohren in die Wand und damit verbundene Staub- und Lärmentwicklung entfallen. Die sichere Führung der Stromkabel über die Säge durch eine Schleppkette reduziert zusätzlich das Unfallrisiko. Somit trägt die Automatisierung nicht nur zur Effizienzsteigerung bei, sondern erhöht auch die Arbeitssicherheit erheblich.

Das Verfahren befindet sich aktuell noch in der Testphase, durch die Anwendung des Verfahrens in der Baupraxis werden sich weitere Punkte ergeben, die bis jetzt noch nicht relevant sind.

## Ergebnistransfer und ökonomische Validierung

Das Projekt hat im Rahmen seiner Entwicklung bedeutende Erfolge verzeichnet. Ein großer Meilenstein war die Auszeichnung mit dem zweiten Platz beim renommierten Bauma Innovationsaward 2022, was die innovative Bedeutung und die wissenschaftliche Relevanz der Forschungsarbeit unterstreicht. Weiterhin wurde das Projekt im Jahr 2023 auf der Open Campus Week 2022 und 2023 einem spezialisierten Fachpublikum präsentiert, was die wissenschaftliche Gemeinschaft und Industrieexperten gleichermaßen ansprach.

Die begleitende Veröffentlichung der Forschungsergebnisse bei verschiedenen Konferenzen diente der Dissemination und Diskussion der Erkenntnisse innerhalb der wissenschaftlichen Gemeinschaft. Darüber hinaus trägt die Weiterführung der Arbeit in Form von Dissertationen zur Vertiefung des Verständnisses und zur Erweiterung des Wissens bei. Zudem wurden zwei Masterarbeiten initiiert, die sich auf spezifische Aspekte des Projekts konzentrieren und zur Gesamtforschung beitragen.

Aufbauend auf der erfolgreichen Entwicklung des Demontageprozesses wurde ein Folgeantrag gestellt. Denn ein wichtiger nächster Schritt in Richtung Marktreife ist die Charakterisierung der Bauteile. Dabei soll ein Verfahren entwickelt werden, welches die Gebrauchstauglichkeit der geschnittenen Bauteile ermittelt, um mögliche Schadstoffbelastungen und Bauteilschädigungen frühzeitig zu erkennen.

Eine Schlüsselkomponente des Projekts war die Einbindung wichtiger Akteure aus der Bauwirtschaft, darunter renommierte Unternehmen wie die PORR AG, LEONHARD WEISS GmbH & Co. KG, Hilti AG und Brokk AG. So konnten durch die begleitenden Gespräche mit Industriepartnern weitere Anwendungsfälle ermittelt werden.

Abbildung 57

Wandfläche zur Gewinnung von Bauteilen an der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf



Für die Zukunft sind weitere ambitionierte Ziele gesetzt. Geplant sind Tests mit Studierenden auf dem Gelände des BLB NRW, wobei bereits eine spezifische Wandfläche für praktische Experimente ausgewählt wurde. Dieser praktische Ansatz dient der Erprobung und Verfeinerung der Forschungsergebnisse. Außerdem ist die Integration der Projektergebnisse in den Lehrplan des Masterstudiengangs Construction Robotics vorgesehen, was die Ausbildung im Bereich der Bau-Robotik bereichern und praxisnah gestalten soll. Diese geplanten Schritte unterstreichen das Bestreben, wissenschaftliche Erkenntnisse in praktische Anwendungen zu überführen und so den Brückenschlag zwischen Theorie und Praxis zu festigen.

## Ergebnisse

Im Kontext der durchgeführten Studie und Entwicklung auf der Referenzbaustelle in Aachen im Rahmen des Projekts ROBETON, wurden die erweiterten Funktionen der entwickelten Einheit aus Brokk 170 und der Hilti Betonsäge getestet. Hierbei wurden die in den vorherigen Abschnitten beschriebenen Systeme und Ansätze, einschließlich der verschiedenen Sägenendeffektoren und der Motorsteuerung, unter realen Bedingungen evaluiert.

Nach der Entwicklung und Fertigung der einzelnen Systembauteile wurden im Rahmen des Projekts eine Reihe an Tests durchgeführt, um die Kontrolle und Effizienz des Schneidverfahrens zu evaluieren. Unter Berücksichtigung aller sicherheitstechnischen Aspekte konnte festgestellt werden, dass der entwickelte Endeffektor in Kombination mit dem (teil-) automatisierten BROKK 170 den vorgesehenen Schneidprozess zuverlässig ausführen kann.

Primär lag der Fokus auf der Entwicklung eines Systems, in dem die einzelnen Komponenten nahtlos ineinandergreifen. Nach entsprechenden Anpassungen und Optimierungen konnte das System erfolgreich eingestellt werden. Parallel dazu wurden die automatischen Platzierungsalgorithmen evaluiert. Hier zeigte sich, dass die Systemkamera die Bauteile präzise erkennt und die resultierenden Koordinaten zielgenau ansteuert. Zudem wurde durch Tests bestätigt, dass lasergestützte Verfahren in der Lage sind, Positionen mit einer beeindruckenden Genauigkeit von bis zu 2 mm anzufahren.

Während diese Zwischenergebnisse bereits wesentliche Fortschritte und Erkenntnisse in der Entwicklung widerspiegeln, konnte in abschließenden Tests unter realen Bauteilbedingungen ein Bauteil aus einer Betonwand getrennt werden.

Abbildung 58  
Horizontaler Schnitt in eine Betonwand



Bestehende Einschränkungen der aktuellen digitalen Modelle (BIM) konnten durch einen neuartigen Ontologie-Ansatz gelöst werden. Der vielversprechende Ansatz bietet die Möglichkeit, neben den Bauteilen auch die Bauteilhistorie zu berücksichtigen. So kann neben den notwendigen Prüfprozessen auch der geschätzte CO<sub>2</sub>-Verbrauch abgeschätzt werden.

### **Einordnung in den wissenschaftlichen Kontext**

Die unabdingbare Notwendigkeit eines Umdenkens in dem Umgang mit dem nach Wasser meistverwendeten Material Beton und mit ihm einhergehend enormen Verbrauch an Mineralien und der hohe CO<sub>2</sub> Ausstoß<sup>16</sup> zeigt seine Bedeutung in Wirtschaft und Wissenschaft deutlich.

Der genannte Erfolg bei dem horizontalen Schnitt von Betonplatten zeigt die Relevanz der Automation im Bereich des Rückbaus. Dies kann einen direkten Einfluss auf die Kosten für mögliche Rückbauprojekte haben.

Zur Veranschaulichung: Die Kosten für traditionelle Betonsägearbeiten liegen laut BKI für einen Meter Sägeschnitt bei 183 Euro für Schnitttiefen bis 43 cm<sup>16</sup>. Durch die Automatisierung können diese Kosten deutlich reduziert werden, da sie die Arbeitsgeschwindigkeit erhöht und die Notwendigkeit manueller Eingriffe verringert.

Aktuell gibt es auf dem Markt keine vergleichbaren Produkte, was das hohe Interesse namhafter Firmen wie der Hilti AG an diesem Verfahren erklärt. Gerade im Bereich der Gebäudesanierung und dem Umbau von Gebäuden zeigen die Baufirmen schon hohes Interesse. Hier sind die Hürden für einen Einsatz geringer.

## Ausblick

Abbildung 59  
Übersicht auf den Versuchsaufbau auf der Referenzbaustelle in Aachen



Mit Blick auf die zukünftigen Entwicklungen in der Anwendung von teilautomatisierten Baumaschinen im Bereich des Rückbaus und der Sanierung von Betonstrukturen können einige interessante und vielversprechende Wege gegangen werden:

**Kompakte Bauweise:** Durch eine kompakte Konstruktion der Maschinen wird die Möglichkeit geschaffen, freie Randbereiche von Wänden präziser auszutrennen. Dies maximiert die nutzbare Fläche der Wandelemente und fördert deren Wiederverwendung, was einen Beitrag zur Nachhaltigkeit leistet.

**Weiterentwicklung der Pfadfindungsalgorithmen:** Die Optimierung der Algorithmen zur Bestimmung des optimalen Einsatzortes der Baumaschinen ist ein zentrales Element. Eine verbesserte Platzierung der Maschinen ermöglicht eine effizientere und genauere Durchführung der Rückbauarbeiten.

**Feinjustierung der Sägevorrichtung:** Fortschritte bei der Feinausrichtung von Sägevorrichtungen können zu erheblichen Zeiteinsparungen führen. Dies erhöht die Gesamteffizienz des Prozesses und reduziert den Zeitaufwand für das Ausrichten. Insbesondere durch eine höhere Autonomie des Prozesses kann Zeit eingespart werden. Findet die Maschine die vorgegebene Position auf Basis der Daten aus der Ontologie, können mehrere Prozesse parallel gestartet werden.

**Erschließung neuer Anwendungsbereiche:** Die Identifizierung weiterer Einsatzmöglichkeiten, insbesondere im Bereich der Sanierung und des Umbaus bestehender Betonbauten, bietet das Potenzial, die Kosten dieser Maßnahmen deutlich zu senken. Das Verfahren wurde bisher nur mit Betonelementen erprobt. Die Hilti-Säge kann aber auch Ziegel schneiden.

**Weiterentwicklung der Ontologie:** Eine umfassende Weiterentwicklung der Ontologie, einschließlich des Testens in einem kompletten Prozess, der Integration von Prüfverfahren und Transport sowie der Implementierung von Tools zur Echtzeitkontrolle möglicher Bauteile in Software wie Revit, verspricht eine umfassendere und effizientere Steuerung der Bauvorhaben.

Insgesamt weisen diese Entwicklungen auf eine zunehmend digitalisierte und automatisierte Zukunft im Baugewerbe hin, in der Präzision, Effizienz und Nachhaltigkeit im Vordergrund stehen.

## Mitwirkende

### Autorinnen und Autoren

Prof. Brell-Cokcan, Sigrid (RWTH Aachen, Lehrstuhl für Individualisierte Bauproduktion)

Lee, Joo (RWTH Aachen, Lehrstuhl für Individualisierte Bauproduktion)

Heuer, Christoph (RWTH Aachen, Lehrstuhl für Individualisierte Bauproduktion)

Jung, Victoria (RWTH Aachen, Lehrstuhl für Individualisierte Bauproduktion)

### Weitere Mitwirkende

Lentes, Aaron (RWTH Aachen, Lehrstuhl für Individualisierte Bauproduktion)

Laprell, Simon (RWTH Aachen, Lehrstuhl für Individualisierte Bauproduktion)

### Projektpartner und weitere Fördermittelgeber

BROKK DA, Friedenweilerstr. 37 C / D-79877 Friedenweiler

Hilti Deutschland AG , Hiltistraße 2 / D-86916 Kaufering

## Kurzbiographien



### **Prof. Dr. Sigrid Brell-Cokcan**

Sigrid Brell-Cokcan leitet den Lehrstuhl für Individualisierte Bauproduktion (IP) an der RWTH Aachen. Seit 2003 ist sie Mitglied der Österreichischen Architektenkammer, derzeitige Präsidentin der research Association for Robots in Architecture, einer weltweiten Plattform, die Roboter für die Kreativbranche wie Architektur und Industriedesign zugänglich machen will.



### **Hyung Joo Lee**

Hyung Joo Lee ist seit 2018 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl IP an der RWTH Aachen tätig. Sein Forschungsschwerpunkt liegt im Bereich der Automatisierung von Baumaschinen. Er absolvierte sein Studium in Elektrotechnik und Informationstechnik ebenfalls an der RWTH Aachen.



### **Christoph Heuer**

Christoph Heuer ist seit 2020 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl IP an der RWTH Aachen tätig. Sein Forschungsschwerpunkt liegt in der Entwicklung automatisierter Fertigungsverfahren und der Entwicklung von Baustellensensorik für die Baustellenlogistik. Er absolvierte sein Studium in Architektur an der TU Darmstadt und der RWTH Aachen.



### **Victoria Jung**

Victoria Jung ist seit 2021 als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl IP an der RWTH Aachen tätig. Sie absolvierte ihr Studium in Wirtschaftsingenieurwesen mit Fachrichtung Bauingenieurwesen an der RWTH Aachen. Ihr Forschungsschwerpunkt liegt im Bereich der Definition der Prozessanforderungen und des Informationsaustauschs für den Rückbau.

## Literaturverzeichnis

- Anna Wagner, Laura Kristina Moeller, Christian Leifgen, Christian Eller, 04.11.2019: BPO: Building Product Ontology. Zugriff: <https://www.projekt-scope.de/ontologies/bpo/>.
- App-Entwicklung mit Googles Cross Platform Framework. Zugriff: <https://entwickler.de/mobile/mach-die-flutter-001>.
- Artificial intelligence in the construction industry: A review of present status, opportunities and future challenges.
- Bastien-Masse, M.; Fivet, C., 2023: Reuse of concrete components in new construction projects: Critical review of 77 circular precedents, 383: 135235.
- 2023: Bauabfälle. Zugriff: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/bauabfaelle#verwertung-von-bau-und-abbruchabfallen>[ abgerufen am 2023/08/11].
- (P)RECAST – Reuse of Precast Concrete Elements. Zugriff: <https://www.dti.dk/projects/p-recast/43887>[ abgerufen am 2023/08/11].
- Beetz, J.; van Leeuwen, J.; Vries, B. de, 2009: IfcOWL: A case of transforming EXPRESS schemas into ontologies, 23(1): 89–101.
- Bonduel, M.: A Framework for a Linked Data-based Heritage BIM.
- Bosh Rexroth. Zugriff: <https://www.boschrexroth.com/en/de/company/press/latest-developments-for-off-highway-machinery-at-bauma-2022-10688.html>[ abgerufen am 2023/01/28].
- BOT: the Building Topology Ontology of the W3C Linked Building Data Group: swj2224.
- Brell-Cokcan, S.; Heuer, C.; Lee, J., 2022: Concept of a Robot Assisted On-Site Deconstruction Approach for Reusing Concrete Walls.
- Brell-Cokcan, S.; Lee, H., 2020: Robotics in Construction. In: Ang, Marcelo H.; Khatib, Oussama; Siciliano, Bruno. Berlin, Heidelberg: 1–11.
- buildingSMART Technical, 2023: ifcOWL - buildingSMART Technical. Zugriff: <https://technical.buildingsmart.org/standards/ifc/ifc-formats/ifcowl>[ abgerufen am 28.02.2023].
- buildingSMART Technical, 2023: ifcSite. Zugriff: <https://standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4/ADD1/HTML/schema/ifcproductextension/lexical/ifcsite.htm>[ abgerufen am 29.03.2023].
- Cao, Q.; Giustozzi, F.; Zanni-Merk, C.; Bertrand Beuvron, F. de; Reich, C., 2019: Smart Condition Monitoring for Industry 4.0 Manufacturing Processes: An Ontology-Based Approach, 50(2): 82–96.
- Christoph Gengnagel; Christoph Henschel, 2022: Handbuch Handbuch zur Wiederverwendung von Stahlbetonelementen aus dem Rückbau von Gebäuden.
- Coleman, Sucan, Chitta, Correll, 05.2014: Reducing the Barrier to Entry of Complex Robotic Software: a Movelt! Case Study.
- DGUV. Zugriff: <https://publikationen.dguv.de/widgets/pdf/download/article/4271>[ abgerufen am 2023/01/30].
- DST 20-CA Original-Bedienungsanleitung.
- Edlira Vakaj Kalemi, Franco Cheung, Abdel-Rahman Tawil, Panagiotis Patlakas Kudirat Alyania, 2020: ifcOWL-DfMA a new ontology for the offsite construction domain.

- Gifftthaler, M.; Sandy, T.; Dörfler, K.; Brooks, I.; Buckingham, M.; Rey, G.; Kohler, M.; Gramazio, F.; Buchli, J., 2017: Mobile robotic fabrication at 1:1 scale: the In situ Fabricator, 1(1-4): 3–14.
- Grove Teates: Laser Grading. Zugriff: <https://sturf.lib.msu.edu/article/1999apr30.pdf>.
- Gruber, T., 1993: A translation approach to portable ontology specifications, 5(2): 199–220.
- Gyrard, A.; Zimmermann, A.; Sheth, A., 2018: Building IoT based applications for Smart Cities: How can ontology catalogs help?, 5(5): 3978–3990.
- Janakiram Karlapudi, Prathap Valluru, Karsten Menzel: Ontology approach for Building Lifecycle data management, 01.10.2021.
- Jud, D.; Leemann, P.; Kerscher, S.; Hutter, M., 2019: Autonomous Free-Form Trenching Using a Walking Excavator, 4(4): 3208–3215.
- K. K. Ahn, D. N. C. Nam, M. Jin: Adaptive Backstepping Control of an Electrohydraulic Actuator.
- Kirner, L.; Lublasser, E.; Brell-Cokcan, S., 2021: Internet of Construction: Research Methods for Practical Relevance in Construction, 5(2): 146–152.
- 2019: Klimaschutz in der Beton- und Zementindustrie. Zugriff: [https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/WWF\\_Klimaschutz\\_in\\_der\\_Beton-\\_und\\_Zementindustrie\\_WEB.pdf](https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/WWF_Klimaschutz_in_der_Beton-_und_Zementindustrie_WEB.pdf).
- Lampinen, S.; Niu, L.; Hulttinen, L.; Niemi, J.; Mattila, J., 2021: Autonomous robotic rock breaking using a real-time 3D visual perception system, 38(7): 980–1006.
- Lee, H.; Brell-Cokcan, S., 2021: Cartesian coordinate control for teleoperated construction machines, 5(1): 1–11.
- Lee, H.; Brell-Cokcan, S., 2023: Towards Controlled Semi-Autonomous Deconstruction.
- Lee, H.; Brell-Cokcan, S.: Reinforcement Learning-based Virtual Fixtures for Teleoperation of Hydraulic Construction Machine.
- Lee, H.; Heuer, C.; Brell-Cokcan, S., 2022: Concept of a Robot Assisted On-Site Deconstruction Approach for Reusing Concrete Walls. In: Linner, Thomas; García de Soto, Borja; Hu, Rongbo; Brilakis, Ioannis; Bock, Thomas; Pan, Wen; Carbonari, Alessandro; Castro, Daniel; Mesa, Harrison; Feng, Chen; Fischer, Martin; Brosque, Cynthia; Gonzalez, Vicente; Hall, Daniel; Ng, Ming Shan; Kamat, Vineet; Liang, Ci-Jyun; Lafhaj, Zoubeir; Pan, Wei; Pan, Mi; Zhu, Zhenhua: Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction (IAARC).
- Lee, H.; Krishnan, A.; Brell-Cokcan, S.; Knußmann, J.; Brochhaus, M.; Schmitt, R.; Emontsbötz, J.; Sieger, J., 2022: Importance of a 5G Network for Construction Sites: Limitation of WLAN in 3D Sensing Applications. In: Linner, Thomas; García de Soto, Borja; Hu, Rongbo; Brilakis, Ioannis; Bock, Thomas; Pan, Wen; Carbonari, Alessandro; Castro, Daniel; Mesa, Harrison; Feng, Chen; Fischer, Martin; Brosque, Cynthia; Gonzalez, Vicente; Hall, Daniel; Ng, Ming Shan; Kamat, Vineet; Liang, Ci-Jyun; Lafhaj, Zoubeir; Pan, Wei; Pan, Mi; Zhu, Zhenhua: Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction (IAARC).
- Lee, S.; Isaac, S.; Bock, T., 2015: An Ontology for Process Information Modeling.
- Lublasser, E.; Hildebrand, L.; Vollpracht, A.; Brell-Cokcan, S., 2017: Robot assisted deconstruction of multi-layered façade constructions on the example of external thermal insulation composite systems, 1(1-4): 39–47.
- M. Jin, J. Lee, P. H. Chang, C. Choi, 2009: Practical Nonsingular Terminal Sliding-Mode Control of Robot Manipulators for High-Accuracy Tracking Control.

Mads Holten Rasmussen; Maxime Lefrançois; Mathias Bonduel; Christian Anker Hviid; Jan Karlshøj, 2018: OPM: An ontology for describing properties that evolve over time.

Makhal, A.; Goins, A.: Reuleaux: Robot Base Placement by Reachability Analysis.

Malaguti, F., 1997: Development of On-Board Weighting and Force Sensor system for Construction Machines: Static Analysis.

Martin Schmied; Wolfram Knörr, 2012: Calculating GHG emissions for freight.

Merckaert, K.; Beir, A. de; Adriaens, N.; El Makrini, I.; van Ham, R.; Vanderborght, B., 2018: Independent load carrying and measurement manipulator robot arm for improved payload to mass ratio, 53: 135–140.

MIC 4.0. Zugriff: <https://mic40.org>[ abgerufen am 2023/01/11].

Natasha Noy, 2001: Ontology Development 101: A Guide to Creating Your First Ontology.

Oliver S. Kaiser: Rückbau im Hochbau. Zugriff: [https://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user\\_upload/1\\_Themen/h\\_Publikationen/Kurzanalysen/VDI-ZRE\\_KA26\\_Rueckbau\\_im\\_Hochbau\\_Web\\_bf.pdf](https://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/1_Themen/h_Publikationen/Kurzanalysen/VDI-ZRE_KA26_Rueckbau_im_Hochbau_Web_bf.pdf).

OpenCage GmbH: Convert coordinates to and from places. Zugriff: <https://opencagedata.com>.

Patil, L.; Dutta, D.; Sriram, R., 2005: Ontology-Based Exchange of Product Data Semantics, 2(3): 213–225.

Plattenpalast in Berlin. Zugriff:

<https://www.baunetzwissen.de/beton/objekte/sonderbauten/plattenpalast-in-berlin-841145>[ abgerufen am 2023/08/14].

Projekt Plattenvereinigung. Zugriff: <https://www.tu.berlin/bauphysik/forschung/abgeschlossene-projekte/projekt-plattenvereinigung>[ abgerufen am 2023/08/14].

RE:CRETE. Zugriff: <https://www.epfl.ch/schools/enac/recrete/>.

2012: Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile. 6., überarbeitete Ausg. Frankfurt (Main).

Rosenberg, L., 1993: Virtual fixtures: Perceptual tools for telerobotic manipulation: 76–82.

Sabou, M.; Biffi, S.; Einfalt, A.; Krammer, L.; Kastner, W.; Ekaputra, F., 2020: Semantics for Cyber-Physical Systems: A cross-domain perspective, 11: 115–124.

Schema.org - Schema.org. Zugriff: <https://schema.org/>[ abgerufen am 28/09/2022].

Sucan, I.; Moll, M.; Kavraki, L., 2012: The Open Motion Planning Library, 19(4): 72–82.

2015: The European Demolition Industry Report. Zugriff:

<https://www.europeandemolition.org/library/european-demolition-report-2015>.

Volvo. Zugriff: <https://www.volvoce.com/global/en/news-and-events/press-releases/2023/volvo-ce-introduces-collision-mitigation-system-for-jobsite-safety/>.

Wagner, Anna; Rüppel, Uwe, 2019: BPO: The Building Product Ontology for Assembled Products. Wagner, Anna; Rüppel, Uwe.

WBS 70 zum Kleinsthau recycelt. Zugriff:

<https://www.beton.org/betonbau/architektur/objektdatenbank/objekt-details/plattenpalast-in-berlin/>.

Wittel, H.; Spura, C.; Jannasch, D., 2021: Roloff/Matek Maschinenelemente (. 25. Auflage. Wiesbaden.

Wong, A.; Ray, P.; Parameswaran, N.; Strassner, J., 2005: Ontology mapping for the interoperability problem in network management, 23(10): 2058–2068.

Zheng, Y.; Tetik, M.; Törmä, S.; Peltokorpi, A.; Seppänen, O., 2020: A Shared Ontology for Logistics Information Management in the Construction Industry. In: "Osumi, Hisashi": Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction (IAARC).

Zheng, Y.; Törmä, S.; Seppänen, O., 2021: A shared ontology suite for digital construction workflow, 132: 103930.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Prozessübersicht zur Gewinnung von Gebäudeteilen aus dem Gebäudebestand	11
Abbildung 2	zeigt eine Darstellung der Umgebung des aktuellen Abbruch- und Rückbauprozesses. Es ist ersichtlich, dass bis jetzt die Arbeiten manuell bzw. durch manuell gesteuerte Maschinen durchgeführt werden, sodass die Operatoren währenddessen großer gesundheitlicher und gefährlicher Belastung ausgesetzt sind. Der manuell gesteuerte Abbruchprozess einer BROKK Maschine wird hier als Referenzprozess definiert	15
Abbildung 3	Anwendung ROBETON Prozess für Ausschneiden von Betonteilen zur Wiederverwendung	22
Abbildung 4	Anwendung ROBETON Prozess für Ausschneiden von Betonteilen für Strukturveränderung	23
Abbildung 5	(P)RECAST – Wiederverwendung von vorgefertigten Betonelementen	24
Abbildung 6	Plattenpalast	25
Abbildung 7	Re:Crete – Wiederverwendung von Betonelementen in neuen Strukturen: Ein Prototyp für eine Fußgängerbrücke	26
Abbildung 8	Hilti Säge (DST-20-CA-01) beim Schneiden einer Betonplatte	28
Abbildung 9	Statisches Modell des Konzepts, jeder der Pfeile 8,5KN	29
Abbildung 10	BROKK 170 mit Betonsäge, wobei die Betonsäge mit dem erforderlichen kombinierten Druck von 17 kN gegen die Wand gedrückt wird. Nur die Armgelenke (1,2,3,4) werden in der Kraft-Erreichbarkeits-Karte berücksichtigt. Der BROKK 170 kann nur Positionen in der XZ-Ebene erreichen	32
Abbildung 11	Für die Ermittlung der statischen Prozesskräfte wurden, wie zuvor beschrieben, Kräfte $F_H = 17 \text{ kN}$ und $F_V = 0,2 \text{ kN}$ angenommen. Diese leiten sich aus der erforderlichen statischen Anpresskraft von 17 kN ab	33
Abbildung 12	$F_H$ horizontale Sollkraft, $F_V$ vertikale Sollkraft, $B_H$ horizontale Lagerkraft, $B_V$ vertikale Lagerkraft, $z_{f1}$ vertikaler Abstand zum Kraftangriffspunkt, $z_{f2}$ horizontaler Abstand zum Kraftangriffspunkt, $z_1$ horizontaler Abstand zum Zylinderangriffspunkt, $z_2$ vertikaler Abstand zum Zylinderangriffspunkt, $\alpha$ Winkel zwischen $F_{Zylinder1}$ und der Horizontalen	34
Abbildung 13	Simulationsergebnisse mit unterschiedlichen Kraftkonfigurationen	35
Abbildung 14	Test mit dem BROKK 170 durchgeführt, getestet mit fünf zufällig ausgewählten Zielpositionen aus der Erreichbarkeitskarte	35
Abbildung 15	Test mit dem BROKK 170 durchgeführt, getestet mit fünf zufällig ausgewählten Zielpositionen aus der Erreichbarkeitskarte .	36
Abbildung 16	Erster Endeffektor1) Drehgelenk mit Bolzen gesichert 2) Motoren zur Feinanpassung der Linearführung der Hilti-Säge 3) Linearführung mit Gleitlagern 4) Stahlprofilarme zum Führen der Linearführung der Hilti-Säge 5) Gekürzte Konsolen zur Befestigung der Linearführung der Hilti-Säge und der Stahlprofilarme 6) Bewegungsmöglichkeiten der Linearführung (linear und rotatorisch) 7) Auflagerpunkte der Säge	39
Abbildung 17	Versuche mit dem ersten Endeffektor auf der Referenzbaustelle	39
Abbildung 18	Drehgelenk des Endeffektors 1) Drehgelenk mit Bolzen gesichert 2) Anpressfeder zur Dämpfung der Bewegung	42

---

Abbildung 19	Linearsystem zum Bewegen der Sägeschiene 1) Stepper Motor zu Steuerung der Schienenkonstruktion 2) Anpressfeder zur Dämpfung der Bewegung	42
Abbildung 20	Linearsystem zum Bewegen der Sägeschiene (Explosionsgrafik)	43
Abbildung 21	Verbaute Steuerung, Sensorik und Aktuatorik	44
Abbildung 22	Handy-Applikation zur Steuerung der Säge	46
Abbildung 23	Laserempfänger	47
Abbildung 24	Konventionelle Fernsteuerung, wobei der Bediener sich in der Nähe der Maschine befindet <sup>32</sup>	48
Abbildung 25	BROKK 170 (links) und die geometrische Darstellung der Gelenke (rechts) <sup>32</sup>	50
Abbildung 26	Schematische Systemübersicht der Kernkomponente des BROKK 170. Die Komponenten, die der ursprünglichen Maschine hinzugefügt wurden, sind blau dargestellt, während die bereits der Maschine gehörenden Komponenten in grau dargestellt sind <sup>32</sup>	51
Abbildung 27	Erfasste visuelle Information in 3D (links) und 2D (rechts) <sup>32</sup>	52
Abbildung 28	Systemarchitektur. Basierend auf den erfassten visuellen Informationen des Arbeitsbereichs definiert der Bediener die gewünschte Position für den Hammer, die vom Trajektorien-Controller in entsprechende Steuersignale umgewandelt wird. Die geplante Bewegung wird dem Bediener visualisiert und wird nur ausgeführt, wenn der Bediener sie bestätigt <sup>32</sup>	53
Abbildung 29	Interaktiver Marker; b) Gemäß der gewünschten Pose des Hammers generiert der Bewegungsplaner die entsprechenden Gelenkbewegungen; c) Erst nach Bestätigung durch den Bediener wird die geplante Bewegung an die reale Maschine weitergeleitet <sup>32</sup>	53
Abbildung 30	Ergebnis von Pulse-Tests und die entsprechenden PWM-Werte <sup>32</sup>	57
Abbildung 31	Die vom Bediener definierte gewünschte Pose in der TCP-Ebene und die Snapshots von BROKK 170 <sup>32</sup>	58
Abbildung 32	Trajektorienverfolgung Ergebnis für die gewünschte Pose 1 und 2 <sup>32</sup>	59
Abbildung 33	Der Bediener arbeitet in einem Steuerungscontainer, der die Fernarbeitsumgebung überwacht und dabei 2D- und 3D-Visuelle Information nutzt (links). Der Zustand der Maschine wird dem Bediener ebenfalls zusammen mit dem interaktiven Hammermodell zur Verfügung gestellt, um die gewünschte Hammerposition zu definieren; Experimenteller Aufbau (rechts) <sup>32</sup>	59
Abbildung 34	Druckprofil aus einem Hämmerversuch. Zuerst werden die Gelenke auf getrennte Weise aktiviert, um die Entfernung (q <sub>2</sub> ) anzupassen (rot) und die gewünschte Hammerpose (q <sub>1,3,4,5</sub> ) zu verfolgen (violett). Der Manipulator bewegt sich nach unten, um den Meißel (grün) zu drücken. Danach folgt das Hämmern (grau) <sup>32</sup>	60
Abbildung 35	Error in der TCP-Ebene während des Rückbaus <sup>32</sup>	61
Abbildung 36	Snapshots von der konventionellen Fernsteuerung (oben) und der vorgestellten semi-autonomen Methode (unten) <sup>32</sup>	62
Abbildung 37	Ergebnis vom Hämmern <sup>32</sup>	63
Abbildung 38	Abstrahierte ROBETON-Ontologie mit seinen Komponenten	64
Abbildung 39	Ontologie Prozesskette	69
Abbildung 40	Vergleich der Bautsysteme	70

---

Abbildung 41	Abbildung einer Wand mit weiter nutzbaren und nicht einsetzbaren Rechtecken, welche durch den Robeton-Prozess herausgetrennt werden können	71
Abbildung 42	Finales Demonstratorkonzept	73
Abbildung 43	Zusammengesetzter Demonstrator auf der Referenzbaustelle	73
Abbildung 44	Ausgleichsvorrichtung des Endeffektors	75
Abbildung 45	Erste Schneideversuche mit dem zweiten Endeffektor	76
Abbildung 46	Laserempfänger zur automatischen Erfassung der Schnittkante	77
Abbildung 47	Positionierungsanwendung auf dem Smartphone, Start der Laserausrichtung	78
Abbildung 48	Arbeitsumgebung (oben) und der erkannte Betonblock (unten)	79
Abbildung 49	Mappingergebnis visualisiert dem Bediener im App-Fenster	80
Abbildung 50	Erkannte Ebenen von der gemappten Punktwolke	81
Abbildung 51	Selektierte Ebene von der gemappten Punktwolke	82
Abbildung 52	Schneideversuche auf der Referenzbaustelle in liegender Konfiguration	83
Abbildung 53	Vertikaler Schnitt in die Betonwand	84
Abbildung 54	Test zur aktiven Positionsnachführung (1 Kontaktdorn der Säge, 2 Positionsmarke)	84
Abbildung 55	Horizontaler Schnitt in die Betonwand	85
Abbildung 56	Herausnahme des ausgetrennten Bauteils mittels eines Krans und zwei gesetzter Betonanker	86
Abbildung 57	Wandfläche zur Gewinnung von Bauteilen an der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf	88
Abbildung 58	Horizontaler Schnitt in eine Betonwand	90
Abbildung 59	Übersicht auf den Versuchsaufbau auf der Referenzbaustelle in Aachen	92

---

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Zusammenfassung der konventionell verfügbaren Abbruchmaschinen <sup>11</sup>	13
Tabelle 2 Testergebnisse Drucktests BROKK 170	29
Tabelle 3 Anforderungsliste	30
Tabelle 4 FKM Richtlinie <sup>52</sup>	38
Tabelle 5 Competency Questions	67
Tabelle 6 Überblick über die verbundenen Ontologien	68

## Anlagen

- Lastenheft
- Kraftbestimmungsrechnung der Sägenvorrichtung

## Glossar

1. **BPO (Building Product Ontology):** Ein Datenmodell, das speziell für die Klassifizierung und Beschreibung von Bauprodukten und -materialien entwickelt wurde.
2. **CAN (Controller Area Network):** Ein robustes Fahrzeugbussystem, das die Kommunikation zwischen verschiedenen Mikrocontrollern und Geräten ermöglicht, ohne dass ein zentraler Computer erforderlich ist.
3. **DiCON (Digital Construction Ontology):** Eine spezifische Ontologie für den digitalen Bau, die zur Strukturierung und zum Verständnis von Daten und Prozessen im Baugewerbe beiträgt.
4. **JSON (JavaScript Object Notation):** Ein kompaktes Datenformat in leicht lesbarem Text, das zum Speichern und Übertragen von Daten verwendet wird.
5. **KPI (Key Performance Indicator):** Wichtige Leistungsindikatoren, die zur Bewertung des Erfolgs oder des Fortschritts in Bezug auf wichtige Geschäftsziele oder -aktivitäten verwendet werden.
6. **MCU (Microcontroller Unit):** Ein kompakter integrierter Schaltkreis, der zur Steuerung der Funktionen in eingebetteten Systemen verwendet wird.
7. **PID (Proportional-Integral-Derivative):** Ein Regelalgorithmus in der Regelungstechnik, der in zahlreichen Anwendungen zur Steuerung von Systemen und Prozessen eingesetzt wird.
8. **PLC (Programmable Logic Controller):** Ein digitaler Computer, der für die Automatisierung von elektromechanischen Prozessen, wie sie in der Fertigungsindustrie vorkommen, verwendet wird.
9. **PWM (Pulse-Width Modulation):** Ein Verfahren zur Steuerung der Energiezufuhr zu elektrischen Geräten, insbesondere zur Steuerung der Motorgeschwindigkeit.
10. **RDF (Resource Description Framework):** Ein Standard für den Austausch von Informationen im Web, der häufig für die Darstellung von Metadaten verwendet wird.
11. **RFDRS (Robotic Facade Disassembly and Refurbishment System):** Ein System, das einen robotergestützten Rückbauansatz mit Bewegungsprogrammierung verwendet, um das Zerlegen mehrschichtiger Fassadenstrukturen zu automatisieren.
12. **ROS (Robot Operating System):** Ein flexibles Framework zur Entwicklung von Robotersoftware, das eine Sammlung von Tools und Bibliotheken bereitstellt.
13. **RRT (Rapidly Exploring Random Tree):** Ein Algorithmus für die schnelle und effiziente Planung von Pfaden, insbesondere in komplexen Umgebungen.
14. **RViz:** Ein 3D-Visualisierungstool für die Darstellung sensorischer Daten und des Zustands von Robotersystemen, oft im Kontext von ROS verwendet.
15. **SPARQL (SPARQL Protocol and RDF Query Language):** Eine Abfragesprache und ein Protokoll für RDF, das zum Abrufen und Manipulieren von Daten verwendet wird, die im RDF-Format gespeichert sind.
16. **STM32:** Eine Familie von 32-Bit-Mikrocontroller integrierten Schaltkreisen von STMicroelectronics.
17. **TCP (Tool-Center-Point):** Ein Begriff aus der Robotik und Fertigungstechnik, der den zentralen Punkt eines Werkzeuges oder Endeffektors bezeichnet.