

Piezo-Klett – Entwicklung piezoelektrischer Klettanwendung zur Energieversorgung aktiver Sensorik im Bauwesen

M. Raudaschl, T. Levak,
V. M. M. Soledad, R. Riewe,
E. Drnda, S. Popek, D. Schlegl,
B. Freytag, D. Funke-Kaiser,
W. Rieger, G. Theuermann,
C. Zuber, A. Weber, M. Moser,
S. Klima, P. Treitler, A. Lund

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

23/2023

Liste sowie Downloadmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe
unter <http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien
Leiter: DI (FH) Volker Schaffler, MA, AKKM

Auszugsweiser Abdruck ist nur mit Quellenangabe gestattet. Es wird darauf verwiesen, dass alle Angaben in dieser Publikation trotz sorgfältiger Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung der Republik Österreich und der Autorin/des Autors ausgeschlossen ist. Nutzungsbestimmungen:
<https://nachhaltigwirtschaften.at/de/impressum/>

Piezo-Klett – Entwicklung piezoelektrischer Klettanwendung zur Energieversorgung aktiver Sensorik im Bauwesen

Dipl.-Ing. Dr.techn. Matthias Raudaschl, Dipl.-Ing. Toni Levak,
Dr.techn. Arquitecta Vidal Martinez Maria Soledad,
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Architekt Roger Riewe,
Ema Drnda Bsc, Semjon Popek Bsc, David Schlegl Bsc
Institut für Architekturtechnologie, Technische Universität Graz

Priv.-Doz. Dipl.-Ing. Dr.techn. Bernhard Freytag,
Dipl.-Ing. David Funke-Kaiser
Labor für Konstruktiven Ingenieurbau, Technische Universität Graz

Dipl.-Ing. Walter Rieger, Ing. Gernot Theuermann,
Dipl.-Ing. Christian Zuber
NET-Automation GmbH

Mag. Ing. Angelika Weber, BSc, Dipl.-Ing. Markus Moser, M.Sc.,
Simon Klima, Dipl.-Ing. Peter Treitler
Axtesys GmbH

Anja Lund Ph. D.
RISE Research Institutes of Sweden

Graz, August 2022

Ein Projektbericht im Rahmen des Programms



des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)

Vorbemerkung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm „Stadt der Zukunft“ des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK). Dieses Programm baut auf dem langjährigen Programm „Haus der Zukunft“ auf und hat die Intention, Konzepte, Technologien und Lösungen für zukünftige Städte und Stadtquartiere zu entwickeln und bei der Umsetzung zu unterstützen. Damit soll eine Entwicklung in Richtung energieeffiziente und klimaverträgliche Stadt unterstützt werden, die auch dazu beiträgt, die Lebensqualität und die wirtschaftliche Standortattraktivität zu erhöhen. Eine integrierte Planung wie auch die Berücksichtigung aller betroffener Bereiche wie Energieerzeugung und -verteilung, gebaute Infrastruktur, Mobilität und Kommunikation sind dabei Voraussetzung.

Um die Wirkung des Programms zu erhöhen, sind die Sichtbarkeit und leichte Verfügbarkeit der innovativen Ergebnisse ein wichtiges Anliegen. Daher werden nach dem Open Access Prinzip möglichst alle Projektergebnisse des Programms in der Schriftenreihe des BMK publiziert und elektronisch über die Plattform www.NachhaltigWirtschaften.at zugänglich gemacht. In diesem Sinne wünschen wir allen Interessierten und Anwender:innen eine interessante Lektüre.

DI (FH) Volker Schaffler, MA, AKKM
Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung	8
2	Abstract	10
3	Ausgangslage	12
3.1.	Ausgangssituation	12
3.2.	Stand der Technik	14
3.2.1.	Baupraxis	14
3.2.2.	Fügetechnik im Bauwesen	15
3.2.3.	Sensorik im Bauwesen	21
3.2.4.	Energy-Harvesting durch den piezoelektrischen Effekt	23
3.2.5.	Digitalisierung im Bauwesen	26
4	Projekthinhalt	30
4.1.	Literaturrecherche	31
4.2.	Konzeptentwicklung.....	31
4.2.1.	Bautechnik	31
4.2.2.	Elektrotechnik.....	32
4.2.3.	Digitalisierung	34
4.3.	Potentialabschätzung.....	34
4.4.	Laborversuche.....	35
4.4.1.	Piezo-Textil-Band	36
4.4.2.	DuraAct Flächenwandler von PI Ceramic GmbH	37
4.4.3.	Piezoelektrische Scheibe von PI Ceramic GmbH (PRYY+0187).....	37
4.5.	Evaluierung der Versuchsergebnisse	38
5	Ergebnisse	40
5.1.	Bautechnik (ImpCon, ConHoo, HooPie).....	40
5.1.1.	Textil-Fassade mit piezoelektrischen Bändern	45
5.1.2.	Piezoelektrisches Geschossdecken-Auflager	52
5.1.3.	Piezoelektrisches Türsystem.....	58
5.2.	Sensorik (PieNet, NetTra).....	60
5.2.1.	Harvest Elektronik	60
5.2.2.	Sensor-System	66
5.3.	Digitalisierung (NetTra, DatPre).....	67
5.3.1.	Energieverbrauch.....	67
5.3.2.	Datenmanagement und Predictive Modeling	69
6	Schlussfolgerungen	75
6.1.	Bautechnische Konstruktion	75
6.2.	Energieversorgung aktiver Sensortechnologien	75

6.3. Datenerfassung und Datenmanagement.....	76
6.4. Piezotechnologie.....	76
6.5. Klettverbindung	77
7 Ausblick und Empfehlungen	78
8 Verzeichnisse.....	79

1 Kurzfassung

In Anbetracht des hohen Beitrages des Bauwesens zum Klimawandel und ebenso Umweltverschmutzung (in Form von z.B. Energieverbrauch, CO₂-Ausstoß, Ressourcenverbrauch, Müllaufkommen) gilt es, die Resilienz von Gebäuden und Städten durch Anpassungsfähigkeit der Bauteile und Bauteilkomponenten an unterschiedliche Nutzungsszenarien, -dauer und die Lebensdauer von Baukomponenten zu erhöhen.¹

Resiliente Gebäude erfordern auf konstruktiver Ebene demnach eine rückbaufähige Ausbildung der Schnittstellen zwischen kurzlebigen und langlebigen wie auch material heterogenen Bauteilen. In der Praxis wird der zerstörungsfreie Rückbau jedoch selten bis nie angewandt, da dies die Konstruktion nicht zulässt oder einen hohen Aufwand bedeutet, sowie Bauabbruchphasen eng getaktet und Personenstunden einen erheblichen Kostenfaktor darstellen.

Resilienz im Bauwesen kann zudem nur mit entsprechender Kenntnis über die verbaute Struktur etabliert werden. Durch Digitalisierungsprozesse im Bauwesen, mittels Systeme und Technologien welche detaillierte Kenntnis über den Status Quo und die „Geschichte“ der einzelnen Baukomponenten geben, kann „Predictive Modelling“ bzw. „Predictive Maintenance“ gezielter Komponentenaustausch, wie auch Recycling und Wiederverwendung eröffnen. Hierzu eignen sich besonders aktive Sensorsysteme wie die Sensorschnittstelle *NETBEE* des Unternehmens *NET-Automation GmbH*. Dieses Produkt kann mit unterschiedlichen Sensoren kombiniert werden, ermöglicht Messungen und Übertragungen auch außerhalb des Auslesezyklus, erfordert keinen zusätzlichen Einsatz von Auslesegeräten, kann selbständig auf Grenzwert- oder Schwellwertüberschreitungen (z.B. Temperatur, CO₂) reagieren und bietet einen lokalen Speicher. Die Montage aktiver Sensoren ist aufgrund der erforderlichen Verkabelung aufwendig und insbesondere bei dem Einbau von Sensoren im Bestand kompliziert, zudem ist bei kabelloser Verlegung die Lebensdauer der Stromversorgung mittels Batterien sehr begrenzt. Im Kontext dieser konstruktiven und energietechnischen Problemstellung, wie hinsichtlich der Lösung der informationstechnischen Anforderungen an resiliente Gebäude, behandelt die industrielle Forschung „Piezo-Klett“ die Anwendung piezoelektrischer Komponenten, wie auch die Anwendung der Klettverbindung, hinsichtlich des Ansatzes, die Sensorschnittstelle *NETBEE* autark mit Energie zu versorgen. Auftretende Spannungs- und Lastwechsel direkt an Bauteilschnittstellen, hervorgerufen durch Umweltbedingungen (z.B. Wind) werden genutzt, um infolge des piezoelektrischen Effektes ein s.g. Energy Harvesting zu betreiben. Neben piezoelektrischen Produkten am Markt (wie dem *DuraAct Flächenwandler*², der *Piezo Disk*³, *Piezo Aktuatoren*⁴ und *Piezo Ringen*⁵) besteht ein besonders innovativer Ansatz zur Nutzung dieses Effekts im „Piezo-Textil“, entwickelt von den Forscher*innen Anja Lund, Karin Rundqvist, Erik Nilsson, Liyang Yu, Bengt Hagström und Christian Müller an der Chalmers University.⁶ Dieses wird dementsprechend im vorliegenden Projekt untersucht.

¹ Vgl. International Energy Agency/United Nations Environment Program 2018, 11.

² Vgl. PI Ceramic GmbH.

³ Vgl. Ebda.

⁴ Vgl. Piezosystem Jena GmbH 2013.

⁵ Vgl. Piezosystem Jena GmbH 2010.

⁶ Vgl. Lund u.a. 2018.

Das dahingehende Projektziel war es, piezoelektrische Komponenten, als auch die Anwendung der Klettverbindung, zur autarken Versorgung aktiver Sensorik zu untersuchen. Sowie anfallende Daten hinsichtlich deren Übertragungszyklen zu organisieren. Somit, sich einem neuartigen autarken Energiesystem für aktive Sensorik anzunähern. Das Ergebnis besteht in einer Verifikation der Projektidee durch Quantifizierung der gewinnbaren elektrischen Energie in Abhängigkeit des Applikationsfalls sowie in einem umfassenden, fachübergreifenden Erkenntnisgewinn in Hinblick auf einzelne konstruktive Konzepte und Anwendungen in Architektur und Bauwesen.

Der Untersuchungsgegenstand wird durch Einwirkungen auf (Gebäude und -Teile), die bautechnische Konstruktion, Füge-technologien, piezotechnologische Komponenten, die Sensoren-Schnittstelle *NETBEE*, wie auch durch die Daten-Übertragung und Datenverwaltung gebildet. In diesen Bereichen wurde systematisch aufbauend eine Literaturrecherche, Konzeptentwicklung und eine experimentelle Untersuchung einzelner Systemelemente (auf bautechnischer, elektrotechnischer und digitaler Ebene) durchgeführt.

In Summe konnten 62 bautechnische Konzepte auf grundlegender Ebene und 13 ausgewählte Konzepte vertiefend entwickelt werden (Konstruktion, Einwirkung, Piezotechnologie, Füge-technologie), wovon drei in diesem Bericht dargestellt werden. Wie zudem Versuchsergebnisse von zwei parallel geschalteten „Piezo-Textil-Bändern“ unter dynamischer Zuglast zeigen, wäre es theoretisch möglich mit dem *NETBEE*-Modul fünf Messungen in 24 Stunden oder eine Übertragung in 20 Tagen durchzuführen. Wie auch bei 12 parallelgeschalteten Piezo-Textil-Bändern eine Messung in 0,5 h oder eine Übertragung in 1,6 Tagen. Im Kontext der Entwicklung einer Harvest Elektronik, zur Versorgung des *NETBEE* Moduls mittels Energy-Harvesting konnte eine technische Grundlage geschaffen werden (anhand Vorschaltel-elektronik-Systeme und Firmware). Auf digitaler Ebene wurde das Energiemanagement optimiert, sowie eine Grundlage für eine Datenbank für Klima- und Bauteil-daten geschaffen. Über Visualisierungen wurden die Daten in eine übersichtliche und damit leicht zu interpretierende Form gebracht.

Wie dargestellt werden konnte, ist auf technischer Ebene ein autarker Betrieb von aktiven Sensor-Systemen mittels Energy-Harvesting denkbar. Wodurch auch durch die bautechnische Konstruktion selbst zukünftig Einwirkungen und Schwingungen auf Gebäude und Gebäudeteile gezielt als Energieerzeuger genutzt und konstruktiv zugelassen werden könnten. Dies bedeutet ein Umdenken in der Konstruktionspraxis. Wie zudem festgestellt werden konnte, erfordert eine Anwendung des angedachten neuartigen Systems, aufgrund der hohen Komplexität und bereichsübergreifender Abhängigkeiten, umfassende weitere Forschung und Entwicklung.

2 Abstract

Considering the high contribution of the building sector to climate change and also environmental pollution (in the form of e.g., energy consumption, CO₂ emissions, resource consumption, waste generation), it is important to increase the resilience of buildings and cities through the adaptability of building elements and building components to different usage scenarios, duration and the service life of building components.⁷

Resilient buildings therefore require, on a structural level, a deconstruct-able design of the interfaces between short-lived and long-lived as well as materially heterogeneous components. In practice, however, non-destructive deconstruction is seldom or never applied because the design does not permit it or it involves a great deal of effort, as well as construction demolition phases are closely timed, and person-hours represent a considerable cost factor.

Resilience in the building industry can only be established with the corresponding knowledge about the built structure. Through digitalization processes in the building industry, by means of systems and technologies that provide detailed knowledge about the status quo and the "history" of the individual building components, "predictive modelling" or "predictive maintenance" can open up targeted component replacement, as well as recycling and reuse. Active sensor systems such as the NETBEE sensor interface from NET-Automation GmbH are particularly suitable for this purpose. This product can be combined with different sensors, enables measurements and transmissions even outside the readout cycle, does not require the additional use of readout devices, can react independently to limit or threshold value exceedances (e.g., temperature, CO₂) and offers a local memory. The installation of active sensors is costly due to the required cabling and is especially complicated when sensors are installed in existing buildings. In addition, the lifetime of the power supply by means of batteries is very limited in the case of wireless installation. In the context of this constructive and energy-technical problem, as with regard to the solution of the information-technical requirements for resilient buildings, the industrial research "Piezo-Klett" deals with the application of piezoelectric components, as well as the combination with the Velcro connection, with regard to the approach to supply the sensor interface NETBEE with energy autonomously. Voltage and load changes occurring directly at component interfaces, caused by environmental conditions (e.g., wind), are used to operate so-called energy harvesting as a result of the piezoelectric effect. In addition to piezoelectric products on the market (such as the *DuraAct* surface transducer⁸, the *piezo disk*⁹, *piezo actuators*¹⁰ and *piezo rings*¹¹), a particularly innovative approach to exploiting this effect exists in the "piezo textile", developed by researchers Anja Lund, Karin Rundqvist, Erik Nilsson, Liyang Yu, Bengt Hagström and Christian Müller at Chalmers University.¹² This is accordingly investigated in the present project.

⁷ Vgl. International Energy Agency/United Nations Environment Program 2018, 11.

⁸ Vgl. PI Ceramic GmbH.

⁹ Vgl. Ebda.

¹⁰ Vgl. Piezosystem Jena GmbH 2013.

¹¹ Vgl. Piezosystem Jena GmbH 2010.

¹² Vgl. Lund u.a. 2018.

The aim of the project is to investigate piezoelectric components, as well as the combination with the Velcro connection, for the self-sufficient supply of active sensors. As well as to organise accruing data about their transmission cycles. Thus, approaching a new type of self-sufficient energy system for active sensors. The desired result is a verification of the project idea by quantifying the recoverable electrical energy depending on the application case as well as a comprehensive, interdisciplinary gain in knowledge about individual constructive concepts and applications in architecture and construction.

The object of investigation is formed by effects on (buildings and parts of) the structural engineering design, joining technologies, piezo-technological components, the NETBEE sensor interface, as well as by data transmission and data management. In these areas, a systematic literature research, concept development and an experimental investigation of individual system elements (on the constructional, electrotechnical and digital level) were carried out.

In total, 62 constructional concepts could be developed on a basic level and 13 selected concepts could be developed in depth (construction, impact, piezo technology, joining technology), three of which are presented in this report. Furthermore, as shown by test results of two parallel-connected "piezo-textile-tapes" under dynamic tensile load, it would be theoretically possible to perform five measurements in 24 hours or one transmission in 20 days with the NETBEE module. As with 12 piezo textile tapes connected in parallel, 1 measurement in 0.5 h or one transmission in 1.6 days. In the context of developing harvest electronics to supply the NETBEE module by means of energy harvesting, it was possible to create a technical basis (using pre-switching electronics systems and firmware). On a digital level, energy management was optimised, and a basis for a database for climate and building component data was created. The data was visualised in a clear and thus easy-to-interpret form.

As could be shown, at the technical level, a self-sufficient operation of active sensor systems is conceivable by means of energy harvesting. This means that in the future, effects and vibrations on buildings and parts of buildings could be used specifically as energy generators and permitted by the design of the building itself. This means a rethinking of construction practice. In addition, it was found that the application of the envisaged new system requires extensive further research and development due to the high complexity and interdependencies between different areas.

3 Ausgangslage

3.1. Ausgangssituation

Der Beitrag des Bauwesens zum Klimawandel besteht unter anderem in ca. 36 % des Endenergieverbrauchs, ca. 39 % der energiebedingten CO₂-Emissionen¹³, ca. 40 % des Ressourcenverbrauchs¹⁴ und europaweit in ca. 36% des Gesamtmüllaufkommens¹⁵. Zur Verringerung dieser Werte wird Resilienz von Gebäuden und Städten im Sinne einer Steigerung der Anpassungsfähigkeit an unterschiedliche Gebäudenutzungen, deren Nutzungsdauer, wie auch die Erhöhung der Lebensdauer von Bauteilen angestrebt.¹⁶

Auf konstruktiver Ebene erfordern resiliente Gebäude eine rückbaufähige Ausbildung der Fügestellen, wie auch der einzelnen Bauteilkomponenten an den Schnittstellen zwischen kurzlebigen und langlebigen, wie auch materiell heterogenen Bauteilen. Somit eine zerstörungsfreie Trennung im Bereich der Primärstruktur (Rohbau) zu Sekundärstruktur (Ausbau) zu tertiären Strukturen (Technik) und in weiterer Folge, ein Management dieser Verbindungen.¹⁷ Ebenso ist Instandhaltungsfreundlichkeit, Zugänglichkeit und Standardisierung der einzelnen Komponenten der Bauteile gefordert. Des Weiteren sind Aspekte der Ökonomie und Effizienz ein wesentlicher Bestandteil der Baupraxis und dadurch ein schlagender Faktor hinsichtlich der Transformation zur Nachhaltigkeit und Resilienz von Gebäuden, Infrastrukturen und urbanen Konfigurationen. Eine Möglichkeit zur Bewältigung dieser Herausforderung im Umdenken besteht darin, den Bauprozess, im Detail die Fügung, zu optimieren und den gegenwertigen Anforderungen (Resilienz) anzupassen. Den konventionellen Fügeverfahren gegenüberstehend, bietet die Klettverbindung, eine Fügeverfahren bestehend aus zwei (in der Regel textilen) komplementären Verbindungspartnern, einfach durchführbare, saubere und schnelle Montageprozesse, schadensfreie, wiederholbare und lösbare Verbindungen und ein einheitliches System, welches auf nahezu alle Bauelemente unterschiedlicher Zulieferer angewendet werden kann. Damit erfüllt die Verbindung die konstruktiven Anforderungen an resiliente Gebäude besser als gängige Fügemethoden.^{18 19 20 21} Diese Art des Fügens könnte, wie in vorhergehenden Projekten, wie der Produktentwicklung der Klettfassade „StoSystem R“ und der Sondierung „Klett-TGA“ (FFG-Projektnummer: 861664) angestrebt, ein Umdenken in der Baupraxis herbeiführen und den Abwicklungsprozess zur Erreichung der Ziele resiliente Gebäude effektiver und effizienter gestalten.

Neben konstruktiven Anforderungen kann Resilienz im Bauwesen nur mit entsprechender Kenntnis über die verbaute Struktur etabliert werden. Demnach über das aktive Gestalten der Schnittstelle einzelner Bauteil-Komponenten und der Fügestelle selbst. Hinsichtlich der Planung und Organisation

¹³ Vgl. International Energy Agency/United Nations Environment Program 2018, 11.

¹⁴ Vgl. Bringezu u.a. 2017, 64.

¹⁵ Vgl. Eurostat statistics explained.

¹⁶ Vgl. European Commission 2019.

¹⁷ Vgl. Bundesministerium für Landwirtschaft Regionen und Tourismus/Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie 2018.

¹⁸ Vgl. Henning 2021.

¹⁹ Vgl. Bahr/Lennerts 2010 ,28-40.

²⁰ Vgl. Schwede/Störl 2017, 1-9.

²¹ Vgl. Roehse 2005.

sind bereits am Markt vorhanden digitale Technologien eine Abhilfe, jedoch ermöglicht die Digitalisierung eine präzisere Analyse und Aufbereitung von Daten in Bezug auf „Predictive Modelling“ bzw. „Predictive Maintenance“ und damit Komponentenaustausch, Recycling und Wiederverwendung anhand von Bauteildaten und Klimadaten. Sofern diese strukturiert und organisiert werden. In Bezug auf Bauteildaten gibt es gegenwärtig, auf EU-Ebene sowie in Österreich, keine diesbezüglichen Standards oder eine entsprechende Datengrundlage.²² Wobei auf EU-Ebene mittels „Digital Building Logbooks“ eine solche Grundlage geschaffen werden soll.²³ Hierbei würden sich BIM-Modelle theoretisch gut eignen, Bauteildaten zu erzeugen und diese im Planungs- und Bauprozess anzuwenden. Jedoch bleibt die Frage der langfristigen Informationsspeicherung über das BIM-Modell hinaus (im Rahmen der Nutzung des Gebäudes und für einen nachhaltigen Rückbau) aber auch die Behandlung von Bestandsbauten ungelöst bzw. mangelhaft behandelt.

Um Kenntnisse über die Nutzung und Dauer, sowie über den Verschleiß von Bauteilen zu bekommen ist es erforderlich, beispielsweise Sensortechnologien zu nutzen, wodurch der s.g. Alterungsprozess eines Gebäudes beziehungsweise seiner Komponenten (infolge klimatischer Einwirkungen) festgehalten werden kann. Hierzu eignen sich besonders aktive Sensorsysteme, wie z.B. die Sensorschnittstelle *NETBEE* der Firma *NET-Automation GmbH*, welches in dieser Forschung behandelt wird, und speziell für den Außenbereich, zur Erfassung von Umweltbedingungen konstruiert wurde.²⁴ Dieses Produkt kann mit unterschiedlichen Sensoren kombiniert werden, ermöglicht Messungen und Übertragungen außerhalb des Auslesezyklus, erfordert keinen zusätzlichen Einsatz von Auslesegeräten und kann selbständig auf Grenzwert- oder Schwellwertüberschreitungen (Sturm, Hagel) reagieren. Zudem kann das Produkt als lokaler Speicher (z.B. für Klimadaten und Bauteildaten) genutzt werden. Damit wird auch ein Auslesen vor Ort für beispielsweise ein vereinfachtes Urban Mining, Baustellencontrolling, Montageanleitung, Warnhinweise, „Smart Site“, u.v.m. ermöglicht²⁵. Die Montage aktiver Sensoren ist aufgrund der erforderlichen Verkabelung jedoch aufwendig und insbesondere bei nachträglichem Montieren der Sensoren im Bestand kompliziert. Ebenso kann aufgrund eines erhöhten Materialaufwandes die Nachhaltigkeit hinterfragt werden, wie auch infolge der Begrenzung der Lebensdauer bei einer Stromversorgung mittels Batterien.²⁶

Im Hinblick auf eine Lösung dieses Problems und für eine autarke Energieversorgung werden einzelne Sensoren bereits mit piezo-elektrischen Komponenten zur Stromversorgung kombiniert.²⁷ Als Beispiele seien das „IoT Energy Harvesting“ Modul der Firma *Viezo*, welche permanenten Vibrationen zur Energiegewinnung nützt angegeben,²⁸ wie auch der *DuroAct Flächenwandler* (Einsatz als Aktor, Sensor oder Energieerzeuger) von *PI Ceramic GmbH* wie auch der „Piezo Ring“ und „Piezo Tuben“ von *Piezo Hannas*.^{29 30} Ein besonders innovativer Ansatz zur Nutzung dieses Effekts ist das von den Forscher*innen Anja Lund, Karin Rundqvist, Erik Nilsson, Liyang Yu, Bengt Hagström und Christian Mülle an der Chalmers University entwickelte "Piezo-Textil". Im Rahmen ihrer Forschung wurden PVDF-Fasern aus piezoelektrischen Kristallen hergestellt und diese Fasern in einen speziellen

²² Vgl. Trebut F, Pfefferer 2001.

²³ Vgl. Dourlens-Quaranta u.a. 2020.

²⁴ Vgl. NET-Automation GmbH 2020.

²⁵ Vgl. Piskernik G 2018, 125-142.

²⁶ Vgl. Jehle P, Seyffert S, Wagner W 2011, 49.

²⁷ Vgl. Wang Z L 2013, 143.

²⁸ Vgl. Viezo 2022.

²⁹ Vgl. PI Ceramic GmbH 2020.

³⁰ Vgl. Piezo Hannas (Wuhan) Tech Co.,.Ltd.

Trageriemen einer Tasche eingewebt. Auf diese Weise kann eine Leistung von vier μW erzeugt und eine LED (Leuchtdiode) während eines flotten Spaziergangs betrieben werden.³¹

Im Kontext dieser konstruktiven und informationstechnischen, ebenso energetischen Anforderungen an resiliente Gebäude behandelt die industrielle Forschung „Piezo-Klett“ die Anwendung von piezoelektrischen Komponenten, wie auch die Anwendung der Klettverbindung, an Bauteilschnittstellen. Übergeordnetes Ziel ist hierbei die Energieversorgung der Sensorenschnittstelle *NETBEE*, um Klimadaten zu messen und im Anschluss in eine Cloud zu übertragen, aber auch z.B. Grenzwertüberschreitungen und Bauteildaten lokal speichern zu können. Gebäudeteile werden als Energiegeneratoren im Kleinstmaßstab betrachtet. Auftretende mechanische Spannungs- und Lastwechsel (siehe oben Piezoelektrizität), hervorgerufen durch Umweltbedingungen (z.B. Wind) werden direkt an Bauteilschnittstellen für s.g. Energy Harvesting genutzt.

Das angestrebte Ergebnis bestand in der Verifikation dieser Idee durch Quantifizierung der gewinnbaren elektrischen Energie in Abhängigkeit des Applikationsfalls sowie in einem umfassenden, fachübergreifenden Erkenntnisgewinn im Hinblick auf Konzepte und Anwendungen in Architektur und Bauwesen.

3.2. Stand der Technik

3.2.1. Baupraxis

Im Kontext der Nutzung von Einwirkungen auf Gebäudeteile sei darauf hingewiesen, dass OIB-Richtlinie 1 besagt, Tragwerke „so zu planen und herzustellen, dass sie eine ausreichende Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit aufweisen, um die Einwirkungen, denen das Bauwerk ausgesetzt ist, aufzunehmen und in den Boden abzutragen.“ Hierbei sind „ständige, veränderliche, seismische und außergewöhnliche Einwirkungen zu berücksichtigen“.³²

Die aktuelle Bau- und Konstruktionsweise im Hochbau strebt somit an, Einwirkungen, welche auf das Gebäude oder Gebäudeteile wirken, schnellstmöglich in Fundamente und das umgebene Erdreich abzuleiten beziehungsweise zu neutralisieren

Selbige Vorgehensweise betrifft Schwingungen und Vibrationen von Bauteilen und Konstruktionen. Diese werden aus Gründen der Stabilität, Dauerhaftigkeit, dem Wohlbefinden der Nutzer und beispielsweise dem Schallschutz so weit wie möglich gedämpft.

Auch der Eurocode 0, welcher die allgemeine Vorgehensweise zur Bemessung von Baukonstruktionen behandelt, beschreibt die Betrachtung von möglichen Schwingungen und Vibrationen. Dabei sind vor allem Frequenzen welche höher als die Eigenfrequenzen der Bauteile sind, gesondert zu betrachten und sollten zusätzlich gedämpft werden.³³

Mit der Idee, Einwirkungen und daraus folgende Schwingungen und Vibrationen zuzulassen, hervorzurufen und zu nutzen, widerspricht das Projekt somit der gängigen Baupraxis.

³¹ Vgl. Lund u.a. 2018, 7.

³² Vgl. Österreichisches Institut für Bautechnik 2015, 2.

³³ Vgl. DIN Deutsches Institut für Normung e. V. 2011, 59.

3.2.2. Fügechnik im Bauwesen

Aus gängiger Füge-, Bau- und Planungspraxis resultieren Bauteile in Form inhomogener Materialverbünde, welche je nach Fügemethodik und Ausführung, ohne Zerstörung der Fügeteile, meist jedoch mit Schädigung oder Zerstörung, rück- oder umgebaut werden. Da auch wenn es die Konstruktion zulässt, das saubere Lösen einen erheblichen Mehraufwand und damit höhere Kosten bedeutet. Erstrebenswert ist daher ein grundsätzliches Umdenken im Konstruieren und Planen von Bauteil-Schnittstellen, um einen trennbaren Verbund zwischen kurzlebigen und langlebigen Bauteilen herzustellen sowie das Forcieren der Instandhaltungsfreundlichkeit, Zugänglichkeit und Standardisierung von Gebäudeteilen. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, ist es erforderlich die gängigen Fügemethoden zu hinterfragen. Eine mögliche Alternative zu konventionellen Füge-technologien im Bauwesen bieten Klettsysteme. Eine Klettverbindung, bestehend aus zwei (in der Regel textilen) komplementären Verbindungspartnern wie Pilzkopf- mit Schlaufenkomponenten, oder Pilzkopf- mit Pilzkopfkomponenten (siehe nachfolgende Abbildung), erfüllt diese Anforderungen besser als gängige Fügemethoden. Als Bestandteile von Klettkomponenten können hierbei der Komponentengrund, wie auch die darauf positionierten (aufgeklebten oder eingenähten) Klettelemente in Schlaufen-, Pilzkopf- oder Hakenform angegeben werden. Am Markt sind Klettkomponenten als „Bahnware“ oder als einzelne (biegesteife) Komponenten erhältlich.

Abbildung 1: Klettverbindung bestehend aus den Klettelementen Pilzkopf und Schlaufe³⁴

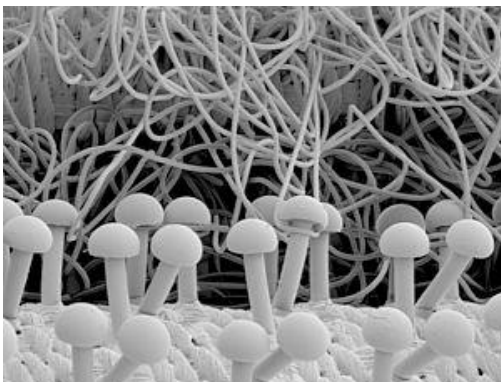


Abbildung 2: Klettverbindung Duotec®, bestehend aus den Klettelementen Pilzkopf und Pilzkopf³⁵



³⁴ Gottlieb Binder GmbH & Co KG:
https://www.binder.de/fileadmin/_processed_/csm_8products_d49efe080f.jpg

³⁵ Gottlieb Binder GmbH & Co KG:
https://www.binder.de/fileadmin/_processed_/csm_10Duotec_0ab6d9148b.jpg

Klettverbindungen im Bauwesen

Die Klettverbindung ist heutzutage aus der Automobil- und der Flugzeugbranche nicht mehr wegzudenken und kommt darüber hinaus in der Raumfahrt und der Formel 1 zum Einsatz.^{36 37} Auch im Bauwesen wird Klett vereinzelt angewandt und erforscht, ist jedoch weit davon entfernt, das Potential in der Anwendung voll auszuspielen. Nachfolgend dargestellte Produkte, Patente und Forschungsprojekte sollen einen Überblick geben.

Produkte

„Vario® XtraSafe Klimamembran“ mit „XtraPatch Klettstreifen“

Das Unternehmen *Saint-Gobain ISOVER Austria GmbH* bietet mit der Serie "Vario®" ein System zur flexiblen und perforationsfreien Verlegung von Dampfbremsen im Bereich der Dachkonstruktion (siehe Abbildung 3). Der selbstklebende Klettstreifen "Vario® XtraPatch" (2) wird auf den Untergrund aufgeklebt und die Klimamembran "Vario XtraSafe" (1) mit klettender Vliesrückseite daran befestigt. Folienstöße werden mittels Klebbandes (3) und Folienenden mit einer dauerelastischen Klebedichtmasse (4) ausgebildet.³⁸ Ähnlich aufgebaut ist das Produkt „Rhepanol hfk“ des Unternehmens *FDT FlachdachTechnologie GmbH & Co. KG*, welches einer Dachabdichtungsbahn entspricht.

Fußbodenheizungssystem „Klett Nassbausystem“

Das System von *Uponor GmbH* nutzt die Klettverbindung zur Verlegung von Heiz- oder Kühlleitungen ohne weiteres Zubehör (siehe Abbildung 4). Hierzu werden Rohre welche mit Klettband umwickelt angewandt und auf einer klettfähigen Dämmplatte fixiert. Zusätzlich kommt ein Estrich auf Zement- und Anhydritbasis zum Einsatz, welcher die dauerhafte Befestigung bildet.³⁹

Abbildung 3: ISOVER Vario®⁴⁰



Abbildung 4: Klett Nassbausystem⁴¹



³⁶ Vgl. Krüger 2013.

³⁷ Vgl. Grinfeld/Segletes 2010.

³⁸ Vgl. Saint-Gobain ISOVER Austria GmbH.

³⁹ Vgl. Uponor Vertriebs GmbH.

⁴⁰ Saint-Gobain ISOVER Austria GmbH: <https://www.isover.at/download-documents/prospekte/vario-prospekt-2-2020-web.pdf>

⁴¹ Uponor Vertriebs GmbH: <https://www.uponor.com/getoptimizedimage/188de8b7-825b-465c-8bab-f983b6db5d5f/Klett-titelbild-1180x1070?siteName=Austria&width=590&height=535>

Patente

Fastening with wide fastening membrane (Patentnummer: US20030070391A1)

Das Verfahren (siehe Abbildung 5) der Erfinder Ernesto Tachauer, Ronald Provencher, Shawn Banker und George Provost zeigt eine kontinuierliche Befestigungsmembran (700) mit Schlaufen und Hakenklett-elementen (702). Diese Membran wird hierzu auf Streifenelementen mit Schlaufenfläche (705) befestigt. Diese Elemente werden vorab am Gebäude (701) aufgebracht. Mittels Klett soll an Dächern, Wänden, Böden und Decken unterschiedliche Baukomponenten wie beispielsweise Fassadenelemente (705) befestigt werden.⁴² Dieses US-Patent denkt Klett als umfassendes Befestigungsmittel, welches auf jede Gebäudekomponente angewandt wird.

Als weitere Patente mit thematischem Bezug können das „Trennwandsystem mit Wandelementen“,⁴³ das „Klettsystem in oder an einem Gebäude“⁴⁴ und das „Verfahren zum Herstellen eines Befestigungssystems, insbesondere für Bauelemente im Bereich von Fotovoltaikanlagen“⁴⁵ angegeben werden.

Reversible Befestigungsmechanismen (Patentnummer: DE112007002135T5)

Ausgehend von der Klettverbindung und Knopf/Hohlraum-Befestigungselementen beschreibt das Patent der Erfinder*innen William Ventura Barvosa-Carter, Andrew C. Encino Keefe, Alan L. Grosse Ponte Browne und Nancy L. Northville Johnson aus dem Jahre 2009 ein steuerbares Befestigungssystem, indem eine Formveränderung eines Verbindungselementes infolge thermischer Aktivierung erfolgt (siehe Abbildung 6). Das System besteht aus einem Hohlraumabschnitt (22), einem Knopfabschnitt (12) und einer Aktivierungsvorrichtung (30). Der Hohlraumabschnitt weist Seitenwände (26), eine Grundwand (24) und eine Rückhaltewand (28) auf. Der Knopfabschnitt (12) besteht (teilweise) aus einem verstärkten Polymer mit Füllstoff und besitzt eine Vorsprungsfläche (14), einen Vorsprung (16) und einen Innenraum (20). In die Polymermatrix sind Fasern oder Plättchen (18) eingearbeitet, welche elektrisch, thermisch oder dielektrisch aktiviert werden können. Als weitere Ausführungsform wird auf den möglichen Einsatz eines piezoelektrischen Elastomers zur Formänderung oder auch zur Erzeugung elektrischer Ladung hingewiesen,⁴⁶ jedoch nicht näher ausgeführt.

Ein ähnliches Prinzip verfolgen die Patente „Releasable fastening system based on ionic polymer metal composite and method of use“,⁴⁷ wie auch das Patent „Electroactive polymer releasable fastening system and method of use“ und werden daher nicht näher beschrieben.⁴⁸

⁴² Vgl. Tachauer u.a. 2002.

⁴³ Vgl. Rhoese 2005.

⁴⁴ Vgl. Schaumburg 2012.

⁴⁵ Vgl. Gottlieb Binder GmbH Co. Kg 2012.

⁴⁶ Vgl. Barvosa-Carter u.a. 2007.

⁴⁷ Vgl. Momoda u.a. 2002.

⁴⁸ Vgl. Browne u.a. 2003.

Abbildung 5: Fastening membrane⁴⁹

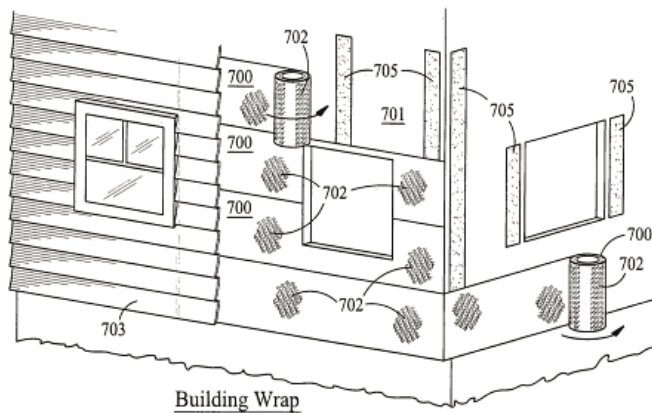
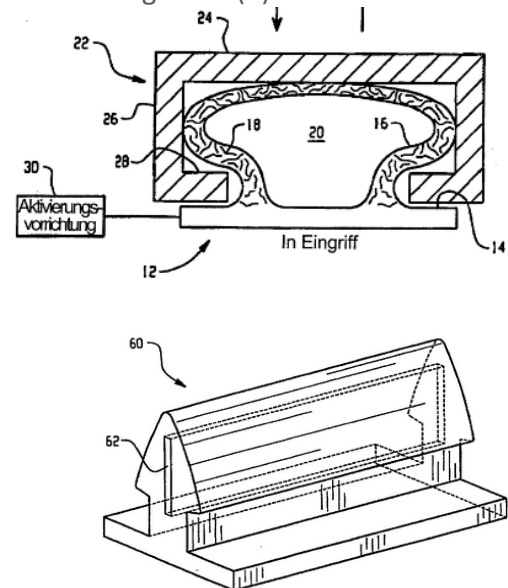


Abbildung 6: Reversible Befestigungsmechanismen; Querschnittsansicht in Eingriff (o), Vorsprung einer weiteren Ausführungsform (u)⁵⁰



Forschung

Klettfassade „StoSustain R“

Das Fassadensystem, welches sich aktuell in Entwicklung hinsichtlich Markteinführung befindet, wurde im Rahmen einer Kooperation des *Institutes für Architekturtechnologie* mit den Unternehmen *Sto Ges.m.b.H* und *Gottlieb Binder GmbH & Co KG* entwickelt. Durch Anwendung der Klettverbindung zwischen Befestigungselement (Befestigungsdübel der Dämmplatten) und Putzträgerplatte wird eine kleberfreie Montage eines Wärmedämmverbundsystems und eine spätere sortenreine Trennung ermöglicht.⁵¹

⁴⁹ Tachauer u.a. 2002.

⁵⁰ Barvosa-Carter u.a. 2007.

⁵¹ Vgl. Sto Ges.m.b.H 2017.

Abbildung 7: System StoSystemR⁵²

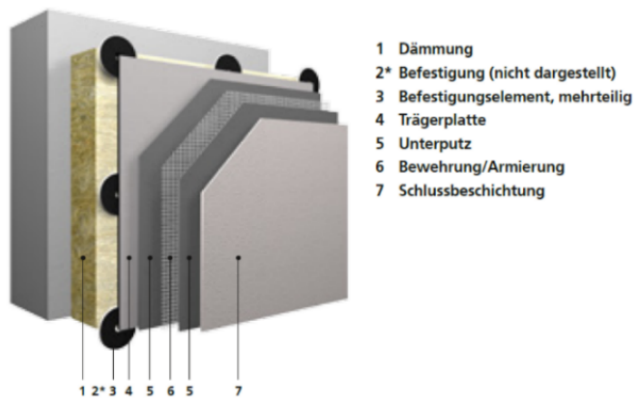
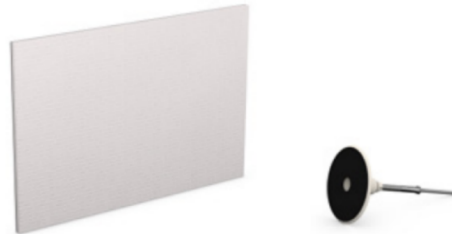


Abbildung 8: Putzträgerplatte mit Schlaufenbeschichtung, (re) Justierbares Befestigungselement mit Pilzkopfoberfläche⁵³



Sondierungsprojekt „Klett-TGA“ (FFG-Projektnummer: 861664)

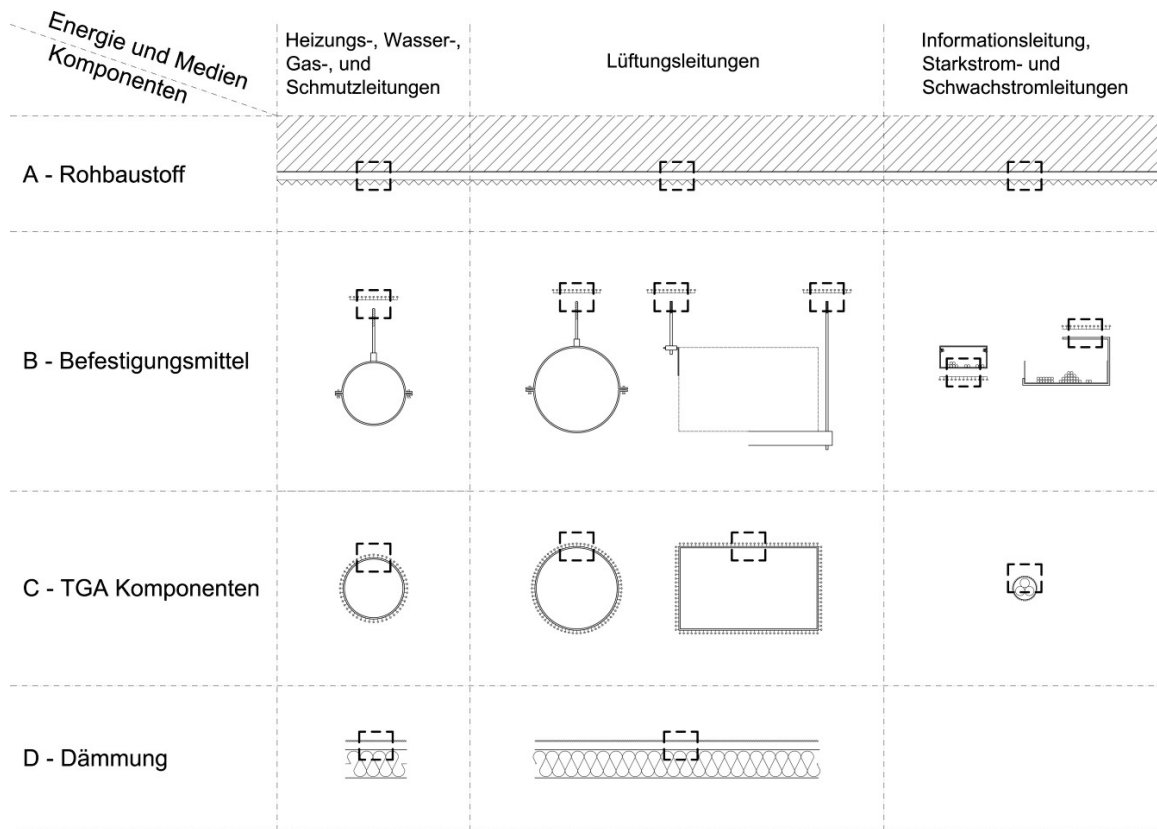
Das Ziel des Projektes „Klett-TGA“ bestand in der Sondierung der Klett-Montage technischer Gebäudeausrüstung auf verschiedenen Rohbau-Untergründen. Inhaltlich wurde das *Institut für Architekturtechnologie* durch die TGA-Fachfirmen *STEINBACHER Dämmstoff GmbH*, *HERESCHWERKE Regeltechnik GmbH*, *mhs GmbH - Montagesysteme für Heizung und Sanitär* und *TBK – Technisches Büro Köstenbauer GmbH*, wie auch den KlettHersteller *Gottlieb Binder GmbH & Co KG* und im Rahmen der Verifikation von Konzepten mittels Versuchen durch das *Labor für Konstruktiven Ingenieurbau* der *Technischen Universität Graz* unterstützt. In Summe konnten 143 Verbindungskonzepte entwickelt und ausgewählte Konzepte anhand von mechanischen Prüfverfahren (Herstell-, Haftzug- und Schälversuche) evaluiert werden.⁵⁴

⁵² Sto Ges.m.b.H

⁵³ Ebda

⁵⁴ Vgl. Riewe u.a. 2019.

Abbildung 9: Forschungsfeld „Klett-TGA“, TGA-System und Rohbaustoff mit Klettschnittstellen⁵⁵



Dissertation „Klettbeton“

Die Doktorarbeit „Klettbeton“ von Matthias Raudaschl (Mitverfasser dieses Berichtes und Teil der Projektleitung), schlägt einen Materialwechsel sowie eine daraus resultierende Herstellungsmethode von Klettcomponenten vor, um Materialreinheit und Dauerhaftigkeit von Klettcomponenten, für eine Anwendung im Bauwesen, zu erhöhen. Unter dem Aspekt der vielfältigen Formbarkeit des Rohbaustoffes Beton bestand das Forschungsziel, infolge einer Anwendung der Wachsschalungstechnologie, in der grundlegenden Untersuchung und Herstellung von Beton-Klettcomponenten anhand des Vorbildes industrieller Klettprodukte. Ein Ergebnis aus dieser Arbeit, in Form eines klettfähigen Beton-Versuchskörpers, ist nachfolgend abgebildet (siehe Abbildung 10).⁵⁶

Active Velcro System

Dieses Klettsystem besteht aus zwei komplementären Verbindungskomponenten oder Oberflächen, eine Komponente dient als „Wirt“ und besitzt aktivierbare Zinken oder Pilzkopfelemente sowie Antriebs-, Steuerungs- und Energiesysteme (siehe Abbildung 11). Die zweite Komponente dient als „Gast“ und besteht aus inaktiven Pfosten. Das System soll zur Anwendung bei Mikro- (<100 kg) und Nano-Satelliten (<10 kg) im Rahmen von Wartungsarbeiten im Weltraum dienen und ermöglicht eine

⁵⁵ Riewe u.a. 2019, 30

⁵⁶ Vgl. Raudaschl 2020.

Ausrichtung der verbundenen Teile im angedockten Zustand. Im Kontext einer möglichen kleineren Skalierung des Systems wird im Forschungsbericht auf die Anwendung piezoelektrischer Aktuatoren hingewiesen.⁵⁷

Abbildung 10: Klettbeton, Versuchskörper Hakenstruktur⁵⁸

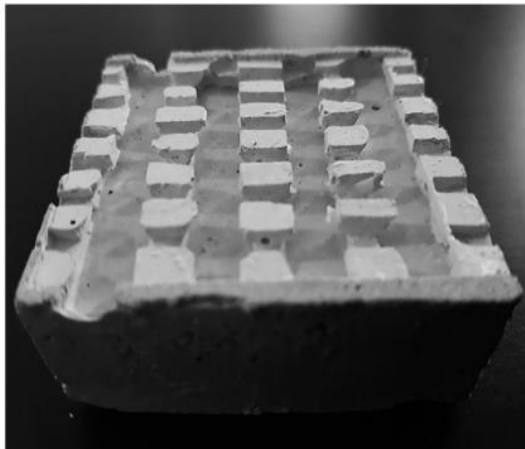
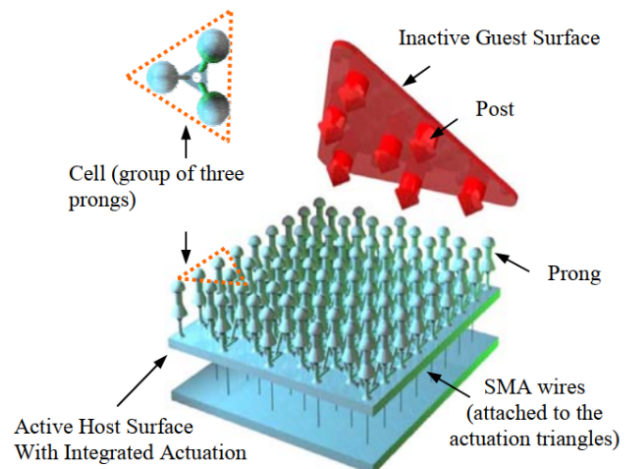


Abbildung 11: Übersicht „Active Velcro System“⁵⁹



3.2.3. Sensorik im Bauwesen

Für eine Etablierung resilienter Digitalisierung im Bauwesen kann entsprechende Sensorik eingesetzt werden. Dahingehend existieren passive und aktive Systeme. Der große Vorteil von aktiver Sensorik liegt in der Funktion der direkten Datenübertragung. Aktive Sensorik kann Messungen außerhalb des Auslesezyklus durchführen, wohingegen ein passiver Sensor immer einer Aufforderung zu messen und übermitteln von Daten bedarf. Der aktive Sensor arbeitet proaktiv und reagiert selbständig auf Grenzwert- oder Schwellwertüberschreitungen.

Während aktive Sensorik somit ohne äußere Hilfsspannung arbeitet und auf äußere Einwirkungen mit einer Umwandlung dieser in eine elektrische Größe (zum Beispiel Spannung) reagiert, arbeitet passive Sensorik über eine Änderung einer elektrischen Größe bei einer angelegten Hilfsspannung. Dies bedeutet, dass eine passive Sensorik eine angelegte Spannung benötigt, um beispielsweise eine Messung durchführen zu können, während aktive Sensorik bei einer Messung direkt ein messbares Signal und nicht nur eine messbare Differenz eines Signals ausgibt.^{60 61}

Dies stellt beispielsweise bei klimatisch relevanten Messwerten wie Sturm, Schneelast und anderen, auf die Dauerhaftigkeit von Gebäuden oder Bauteilen und deren Austausch bezogenen Werten, einen erheblichen Vorteil gegenüber passiver Sensorik dar. Zudem ist bei aktiver Sensorik bzw. von IoT Hardware kein zusätzlicher Einsatz von Auslesegeräten und somit auch keine physische Nähe zu den Sensoren notwendig. Im Bereich der Konnektivität arbeiten diese Geräte meist mit GSM-

⁵⁷ Vgl. Brei u.a. 2003.

⁵⁸ Raudaschl 2020

⁵⁹ Brei u.a. 2003, 39

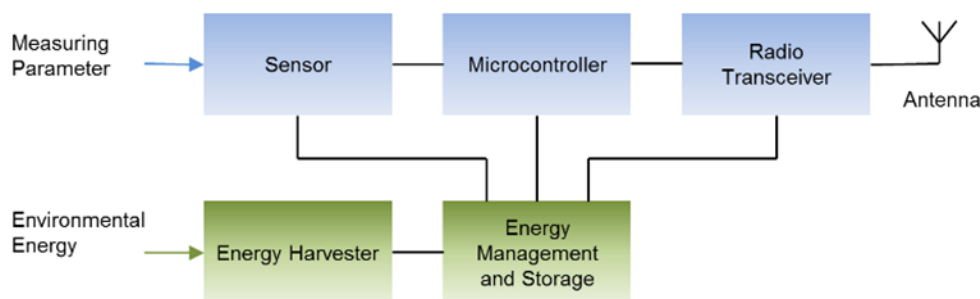
⁶⁰ Vgl. Ekbert/Schönfelder 2012, 2.

⁶¹ Vgl. Bosch Thermotechnik GmbH.

Systemen, welche einen hohen Stromverbrauch aufweisen. Sigfox⁶² ist in Europa nicht verfügbar und Lora⁶³ wie die Praxiserfahrung zeigt, eher störanfällig.

Aktive Sensorik hat gegenüber passiven Systemen jedoch den Nachteil, dass die Lebensdauer aufgrund der fix verbauten Batterie stärker begrenzt ist, oder ein hoher Grad an Verkabelung zu gewährleisten ist, was sich vor allem bei nachträglich montierten Sensoren als kompliziert darstellt. Die Kombination mit piezoelektrischen Komponenten und Energieerzeugung an Bauteilschnittstellen entspricht hierbei einem Ansatz mit hohem Innovationsgehalt. Relevante Produkte am Markt, wie das „IoT Energy Harvesting“ Modul der Firma *Viezo*, welche permanenten Vibrationen zur Energiegewinnung nützt,⁶⁴ wie auch der *DuroAct Flächenwandler* (Einsatz als Aktor, Sensor oder Energieerzeuger) von *Pi Ceramic*⁶⁵ und der „Piezo Ring“ und „Piezo Tuben“ von *Piezo Hannas*,⁶⁶ stellen Produkte dar, welche nicht über die im Projekt angestrebten Funktionen (vor allem Messen und Speichern) verfügen. Zur Veranschaulichung eines aktiven Sensorsystems mit Energy Harvesting zeigt die nachfolgende Abbildung 12 ein Prinzipschaltbild.

Abbildung 12: Prinzipschaltbild eines Sensors mit Funkelektronik und Energy Harvesting⁶⁷



Im vorliegenden Projekt wurde daher das *NETBEE* Modul der Firma *NET-Automation GmbH* näher betrachtet. Dieses bietet eine einfache Verbindung über ein WLAN Netzwerk und wird derzeit entweder per Akku betrieben oder benötigt ein 5 V Ladekabel. Die Übertragung der Daten erfolgt wahlweise über GSM, Narrowband IoT, LTEM oder direkt über Wifi in die *NETBEE Cloud*. Zudem besteht die Möglichkeit, die Daten an die sogenannte *NETBEE BEHIVE*, eine physische Sammelstation für Sensorschnittstellen, zu übertragen, ohne dass diese über das Internet an die Cloud übertragen werden. Somit kann über die Handhabung der Daten selbst entschieden werden. Die einzelnen Sensoren können an das Hauptmodul angesteckt werden und sind somit auch sehr einfach auszutauschen.⁶⁸

⁶² Vgl. Sigfox 2022.

⁶³ Vgl. Digikey.

⁶⁴ Vgl. Wang 2013, 143.

⁶⁵ Vgl. Viezo.

⁶⁶ Vgl. Piezo Hannas (Wuhan) Tech Co.,Ltd.

⁶⁷ André, 2019, 3.

⁶⁸ Vgl. NET-Automation GmbH 2018.

3.2.4. Energy-Harvesting durch den piezoelektrischen Effekt

Der piezoelektrische Effekt beruht auf einer, durch mechanische Deformation (Dehnung oder Stauchung) ausgelöste Schwerpunktverschiebung der piezoelektrischen Kristalle in einem Material, infolge dessen es zu einer Verschiebung der Ladungen kommt und dadurch eine elektrische Polarisierung, also ein elektrisches Feld, entsteht. Eine solche Polarisierung ist nur möglich, wenn der Isolator eine polare Achse besitzt, da das elektrische Feld in eine klare Richtung zeigen muss. Daher ist der Piezoeffekt stark von der Materialität abhängig. Als Piezomaterial wird hauptsächlich Quarz, Turmalin und Bariumtitanat (BaTiO_3) verwendet. Zudem gibt es auch organische Salze wie beispielsweise NaK-Tartrat. Durch die relative Deformation entsteht in piezoelektrischen Materialien ein piezoelektrisches Feld welches proportional zu der Deformation ε (z.B. Längendehnung) ist.⁶⁹

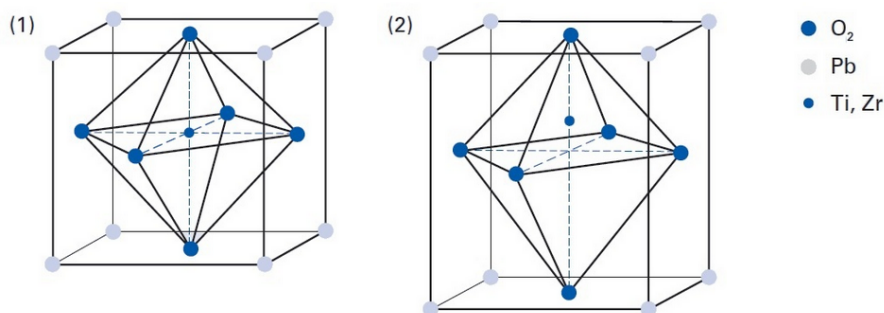
$$E = \delta * \varepsilon, \text{ mit } \varepsilon = \frac{\Delta x}{x}$$

Aufgrund der Proportionalität kann daraus die resultierende Spannung in Abhängigkeit zur Deformation beschrieben werden.⁷⁰

$$U = \delta * \Delta x$$

Dabei ist δ der piezoelektrische Koeffizient, welcher von den Kristallrichtungen der Materialien abhängig ist.⁷¹

Abbildung 13: Schwerpunktverschiebung des Kristalls infolge einer mechanischen Einwirkung beziehungsweise einer angelegten Spannung (inverser Piezoeffekt)⁷²



Ein großer Teil der industriellen Anwendung und Nutzung beruht auf dem sogenannten inversen Piezoeffekt. Dabei wird eine Spannung angelegt, um eine kontrollierte Deformation der Materialien hervorzurufen. Die Verformung ist abhängig von der Polung der Spannung. Eine Wechselspannung regt das Material zu einer mechanischen Schwingung mit ihrer Frequenz an. Stimmen Frequenz und Eigenfrequenz des Materials überein kommt es zu einer Resonanzschwingung (beispielsweise Schwingquarz).⁷³ Darunter fallen beispielsweise Stack Aktoren. Als Beispiel seien hier die Stack Aktoren von *Piezsystem Jena* der Serie N (Series N /5 P-211-00 – P-213-00, N /S3.5 P-214-40 – P-

⁶⁹ Vgl. Meschede 2015, 338-339.

⁷⁰ Vgl. Ebda, 339.

⁷¹ Vgl. Ebda, 339.

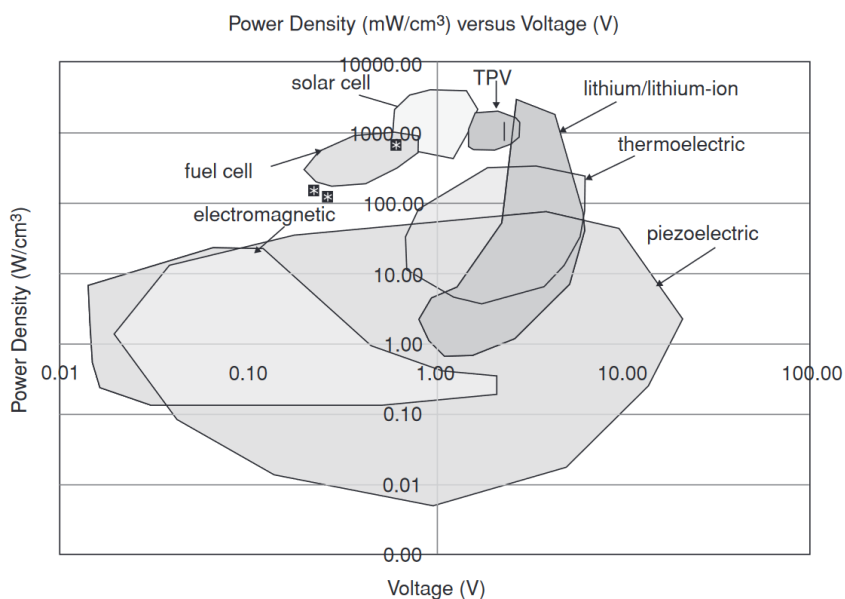
⁷² PI Ceramic GmbH: <https://www.piceramic.de/de/expertise/piezotechnologie/grundlagen/>

⁷³ Vgl. Meschede 2015, 339.

218-40, N /S5 P-203-40 – P-207-40, N /S10 P-232-40 – P-237-40)⁷⁴, P (P-101-00, P-102-00, P-110-00 – P-117-00)⁷⁵ und PA (B-201-00 – B-211-00 und B201-01 – B-211-01 sowie B-212-00 – B-214-00 und B-212-01 – B-214-01)⁷⁶ genannt, welche in Richtung ihrer Längsachse belastet werden. Einsatz finden Aktoren in den verschiedensten Bereichen der Industrie (z. B. Messtechnik, präzise Positionierung, Tonaufnehmer etc.). Des Weiteren sind Scheraktoren am Markt erhältlich, welche Deformationen normal zu ihrer Längsachse zulassen. Diese werden in verschiedenen Einsatzgebieten (Mikroskopie, Präzisionsmechanik, Schaltanwendungen) verwendet. Als Beispiel seien hier die Scheraktoren P-111 - P-153 von *PI Ceramic* genannt.⁷⁷ Zudem gibt es eine Vielzahl an Biegeelementen mit ähnlichen Einsatzgebieten wie die zuvor genannten Aktoren. Infolge einer Biegung kommt es in den Materialien zu einer Dehnung bzw. Stauchung (an der Unterseite) und zu einem Spannungsaus Schlag. (z.B. *PICMA Bender* von *PI Ceramic*⁷⁸).

Im Gegensatz dazu wird der direkte Piezoeffekt hauptsächlich zur Signalgebung und zum Energy-Harvesting angewendet. Unter Energy-Harvesting versteht man hierbei die Nutzung von auftretenden Einwirkungen zur Energieumwandlung und -speicherung. Dabei wird diese Energie genutzt, um diese über sogenannte Wandler in elektrische Energie zu transformieren. Die Wandler beruhen dabei immer auf physikalischen Effekten wie beispielsweise dem zuvor erwähnten Piezoeffekt. Die unten angeführte Grafik zeigt die verschiedenen nutzbaren Effekte für das Energy-Harvesting. Harvesting durch den piezoelektrischen Effekt bietet den Vorteil, dass die Energiedichte im Vergleich zu der Spannung, verglichen mit anderen Harvestern, am größten ist (siehe Abbildung 14)

Abbildung 14: Energiedichte⁷⁹



⁷⁴ Vgl. Piezosystem Jena GmbH 2013.

⁷⁵ Vgl. Piezosystem Jena GmbH 2013.

⁷⁶ Vgl. Piezosystem Jena GmbH 2020.

⁷⁷ Vgl. PI Ceramic GmbH.

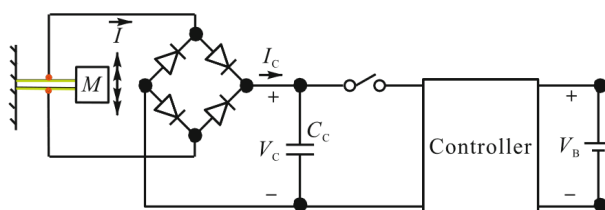
⁷⁸ Vgl. PI Ceramic GmbH.

⁷⁹ Erturk/Inman 2011, 2.

Um ein effizientes Energy Harvesting zu betreiben sollte die Eigenfrequenz der Konstruktion nahe der Einwirkungsfrequenz sein, wobei die Eigenfrequenz die optimale Frequenz zur Energieerzeugung bildet.⁸⁰ Daraus folgt, dass zur effizienten Energieerzeugung und -speicherung ein dynamischer Lastwechsel notwendig ist. Eine einzige Auslenkung kann nicht für ein Energy Harvesting genutzt werden.

Damit das Laden eines Akkumulators oder einer Batterie möglich wird, muss die erzeugte Wechselspannung über einen Gleichrichter und einen Kondensator zur Glättung des Signals in eine stabile Gleichspannung umgewandelt werden.⁸¹ Eine dementsprechende Standard Schaltung besteht aus einem Piezobauteil, einem Gleichrichter, einer Filter Kapazität, einem Schalter, einem Controller und einer Batterie oder einem Akkumulator (siehe Abbildung 15).⁸²

Abbildung 15: Schematischer Schaltplan eines Energy Harvesting Systems⁸³



Ein Ladevorgang umfasst in der Regel zwei Phasen, den vorübergehenden Ladezustand und den stationären Ladezustand. Durch den Schalter werden die beiden Zustände geregelt. Sobald die Kapazität den angestrebten, kritischen Wert der Ladspannung erreicht, welcher vom Controller und der Batterie festgelegt wird, aktiviert sich der stationäre Modus und die Batterie wird geladen. Dabei wirkt der Filterkondensator „ C_c “ als Energiereservoir, um die Gleichspannung an der Batterie zu glätten.⁸⁴

Ein besonders innovativer Ansatz zur Nutzung dieses Effekts sind, wie oben bereits angeführt, piezoelektrische Textilien. So hat das Team Jinmei Liu, Long Gu, Nauanyang Cui, Suo Bai, Shuhai Liu, Rusen Yang und Feng Zhou am Institut für Nanowissenschaften und Nanotechnologien an der Universität Lanzhou in China ein Verfahren entwickelt, welches anhand von Reibung eine Spannungsernte von 6,35 V erreichte. Mit diesem Ansatz sind die Forscher*innen in der Lage, Bewegungen des menschlichen Körpers in elektrische Energie umzuwandeln und somit kleine Elektrogeräte mit Stromleistung zu versorgen.⁸⁵

Die Forscher*innen Anja Lund (Projektmitglied „Piezo-Klett“), Karin Rundqvist, Erik Nilsson, Liyang Yu, Bengt Hagström und Christian Mülle entwickelten einen speziellen Traggurt einer Tasche und schlugen somit eine „autarke Ladestation“ vor (siehe Abbildung 16). Durch die PVDF-Fasern (Poly vinylidene fluoride) sind die Entwickler*innen in der Lage eine Leistung in Höhe von vier μW bei

⁸⁰ Vgl. Ebda, 6.

⁸¹ Vgl. Ebda, 3.

⁸² Vgl. Kangqi/Chunchui/Weidong 2014, 1.

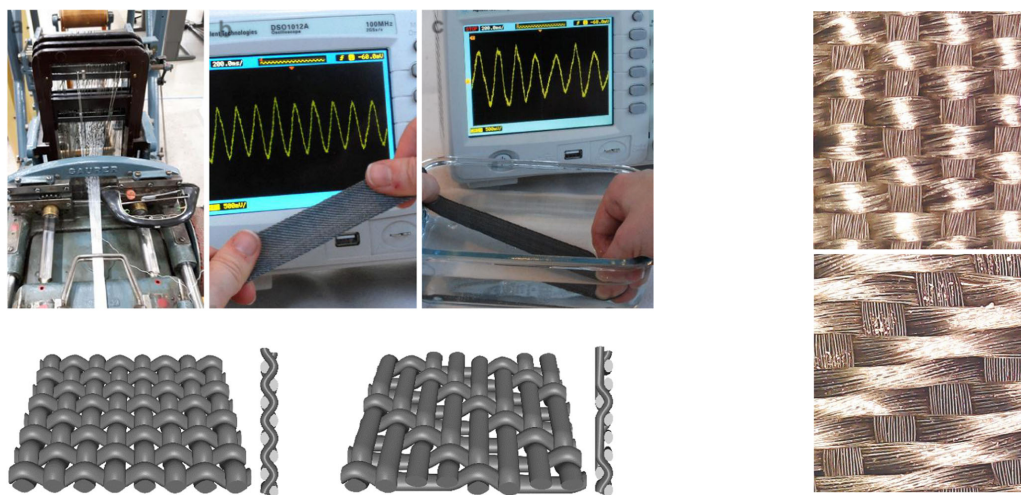
⁸³ Kangqi/Chunchui/Weidong 2014

⁸⁴ Vgl. Ebda, 2.

⁸⁵ Vgl. Jinmei/Long/Nuanyang 2019, 1.

einem strammen Spaziergang zu erzeugen. Energy Harvesting durch den Piezoeffekts erfolgt hierbei durch Dehnungen in einer Faser oder einem Faserverbund und ist in der Lage, (kleine) elektrische Verbraucher wie Sensoren oder Funksender mit Strom zu versorgen. Die Anwendung wurde für Kleidung und Alltagsgegenstände gedacht und im vorliegenden Projekt für den Baubereich untersucht.⁸⁶

Abbildung 16: Herstellung und piezoelektrisches Verhalten der gewebten Bänder. Foto der Bandwebmaschine, die für die Herstellung der piezoelektrischen Textilien verwendet wurde. Fotos der Textilbänder (trocken und in Wasser getaucht). Die Ausgangsspannung bei Dehnung wird auf dem Bildschirm des Oszilloskops angezeigt. Darstellungen der Webstruktur (unten schematisch, Foto rechts)⁸⁷



3.2.5. Digitalisierung im Bauwesen

Die Digitalisierung im Rahmen der Architektur- und Ingenieursleistungen entwickelt sich stetig, um die Planungsphasen der interdisziplinären Professionen besser koordinieren zu können, aber auch in Sachen Planung und Konstruktion, Automatismen zur effizienteren Abwicklung von Arbeitsprozessen zu etablieren.⁸⁸

Hinsichtlich der Resilienz müssen Maßnahmen seitens der gestalterischen, planenden und organisierenden Ebene gesetzt werden, um vor allem neue Wege zu entdecken, Grauenenergiewerte zu reduzieren. Werden Planungsprozesse optimiert, so eröffnen sich neue Aufgabengebiete welche Fragen aufzeigen und vermeintlich gelöst geglaubte Herausforderungen neu in den Fokus setzen. Digitalisierungsprozesse sind allumfassend und müssen demnach holistisch analysiert werden, um die notwendigen Transformationsschritte hinsichtlich einer Nachhaltigkeit in der Baupraxis erfüllen zu können. Betrachtet man des Weiteren den Aspekt „die Welt zu vermessen“ so wird klar, dass mit dem steigenden Anspruch die Planungs- und Projektumwelt zu digitalisieren, auch der

⁸⁶ Vgl. Lund u.a. 2018.

⁸⁷ Lund u.a. 2018

⁸⁸ Vgl. Goger/Piskernik 2018, 125 — 142.

Materialverbrauch, sowie der Datentransfer und demnach auch der Ressourcenverbrauch für die Datenverwaltung sowie zur Erstellung der Infrastruktur, bezogen auf derzeit marktübliche Systeme, steigt. Um diesem Prozess des Materialverbrauchs entgegenzuwirken, muss auch ein Umdenken in der Art und Weise der Datenerfassung sowie Datenübermittlung stattfinden.

Des Weiteren sind Informationen, wie Umwelteinflüsse, Kräfte durch Wind sowie Schneelastmessungen, in der Digitalisierung des Bauwesens für die Forschung und für eine mögliche spätere Verwertung von Forschungsergebnissen essenziell, da sie einen Mehrwert am Markt darstellen. So existieren bereits jetzt freiwillige öffentliche Communitys wie *OpenAQ*, die beispielsweise Mikro-Klimadaten erfassen und der Allgemeinheit zur Verfügung stellen.⁸⁹

Die Daten, die hierbei gewonnen werden (Gebäude-, Umwelt-, Konstruktions-, Eigenschaften u.v.m.), können für die Zukunft wertvolle Erkenntnisse liefern. Jedoch in Anbetracht der stetig wachsenden Fülle an Daten, die (durch Voranschreiten der Vernetzung im Smart Homes und das enorme Wachstum bei IoT-Geräten) generiert werden, ergeben sich neue Herausforderungen bei deren Analyse und deren Auswertung in Abhängigkeit des beispielsweise Materialverschleißes und der unterschiedlichen Lebensdauer der einzelnen Komponenten.⁹⁰ Software-Werkzeuge und -Plattformen zur Visualisierung, Filterung und Analyse großer Datenmengen werden laufend weiterentwickelt, in ihrem Funktionsumfang erweitert und in ihrer Effizienz gesteigert. Maschinelles Lernen und künstliche Intelligenz sind hierbei ideale Werkzeuge, um die arbeitsintensive Analyse großer Datenmengen zunehmend zu automatisieren.

Vor allem bedenkt man die Möglichkeit der Implementierung der Daten in die s.g. „BIM-Programme“ ab Fertigstellung des Gebäudes, demnach der Rückkoppelung des physischen Objektes in das Virtuelle Modell. Ab der Phase der Ausführung, erweist sich demnach die Fähigkeit der DATEN-Rückkopplung, einer möglichen Symbiose mit dem BIM-Modell, um über den Istzustand der Bauelemente – Konstruktion (Wandsysteme, Decken und vor allem im Bereich der TGA) sowie der Datenerfassung zukünftiger Ressourcen – eine gesamtheitliche Relevanz im Lebenszyklus eines Gebäudes, unabhängig vom Rückbau, zu gewährleisten.

Infolge des Änderungsantrages zu EU-Vergaberichtlinien des Europäischen Parlaments im Jahr 2014, hinsichtlich einer verpflichtenden BIM-Planung, wie auch als Folge der ÖNORM 6241-2, welche sich mit der Definition von Strukturen, Austausch und Zusammenarbeit in digitalen Gebäudemodellen beschäftigt, werden BIM-Modelle immer öfter generiert.^{91 92} In Zukunft scheint als Folge von OpenBIM, und dem „6D-Modell“ ein Modell für alle Lebensphasen (Bewirtschaftung des Bauwerks, Gebäudeabriss, Nachhaltigkeit) möglich.^{93 94} Hierbei sei festgehalten, dass es nach Kenntnis der Autor*innen noch keine einheitliche Lösung einer (daten-) verlustfreien Aufbewahrung des Gebäudemodells gibt. Demnach auch hierzu die Absicht Daten und Kennwerte unmittelbar und lokal auf bestimmte Zeitspannen bewahren zu können.

Hier setzt die EU mittels digitaler Gebäudeloggbücher, in Form eines gemeinsamen Speichers für alle relevanten Gebäudedaten an. Diese Logbooks sollen durch Transparenz und Vertrauen die fundierte

⁸⁹ Vgl. OpenAQ.

⁹⁰ Vgl. Hsu/Lin 2016.

⁹¹ Vgl. Heinrich 2021.

⁹² Vgl. Austrian Standards International 2015.

⁹³ Vgl. Building Smart International.

⁹⁴ Vgl. LEAD Innovation Management GmbH.

Entscheidungsfindung und den Informationsaustausch innerhalb des Bausektors, zwischen Gebäudeeigentümern und Nutzern, Finanzinstituten und Behörden ermöglichen. Mit diesem Ziel wurden Maßnahmen vorgeschlagen, die von der Europäischen Kommission durchgeführt oder unterstützt werden sollen und wovon nachfolgende zwei Maßnahmen auf grundlegender Ebene die Projektergebnisse beeinflussen:

- Entwicklung eines standardisierten Konzepts für die Datenerfassung, das Datenmanagement und die Interoperabilität sowie des entsprechenden Rechtsrahmens
- Entwicklung von Leitlinien für die Verknüpfung bestehender Datenbanken

Betrachtet man die angestrebte Autarkie der Sensortechnologien, so können durch die Digitalisierung optimierte Nutzungszyklen und Stromverbrauchskreisläufe entwickelt werden, welche den Verbrauch von Energie vermeiden und in der weiteren Folge durch gut und optimiert funktionierende Sensoren die 1:1 Rückkopplung zu den Simulations- und Konstruktionsprogrammen (BIM) ermöglicht werden.

Zusammengefasst sind folgende weiterführende Anwendungen autarker Sensortechnologien denkbar: Urban Mining, Baustellencontrolling, Massenermittlung, Montageanleitung, Warnhinweise, „Smart Site“, Predictive Maintenance, Anlagenkennzeichnung, Datensicherheit u.v.m.⁹⁵

In diesem Kontext sei noch erwähnt, dass Berlin TXL für die deutsche Hauptstadt ein Vorreiter auf dem Weg zu einer Smart City werden möchte.⁹⁶ Dafür brauchen die smarten Quartiere nicht nur eine digitale Infrastruktur, sondern auch Orte für Innovationen und ein Partner-Netzwerk wo sinnvolle und sichere Nutzung von urbanen Daten entstehen können. Entwickelt wird die digitale Infrastruktur im FUTR HUB, einem Kompetenzzentrum für urbane Daten. Kern des FUTR HUBs ist eine Datenplattform, die urbane Daten zusammenführt, vernetzt und bereitstellt. Die Datenplattform soll als digitaler Maschinenraum Kosten sparen, Innovationen befördern, und ein nachhaltiges Ressourcenmanagement durch vorausschauende Datenanalyse ermöglichen. Das betrifft die Unterstützung von Anwender*innen bei ihren Entscheidungen, Identifikation von, Einsparungspotenzialen indem zudem die Lebensdauer von technischen Anlagen, Gebäuden und Infrastruktur verlängert wird. Die Daten betreffen Energie durch „Smart Grids“, die Mobilität durch Datenanbindung von Carsharing und öffentlichem Verkehr, und die Natur durch „smarte“ Erforschung und Wissensvermittlung. Die Bewohner*innen und Ansiedler*innen von Berlin TXL haben hierbei die Möglichkeit und das Recht, die jeweilige Erhebung und Nutzung von Daten zu bestimmen.⁹⁷ Dieses Projekt behandelt die Vernetzung eines gesamten Quartiers wobei anzunehmen ist, dass herkömmliche Sensoren und Methoden des Datenmanagements eingesetzt werden.

⁹⁵ Vgl. Goger/Piskernik 2018, 125-142.

⁹⁶ Vgl. FUTR HUB, 2022

⁹⁷ Vgl. Ebda.

Daten

Klimadaten

Klimadaten setzen sich zusammen aus der Globalstrahlung, Temperatur, Luftfeuchte und Wind. Durch die Erderwärmung und den Klimawandel unterliegen diese Faktoren Veränderungen.⁹⁸ Als Globalstrahlung wird die Gesamtheit der direkten und diffusen Sonnenstrahlung bezeichnet, die auf einer horizontalen Fläche auftrifft. Maßgebend für die Beurteilung der Strahlung ist die mittlere Sonnenscheindauer in Stunden im Jahresmittel bzw. in einzelnen Spitzenmonaten. Die Jahresstrahlungssumme wird hierbei in kWh/m²a angegeben.⁹⁹ Die Temperatur ist ausschlaggebend für Transmissions- bzw. Lüftungswärmeverluste und Überhitzung und nimmt somit Einfluss auf die Dimensionierung der gebäudetechnischen Anlagengrößen. Als Kennwerte werden eine Höchst- (Sommer-), Tiefst- (Winter) sowie die Jahresdurchschnittstemperatur zugrunde gelegt. Kriterien zur Bestimmung der Luftfeuchte sind die Niederschlagsmenge, -dauer sowie die Verdunstung. Der UTCI Wert wurde entwickelt, um das thermische Wohlbefinden von Menschen quantitativ beschreiben zu können. Dieser wird über die gemessene Lufttemperatur, mittlere Strahlungstemperatur, Luftfeuchte und Windgeschwindigkeit berechnet. Anschließend kann der UTCI Wert auf einer 10-stufigen Skala dargestellt werden und bietet die Möglichkeit den thermischen Stress des Körpers abzulesen.¹⁰⁰ Derzeit sind die Sensoren von *NET-Automation GmbH*, welche mit der Sensorenschnittstelle NETBEE kombiniert werden können, in der Lage, Temperatur, Luftfeuchtigkeit, CO₂ und Feinstaub zu messen. Globalstrahlung und Windgeschwindigkeit können mit externen Sensoren von Drittherstellern gemessen werden.

Bauteildaten

Das EU-Forschungsprojekt „Building as Material Banks“ hat zum Ziel, ein Ende der Rohstoffverschwendung zu bringen.¹⁰¹ Der Materialpass soll dazu beitragen, dass wiederverwendbare Materialien schon in der Planungsphase korrekt integriert werden.¹⁰² Die im Projekt definierten Daten teilen sich in vier Hauptkategorien: Physisch, Prozess, Chemisch und Biologisch. Die Hauptkategorien sind jeweils unterteilt in Subgruppen, welche spezifische Bereiche der Bauteile betrachten und deren Eigenschaften in einem BIM-Model oder Dashboard erfassen und darstellen.¹⁰³ Unter Bauteildaten verstehen die Projektmitglieder die Gesamtheit aller Daten, welche über ein Bauteil bekannt sind. Dabei kann es sich um vorab definierte geometrische oder physikalische Daten handeln, aber genauso um Daten über die Ökobilanz der Bauteile oder, mittels aktiver Sensorik gemessene Einwirkungen während dem Nutzungszeitraum.

Erwähnt seien hier zudem Ökobilanzen, welche Aussagen über Produkte hinsichtlich ihrer Einwirkungen auf die Umwelt bewerten und auf Bauteildaten angewiesen sind. Sie dienen der Bewertung und Analyse von eingesetzten oder verwendeten Objekten.¹⁰⁴

⁹⁸ Vgl. Eichelmann 2019.

⁹⁹ Vgl. Q.met GmbH.

¹⁰⁰ Vgl. Eichelmann 2019.

¹⁰¹ Vgl. Heinrich/Lang 2019, 4.

¹⁰² Vgl. Ebda.

¹⁰³ Vgl. Ebda. 8-9.

¹⁰⁴ Vgl. EUROPEAN STANDARD 2019, 22-24.

4 Projektinhalt

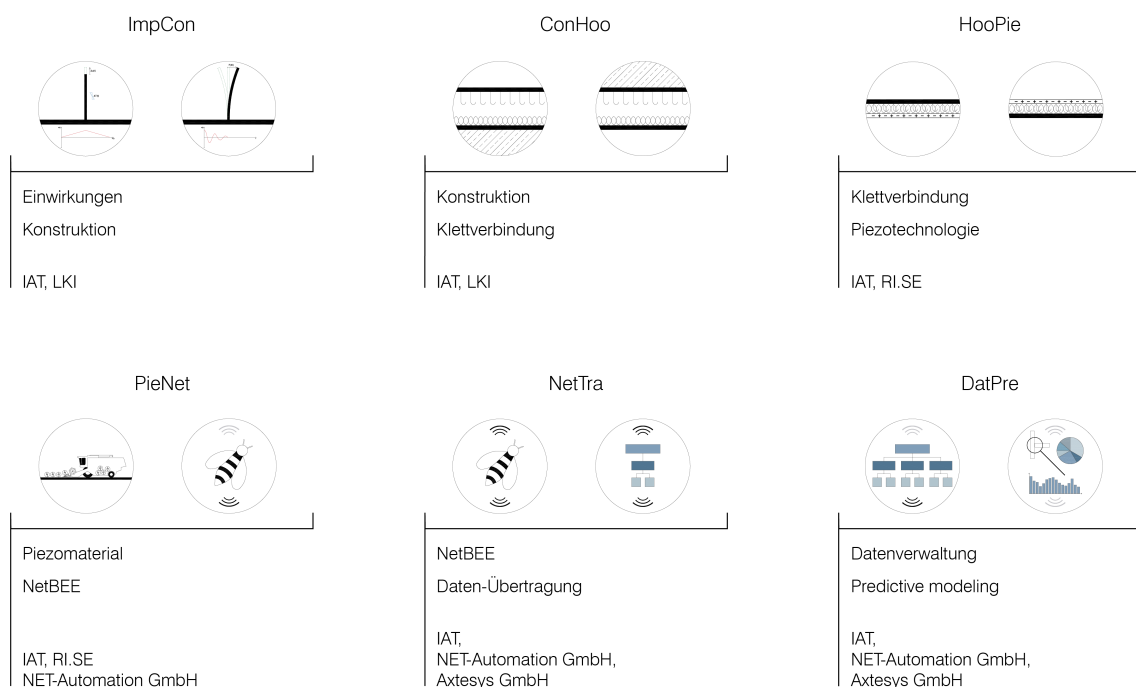
Das Projekt „Piezo-Klett“ ist transdisziplinär, thematisch breit und heterogen aufgestellt, untersucht bautechnische, elektrotechnische und digitale Aspekte. Dementsprechend erstreckt sich der Untersuchungsgegenstand über mehrere Bereiche:

- Einwirkungen (auf Gebäudeteile)
- Konstruktion (Primär-, Sekundär- und Tertiärstruktur)
- Füge Technologien (ausgehend von der Klettverbindung)
- Piezoelektrische Komponenten (Produkte, Muster)
- *NETBEE* (Sensoren-Schnittstelle)
- Daten-Übertragung
- Datenverwaltung
- Predictive Modeling

Zur Bearbeitung wurden aus diesen Bereichen Gruppierungen gebildet (siehe Abbildung 17). „ImpCon“ beschreibt Einwirkungen und die Konstruktion. „ConHoo“ die Konstruktion und Füge Technologien. „HooPie“ die Anwendung der Klettverbindung sowie von piezoelektrischem Material/Komponenten. „PieNet“ die Energieversorgung von *NETBEE* mittels Piezoelektrik. „NetTra“ optimierte Übertragungszyklen und „DatPre“ die Datenverwaltung und das „Predictive Modeling“.

In diesen Gruppierungen wurde eine zielorientierte Literaturrecherche, eine grundlegende Konzeptentwicklung und eine experimentelle Untersuchung einzelner Systemelemente (auf bautechnischer, elektrotechnischer und digitaler Ebene) durchgeführt.

Abbildung 17: Forschungsfeld [Institut für Architekturtechnologie (IAT), TU Graz]



Projektziel war es nicht, ein finales Produkt zu entwickeln, sondern die Projektidee auf grundlegender Ebene zu untersuchen. Im Projektverlauf wurde zudem sichtbar, dass bereichsübergreifend viele Abhängigkeiten bestehen (z.B. die elektrotechnischen Komponenten je nach bautechnischer Anwendung und Einwirkung auszuwählen sind), Entwicklungsschritte somit nicht linear, sondern in allen Bereichen parallel zu setzen und fortlaufend zu evaluieren sind. Und aus diesem Grund die Komplexität im Kontext der Projektidee sehr hoch ist.

In der Projektumsetzung kam es zu Projektergebnissen mit innovativen Inhalten und dem Potential einer Patentierung. Aus diesem Grund werden im vorliegenden Bericht nur ausgewählte Ergebnisse und durchgeführte Arbeiten dargestellt.

4.1. Literaturrecherche

Im Rahmen der Literaturrecherche wurden Fachbücher, Journal-Papers, Patente, Produktdatenblätter und Forschungsberichte mit thematischem Bezug studiert. Den Rahmen bildete hierbei der oben dargestellte Untersuchungsgegenstand wie auch die fachlichen Kenntnisse innerhalb des Projektteams. Die Auswahl erfolgte anhand einer qualitativen Einschätzung der Relevanz wie auch anhand von Stichwörtern im Kontext des Forschungsziels.

Fachbücher wurden über die Bibliothek der TU Graz bezogen und betreffen beispielsweise die Baudynamik (Christian Petersen, Horst Werkle: Dynamik der Baukonstruktionen) und die Baukonstruktion (José Luis Moro: Baukonstruktion - vom Prinzip zum Detail, Band 1-4). Ebenso wurden über diese Bibliothek Papers bezogen, welche beispielsweise aktuelle Forschungsergebnisse zu Einwirkungen auf Gebäude oder die Piezotechnologie behandeln. Patente mit thematischer Relevanz wurden über *Espacenet (Europäische Patentorganisation)* und *Google Patents* recherchiert. Produktdatenblätter konnten direkt von den Herstellern bezogen werden.

4.2. Konzeptentwicklung

Die Konzeptentwicklung bildet den Kern des Projektes wie auch die Grundlage für die experimentellen Untersuchungen und elektrotechnischen und digitalen Entwicklungsansätze.

4.2.1. Bautechnik

Ausgangspunkt stellen auf bautechnischer und baukonstruktiver Ebene unterschiedliche Einwirkungen auf Gebäude oder Gebäudeteile in Form veränderlicher Lasten dar. Diese umfassen klimatische Einwirkungen/Einflüsse (Wind, Temperatur, Niederschlag, Schnee) und menscheninduzierte Einwirkungen (Nutzlasten, Verkehrslasten). Im Kontext außergewöhnlicher Einwirkungen (Erdbeben, Anprall, Explosion und Brandeinwirkung) wurden keine eigenen Konzepte entwickelt, aber z.B. Warnsysteme angedacht.

Die Entwicklung der Konzepte erfolgte anhand architektonischer und baukonstruktiver Entwurfsmethoden mit dem Ergebnis, händischer Skizzen, digitaler Zeichnungen und bautechnischer Beschreibungen. Zudem wurden interne Konzept-Workshops abgehalten, in welchen bestehende Konzepte besprochen, diese weitergedacht und detailliert, wie auch daraus resultierende neue Konzepte als Ideen festgehalten und entwickelt wurden.

Zudem wurden zur Abschätzung der auftretenden Kräfte (in den bautechnischen Konstruktionen) Windanalysen (z.B. CFD-Berechnung) und Modalanalysen, wie auch Simulationen durchgeführt. Wie auch vereinfachte mechanische Modelle erstellt, sowie Berechnungen durchgeführt, um die Potenziale und Prinzipien aufzuzeigen. Die dafür notwendigen Materialeigenschaften wurden anhand von Fachliteratur abgeschätzt.

4.2.2. Elektrotechnik

Aufgrund der hohen Komplexität der Thematik, wie auch der unterschiedlichen Bedingungen je nach Anwendungssituation im oder am Gebäude, bestand das Ziel im Rahmen der elektrotechnischen Entwicklung darin, für eine Energieversorgung des *NETBEE* Moduls technische Grundlagen zu schaffen.

Die „Harvest-Elektronik“ zielte somit darauf ab, zu messen wieviel Energie die im Rahmen der Versuche (am *Labor für Konstruktiven Ingenieurbau*) getesteten Piezokomponenten produzierten. Hierzu wurde in einem ersten Schritt, anhand von Elektronikdesign und Schaltplanerstellung, unterschiedliche Varianten einer vorgeschalteten Elektronik konzipiert und anhand von Simulationen getestet. Dazu wurden entsprechende Bauteile ausgewählt und eine mit dem *NETBEE*-Basismodul kompatible Platine entwickelt.

Die Simulationen (einzelner elektronischer Bauteile, wie auch Aufbauten) wurden mittels der Messgeräte *Oszilloskop DPO 3014 Tektronix*, Messgerät Spannung *Vin 1: Fluke 8846A*, Spannungsquelle Frequenzgenerator *FG1617 Voltcraft*, USB-Ausgang Messgerät, und *NETBEE Ver.3* durchgeführt. Die nachfolgenden Bilder (siehe Abbildung 18, Abbildung 19 und Abbildung 20) zeigen Versuche zur Energy-Harvesting Platine.

Abbildung 18: Versuche Energy-Harvesting Platine 1 [NET-Automation GmbH]

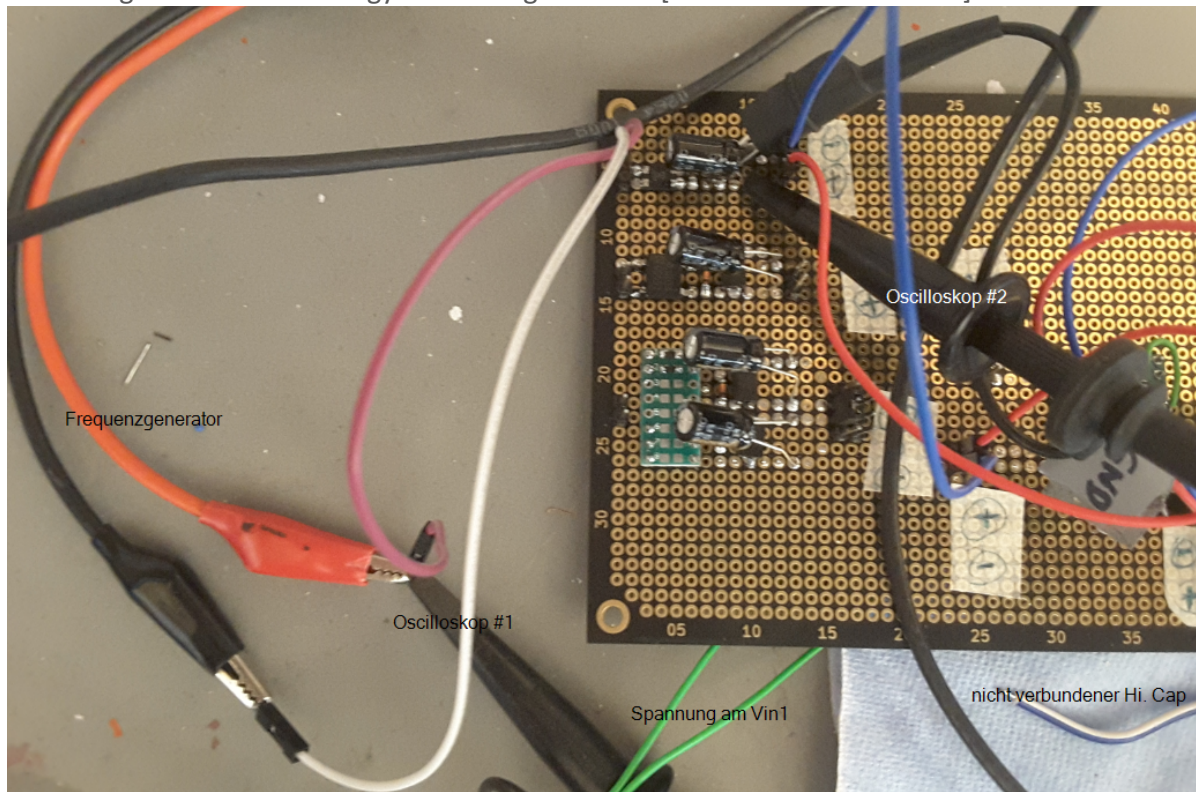
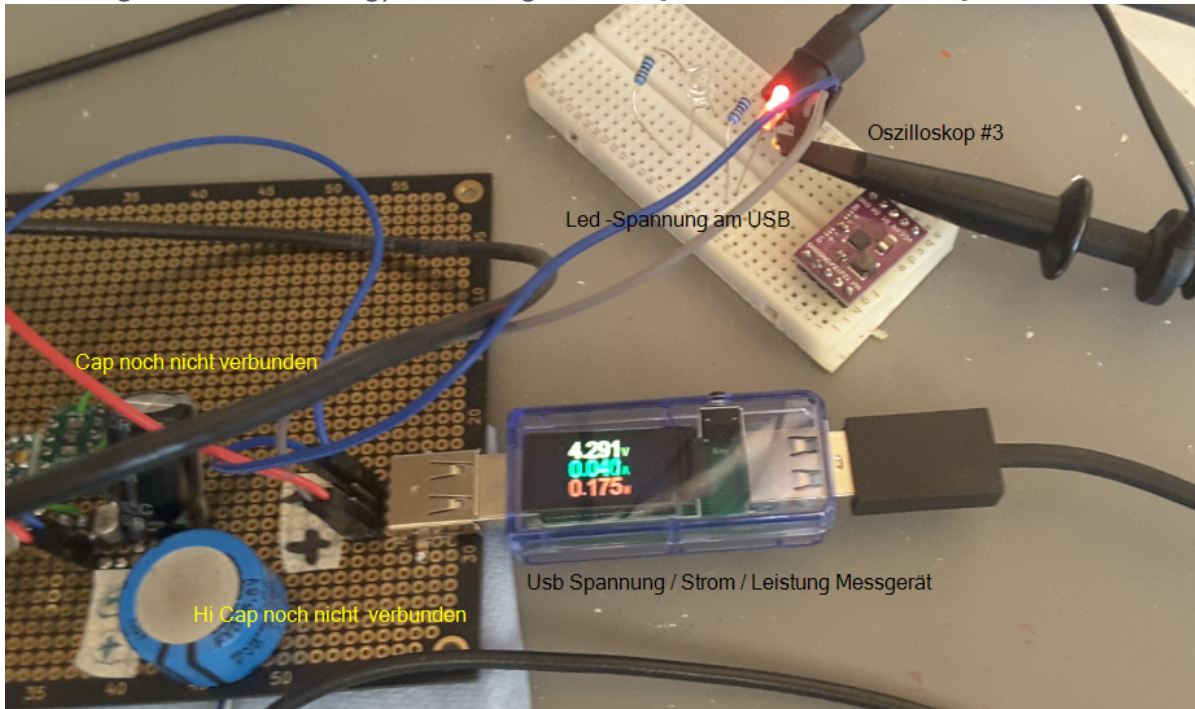
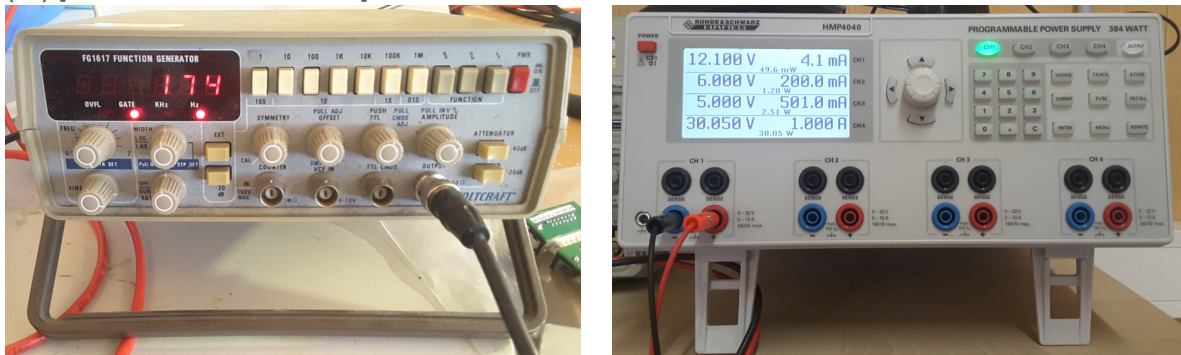


Abbildung 19: Versuche Energy-Harvesting Platine 2 [NET-Automation GmbH]



Die Messungen und Untersuchung der konstruierten Harvest Platinen wurden mittels Frequenzgenerator und Spannungsversorgung über das Netzteil HMP4040 durchgeführt.

Abbildung 20: Spannungsquelle Frequenzgenerator FG1617 Voltcraft (li), Netzteil HMP4040 (re) [NET-Automation GmbH]



Darüber hinaus wurde die Kombination des Piezo-Elements P-876.A12 (von PI Ceramic GmbH) mit unterschiedlichen Kondensatoren getestet. Hierzu wurde das Element an einem Ende eingespannt und auf Biegung belastet.

Weiters wurde für das NETBEE-Modul eine spezielle Firmware geschrieben, welche das hochfrequente Auslesen von Strom und Spannung (Leistungsberechnung) ermöglicht. Die Datenübertragung zwischen Hardware und Cloud wurde via Narrowband-IoT realisiert, wobei die Cloud auf die neue Firmware abgestimmt werden musste. Zudem wurden spezifische API Schnittstellen programmiert, um Daten aus der Cloud auszulesen und zu nutzen.

4.2.3. Digitalisierung

Zu Beginn des Projektes wurden die möglichen Messdaten der Sensoren (der *NET-Automation GmbH*) analysiert und diskutiert, welche Daten visualisiert werden sollen. Zudem wurden Sensormodule via Narrowband IoT (NB-IoT) mit der *NETBEE* Cloud verbunden um die wesentlichsten Faktoren in Bezug auf den Energieverbrauch, die Übertragungszyklen der potentiellen Daten zu analysieren, wie auch um Optimierung vorzunehmen. Des Weiteren wurden im Kontext von Daten drei konkrete Use Cases identifiziert, bearbeitet wie auch Dashboards entwickelt:

- Material Passport (Bauteildaten)
- Mikroklima Daten (Klimadaten)
- Predictive Maintenance

4.3. Potentialabschätzung

Die entwickelten Konzepte wurden untereinander verglichen, analysiert, bewertet und für eine weitere Bearbeitung und Überprüfung in Versuchen ausgewählt. Dies erfolgte anhand der Nutzwertanalyse. Dazu wurden Bewertungskriterien bestimmt und gewichtet, Alternativen beurteilt und abschließend das Ergebnis berechnet und interpretiert. Die Bewertungskriterien bestehen in der Frequenz einer Einwirkung und ihrer Kraftgröße (jeweils möglichst hoch), erwartbarem (Piezo-) Materialverbrauch im Kontext von Energieerzeugung, Anwendbarkeit im Bauwesen (breitflächig, Sonderkonstruktionen, Neubau, Sanierung, Komplexität) und Innovationsgehalt (Neuheit im Vergleich zu Stand der Technik, Nachhaltigkeit). In einem ersten Schritt wurden diese fünf Bewertungskriterien textlich qualitativ beschrieben, besprochen und um eine quantitative Bewertung der einzelnen Punkte ergänzt. In Meetings mit allen Projektbeteiligten wie auch in Kleingruppen wurden zudem Stärken, Schwächen und Potentiale auf qualitativer Ebene festgestellt. Aus den quantitativen Bewertungen wurde ein Durchschnitt gebildet, welcher einen Vergleich und eine Rangliste der Konzepte ermöglichten. Die hierbei, je Konzept, angewandte Tabelle ist nachfolgend dargestellt. Sie umfasst eine Überschriftzeile mit Konzeptkürzel, Name und Potentialindex und einer Erläuterung der quantitativen Abschätzung. Wie auch eine Darstellung des Konzeptes als Konstruktionszeichnung und ein Diagramm welches die quantitative Abschätzung nach Bewertungskriterien abbildet.

Tabelle 1: Potentialabschätzung [Institut für Architekturtechnologie (IAT), TU Graz]

Kürzel		Konzeptname			Potenzial Index		Erläuterungen zur Abschätzung
Konzeptbild (Konstruktionszeichnung)							1. Frequenz
							-
							2. Kraftgröße
							-
Einwirkung	Frequenz	Kraftgröße	Materialverbrauch	Anwendbarkeit	Innovationsgehalt	3. Materialverbrauch	
-	-	-	-	-	-	-	
Diagramm							4. Anwendbarkeit
							-
							5. Innovationsgehalt
							-

4.4. Laborversuche

Zur Abschätzung welche Piezo-Technologie in die Konzepte einfließen und im Labor untersucht werden sollten, wurden durch *NET-Automation GmbH* Vorversuche mit Multimeter und Oszilloskop am Unternehmensstandort in Zeltweg durchgeführt. Für jede Testreihe wurde eine Elektronikbeschaltung konzipiert und aufgebaut, mit dem Ziel, die größtmögliche Energie zwischenzuspeichern. Die Versuchsobjekte wurden durch ein „Piezo-Textil-Band“, einem Bestandsobjekt aus einer früheren Forschung von Anja Lund, wie durch am Markt erhältliche Produkte gebildet:

- Piezo-Textil-Band
- DuraAct Flächenwandler von *PI Ceramic GmbH* (P-876.A12)
- Piezokeramische Platten (Biegeelement) von *PI Ceramic GmbH* (PL127-11)
- Piezoelektrische Scheibe von *PI Ceramic GmbH* (PRYY+0187)
- Piezo-spiral-wrapped Coaxial Cable von *TE Connectivity* (1005801-1)

Anhand der Versuchsergebnisse wurde das „Piezo-Textil“, der DuraAct Flächenwandler von *PI Ceramic GmbH* und die Piezoelektrische Scheibe von *PI Ceramic GmbH* (PRYY+0187) für weiterführende Versuche am *Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI)* ausgewählt, welche nachfolgend beschrieben werden.

4.4.1. Piezo-Textil-Band

Die Versuche umfassen einzeln als Band geführte Piezo-Textil-Bänder, einzeln als Schlaufe geführte sowie parallel als Schlaufe geführte Piezo-Textil-Bänder. Die in diesem Bericht dargestellte Quantifizierung betrifft die Zugfestigkeit sowie die gewinnbare elektrische Energie in Abhängigkeit der Lasteinwirkung.

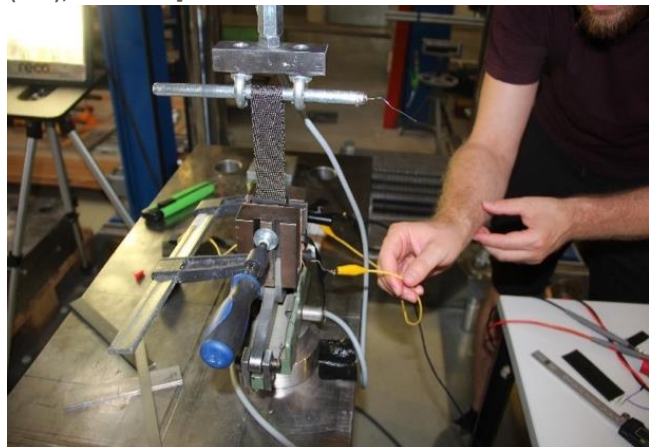
Einzeln geführte Bänder wurden in unterschiedlichen Längen und mit elektrisch isolierten Stahl-Klemmbacken in eine hydraulische Prüfmaschine eingespannt. Die Zugfestigkeit des Textil-Bandes wurde durch langsame Laststeigerung bis zum Versagen ermittelt. Die gewinnbare elektrische Spannung wurde durch dynamische Belastung untersucht. Die Wegmessung erfolgte direkt über die Prüfmaschine, die Kraftmessung wurde mit einer 10 kN Kraftmessdose mit der Messklasse 1 aufgezeichnet. Zudem wurden die Frequenz und die zwischengeschalteten Widerstände variiert.

Zur Untersuchung einzeln und parallel geführter Piezo-Bänder als Schlaufe wurden diese in unterschiedlichen Längen, an zwei Bandenden, am unteren Teil mittels Klemmbacken befestigt, diese durch eine elastische Sylomer-Zwischenlage voneinander getrennt, und das Band mittig über eine Stahlstange geführt. Anschließend wurden zur Ermittlung der elektrischen Energie Zugversuche mit verschiedenen Frequenzen und Auslenkungen (definierte Maschinenbewegungen) durchgeführt. Als zusätzliche Variation wurde das Textil bei einem Versuch benässt, also einer Feuchteeinwirkung ausgesetzt.

Abbildung 21: Piezotextil-Band [Institut für Architekturtechnologie (IAT), TU Graz]



Abbildung 22: Piezotextil-Band als Schlaufe im Zugversuch [Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz]



4.4.2. DuraAct Flächenwandler von PI Ceramic GmbH

Das Produkt „DuraAct-Flächenwandler“ wurde in drei unterschiedlichen Ausführungen und Materialstärken getestet (P-876.A11, P-876.A12, P-876.A15)¹⁰⁵ und hierzu einseitig in einen Schraubstock eingespannt. Das gegenüberliegende Ende wurde (um Beschädigungen möglichst zu reduzieren) über ein dehnbare Gummiband an einer motorisierten Pleuelstange befestigt. Die Flächenwandler wurden somit wie ein einseitig eingespannter Kragarm dynamisch mit unterschiedlichen Frequenzen und Auslenkungen belastet (siehe nachfolgende Abbildung). Die Spannungsmessung erfolgt wie in den zuvor durchgeführten Versuchen mittels Oszilloskops. Kraft und Weg konnten aufgrund des experimentellen Aufbaus nicht mit aufgezeichnet werden. Die Steifigkeit des jeweiligen einseitig eingespannten Flächenwandlers wurde mit einer 10 N Federwaage abgeschätzt und die Auslenkung mit einem Metermaß gemessen. Dadurch kann eine Federkonstante errechnet werden, welche als Grundlage für die Abschätzung der aufgetragenen mechanischen Arbeit und Leistung dient.

Abbildung 23: DuraAct Flächenwandler PI Ceramics GmbH [Institut für Architekturtechnologie (IAT), TU Graz]

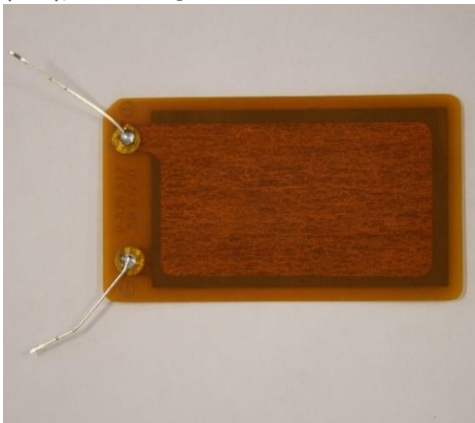
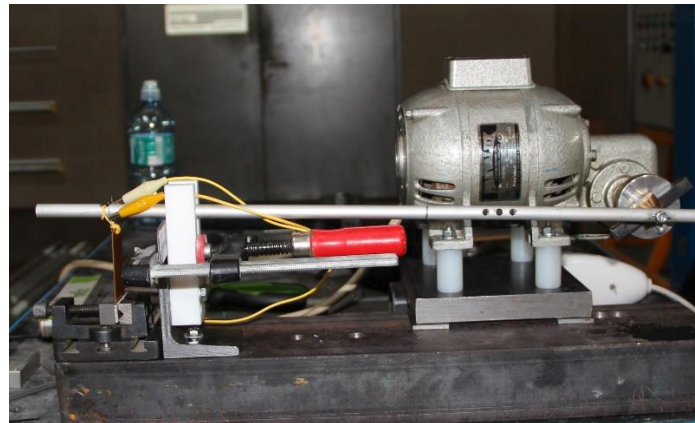


Abbildung 24: DuraAct Flächenwandler im Versuchsaufbau [Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz]



4.4.3. Piezoelektrische Scheibe von PI Ceramic GmbH (PRYY+0187)

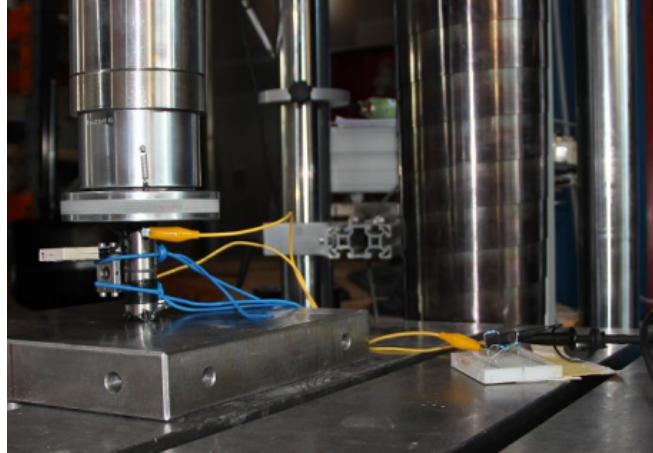
Die Piezoelektrische Scheibe ist das einzige Bauteil, welches mit Druck belastet wird. Im Versuch wurde die Münze zwischen zwei Stahlzylinder mit einem Durchmesser von 24 mm positioniert, welche der Lastaufbringung, wie auch als Leiter zum Abgreifen der elektrischen Spannung dienen. Eine dynamische Druckbelastung wurde mit der mechanischen Prüfmaschine aufgebracht (siehe Abbildung 26). Die Stauchung der Piezo-Münze erfolgt mit einem 25 mm DD-1 Dehnungsmesser, welcher mit zwei Gummibändern an den Stahlzylindern fixiert wird. Die Piezomünzen wurden an den beiden Polen kontaktiert und mit Gummi isoliert. Zudem wurde zur Sicherheit die Münze verpackt, um im Fall der Zerstörung den Austritt etwaigen gesundheitsschädlichen Staubs zu verhindern.

¹⁰⁵ Vgl. PiCeramic GmbH.

Abbildung 25: Piezoelectric Disc – PI Ceramic GmbH (PRYY+0187) [Institut für Architekturtechnologie (IAT), TU Graz]



Abbildung 26: Aufbau Druckversuch Piezoscheibe [Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz]



4.5. Evaluierung der Versuchsergebnisse

Die Versuchsergebnisse wurden interpretiert und in Bezug auf die Konzepte und damit vorangegangene Potenzialabschätzung analysiert. Die Evaluierung der Versuche wurde am *Labor für Konstruktiven Ingenieurbau* (LKI) und am *Institut für Architekturtechnologie* (IAT) durchgeführt. Hierzu erfolgte in Projektphase I ein Vergleich der aufgebrachtten mechanischen Arbeit der Prüfmaschinen und der resultierenden elektrischen Leistung, welche anhand der mittels Oszilloskops gemessenen elektrischen Spannung berechnet wurde. Zudem erfolgte in Projektphase II ein Vergleich des aufgebrachtten mechanischen Weges der Prüfmaschinen und der resultierenden elektrischen Spannungen.

Zudem wurden die Signalqualitäten überprüft, sowie der Einfluss der einzelnen Versuchsobjekte auf die gesamte elektrotechnische Schaltung. Wie auch die mit unterschiedlichem Weg und Frequenz aufgezeichneten Versuche verglichen, um eine Aussage über den Einfluss der Unterschiede in der Belastung zu treffen.

Darüber hinaus wurden die Versuche (Messdaten, Aufbauten) auf empirischer Ebene hinsichtlich der bautechnischen Konzepte anhand baupraktischer Analyse und Fachgesprächen im Projektteam evaluiert.

Eine weitere Evaluierung betrifft den Vergleich, inwieweit mit den Messergebnissen das *NETBEE* Modul betrieben werden kann. Hierzu wurden zunächst die Effektivwerte der gemessenen Spannungen je Versuch ermittelt. Durch den vorgeschalteten Widerstand konnte in einem weiteren Schritt über das Ohmsche Gesetz der Strom berechnet werden, um in weiterer Folge die Leistung zu ermitteln.

$$U = R * I$$

$$P = U * I$$

Anschließend konnte mit den oben errechneten Werten die Energie über eine gewisse Zeitperiode (z.B. 1 Tag) ermittelt werden und mit dem notwendigen Energieverbrauch der Messelektronik verglichen werden.

$$E = P * t$$

Der Energiebedarf einer Messung beträgt je nach Messdauer 1,5 bis 50 J. Für eine Übertragung wurde ein Richtwert von 150 J herangezogen. Damit können die möglichen Mess- und Übertragungszyklen für alle Versuchsergebnisse abgeschätzt werden.

5 Ergebnisse

Das Programm „Stadt der Zukunft“ fördert und unterstützt die stetige Weiterentwicklung von Technologien, insbesondere die Systemintegration verschiedener Modelle zur Transformation zu nachhaltigen und damit zukunftsfähigen Städten, Quartieren und Gebäuden. Im Fokus stehen dabei Energie und Ressourcen, aber auch die Dynamik urbaner Räume und neue Anforderungen an Städte und Gebäude aufgrund des Klimawandels, sowie insbesondere innovative Technologien und Konzepte der Energieerzeugung und Speicherung.

Mit dem Anspruch, diesen Transformationsprozess zu unterstützen, behandelt das Projekt „Piezo-Klett“ Resilienz im Sinne der Anpassungsfähigkeit von Gebäuden an unterschiedliche Nutzungen und die dahingehend erforderliche Kenntnis über die verbaute Struktur. Hierzu wurde auf grundlegender Ebene die Integration piezoelektrischer Komponenten in Bauteilschnittstellen wie auch die Anwendung der Klettverbindung untersucht, welche unterschiedlichen Einwirkungen ausgesetzt sind, um die Sensorschnittstelle *NETBEE* und angeschlossene Sensoren mit Energie zu versorgen und autark zu betreiben.

Anhand der thematischen Inhalte des Projektes erfolgt somit eine erste Annäherung an ein völlig neuartiges und autarkes Energiesystem für aktive Sensoren. Als Folge der innovativen und komplexen Projekthinhalte aber auch insbesondere durch die Zusammenarbeit von Architekten*innen, Bauingenieur*innen und Personen aus dem Bereich der Elektrotechnik und Softwareentwicklung bzw. Digitalisierung, resultieren zudem eine Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit und der F&E-Qualität. Dies zeigt sich auch infolge von Projektergebnissen, welche das Potential einer Patentierung aufweisen und aus Gründen der Geheimhaltung nicht dargestellt werden können.

Eine Darstellung ausgewählter Projektergebnisse erfolgt nachfolgend anhand der Kapitel und Themen „Bautechnik“, „Sensorik“ und „Digitalisierung“. Als Folge der hohen bereichsübergreifenden Abhängigkeiten (z.B. sind die elektrotechnischen Komponenten je nach bautechnischer Anwendung und Einwirkung auszuwählen, und die Eigenschaften piezoelektrischer Komponenten können je Anwendung (Einwirkungen) unterschiedlich sein), wurden mögliche Anwendungsfälle in unterschiedlichen Detaillierungsgraden ausgearbeitet und untersucht. Zudem ist anzumerken, dass infolge des Einsatzes von gänzlich neu entwickelten Komponenten (Piezo-Textil-Band, Harvesting Elektronik) weiterhin Unsicherheiten und Unklarheiten hinsichtlich der Eigenschaften als Einzelelemente oder Teil von Systemen bestehen. Und in Form von weiterführenden Forschungsarbeiten zu klären sind.

5.1. Bautechnik (ImpCon, ConHoo, HooPie)

Zur Darstellung der Projektergebnisse und thematischen Breite wurden drei mögliche Anwendungsfälle oder Konzepte ausgewählt. Diese zeigen unterschiedliche Einwirkungen auf Gebäude, wie auch die Übertragung resultierender Lasten auf unterschiedliche Piezo-Komponenten zur Energiegewinnung und wurden, je nach erfolgter Potentialabschätzung, in unterschiedlichen Detaillierungsgraden ausgearbeitet. Zudem sind den bautechnischen Konzepten, in Abhängigkeit zur

angedachten Piezotechnologie (Piezo-Textil-Band, Flächenwandler, Piezoelektrische Scheibe), ausgewählte Ergebnisse und Erkenntnisse aus den am *Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI)* durchgeführten Versuche zugeordnet.

Das erste Konzept mit dem Namen „Textil-Fassade mit piezoelektrischen Bändern“ stellt einen möglichen Anwendungsfall dar, welcher im Hinblick auf die Projektidee mit hohem Potential bewertet wurde (siehe Auszug der Bewertung in Tabelle 2) und bildet die Grundlage für die experimentellen Untersuchungen, die Sensorik (elektrotechnische Entwicklung) sowie die Digitalisierung (Datenmanagement und Predictive Modelling).

Die weiteren dargestellten Konzepte („Piezoelektrische Kipp-Auflager“, „Piezoelektrisches Türsystem“) weisen interessante Ansätze auf und bieten Möglichkeiten für eine weitere Entwicklung oder die Kombination mit anderen Konzepten, wurden im Kontext der Projektidee und als Einzelkonzept jedoch mit geringem Potential bewertet (siehe Auszug der Bewertung in Tabelle 3 und Tabelle 4).

Tabelle 2: Potentialabschätzung „Textil-Fassade mit piezoelektrischen Bändern“ [Institut für Architekturtechnologie (IAT), TU Graz]

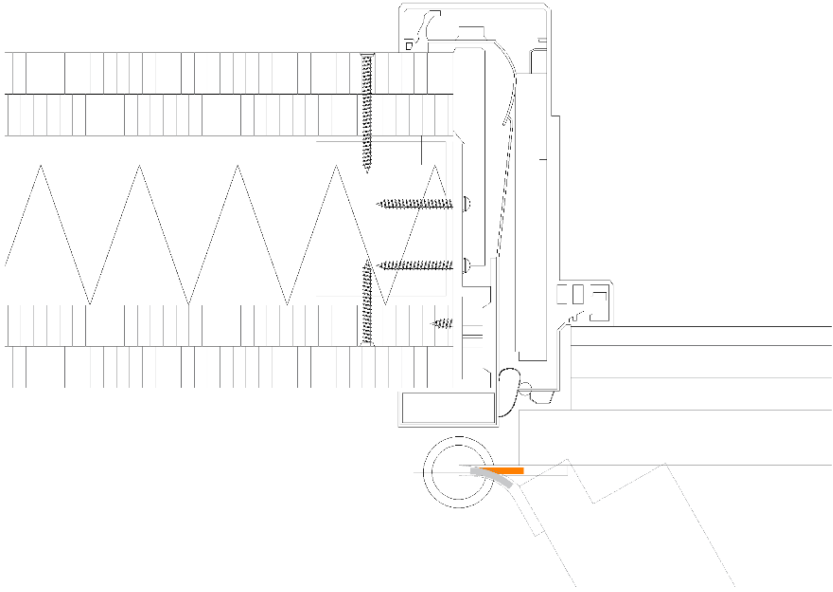
ImpCon_S-S-T-Wind_27		Textilfassade mit piezoelektrischen Bändern			10,0													
Einwirkung	Frequenz	Kraftgröße	Materialverbrauch	Anwendbarkeit	Innovationsgehalt													
Windlast	9	6	8	9	5													
<p style="text-align: center;">Auswertung</p> <table border="1"> <caption>Auswertung</caption> <thead> <tr> <th>Kriterium</th> <th>Wert</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Innovationsgehalt</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>Anwendbarkeit</td> <td>9</td> </tr> <tr> <td>Materialverbrauch</td> <td>8</td> </tr> <tr> <td>Kraftgröße</td> <td>6</td> </tr> <tr> <td>Frequenz</td> <td>9</td> </tr> </tbody> </table>							Kriterium	Wert	Innovationsgehalt	5	Anwendbarkeit	9	Materialverbrauch	8	Kraftgröße	6	Frequenz	9
Kriterium	Wert																	
Innovationsgehalt	5																	
Anwendbarkeit	9																	
Materialverbrauch	8																	
Kraftgröße	6																	
Frequenz	9																	

Tabelle 3: Potentialabschätzung „Piezoelektrische Kipp-Auflager“ [Institut für Architekturtechnologie (IAT), TU Graz]

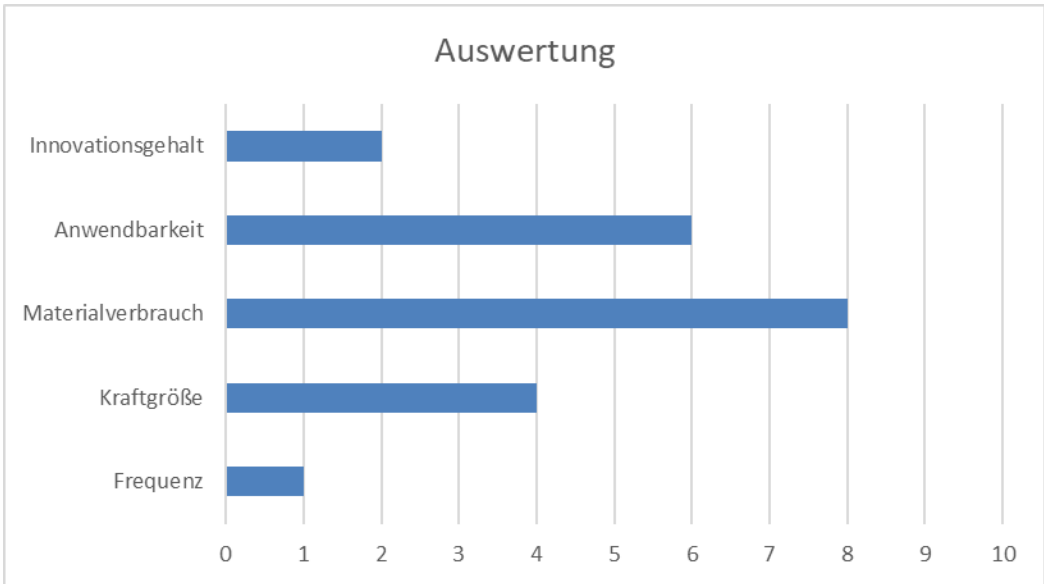
ImpCon_P-Nm-V-Payload_01	Piezoelektrisches Geschoßdecken-Auflager		8,0														
Einwirkung	Frequenz	Kraftgröße	Materialverbrauch	Anwendbarkeit	Innovationsgehalt												
Windlast	3	9	8	5	9												
<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <caption>Auswertung</caption> <thead> <tr> <th>Kriterium</th> <th>Wert</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Innovationsgehalt</td> <td>9</td> </tr> <tr> <td>Anwendbarkeit</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>Materialverbrauch</td> <td>8</td> </tr> <tr> <td>Kraftgröße</td> <td>9</td> </tr> <tr> <td>Frequenz</td> <td>3</td> </tr> </tbody> </table>						Kriterium	Wert	Innovationsgehalt	9	Anwendbarkeit	5	Materialverbrauch	8	Kraftgröße	9	Frequenz	3
Kriterium	Wert																
Innovationsgehalt	9																
Anwendbarkeit	5																
Materialverbrauch	8																
Kraftgröße	9																
Frequenz	3																

Tabelle 4: Potentialabschätzung „Piezoelektrisches Türsystem“ [Institut für Architekturtechnologie (IAT), TU Graz]

ImpCon_S- Nm-T- Payload_12	Piezelektrisches Türsystem	6,4
---	-----------------------------------	------------



Einwirkung	Frequenz	Kraftgröße	Material- verbrauch	Anwend- barkeit	Innovations- gehalt
Windlast	1	4	8	6	2



5.1.1. Textil-Fassade mit piezoelektrischen Bändern

Das Konzept „Textil-Fassade mit piezoelektrischen Bändern“ basiert auf der Idee, Fassadentextile an einer Fassade zu befestigen und Textilbänder (Zugband) in den jeweiligen Befestigungspunkten piezoelektrisch (z.B. als Piezo-Textil-Band) zu gestalten. Durch Wind und Regen sind diese Textilie starken Schwingungen ausgesetzt. Dies führt zu Zugspannungen und Dehnungen und zu Energieerzeugung durch den piezoelektrischen Effekt.

Je nach Ausführung und Einsatzgebiet kann das System im Neubau oder bei der Sanierung von Bestandsgebäuden, als konstruktiver Bestandteil der thermischen Hülle oder als eigenständige, vorgesezte Konstruktion eingesetzt werden. In Form einer Doppelfassade kann das System neben der Energiegewinnung auch typologisch gesehen, Zwischen- und Nutzräume zwischen der tragenden Ebene (Primärstruktur des Gebäudes) und der Außenhülle (Membranfassade) schaffen und als Wetterschutz- und Beschattungselement dienen.

Einwirkung

Grundsätzlich weisen Textilien orthotrope, nichtlineare Materialeigenschaften auf. Sie besitzen geringe Dehn- und Biegesteifigkeiten wodurch bereits bei geringen Kräften große Dehnungen entstehen. Zur Simulation von Windströmungen an Gebäuden mit dem Programm Dlubal RWIND wurden die Höchstwerte (Basisgeschwindigkeit Graz 20,4 m/s) herangezogen. Um die Geschwindigkeitsverteilung in Abhängigkeit der Höhe zu simulieren, wurde die logarithmische Verteilung

$$v_2(h_2) = v_1 \frac{\ln\left(\frac{h_2}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_1}{z_0}\right)},$$

mit der aus der Bemessungsgeschwindigkeit resultierenden Bezugshöhe von 10m und einer Rauigkeitslänge für den innerstädtischen Bereich gewählt. Diese erzeugen auf der windzugewandten Seite eine Druckkraft von bis zu 420 N/m². Der Winddruck verteilt sich ungleichmäßig und zeigt am oberen Ende der Fassade den Höchstwert (siehe Abbildung 27). Dies zeigt das Strömungsverhalten in einem Gebäudecluster bei Höchstwerten. In der Realität wird die Bemessungsgeschwindigkeit aber selten erreicht.

Zur ergänzenden Ermittlung von Durchschnittswerten bei normalen Windbedingungen ergibt sich aus dem Energiesatz von Bernoulli und der verwendeten Gleichung

$$q = \frac{1}{2} \rho v^2$$

bei einer durchschnittlichen Windgeschwindigkeit von 2 m/s sowie einer durchschnittlichen Böen-Geschwindigkeit von 14,4 m/s und einer durchschnittlichen Dichte von $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$ ein durchschnittlicher Geschwindigkeitsdruck von 2,5 N/m² und ein durchschnittlicher Geschwindigkeitsdruck bei Sturmböen von 129,6 N/m².

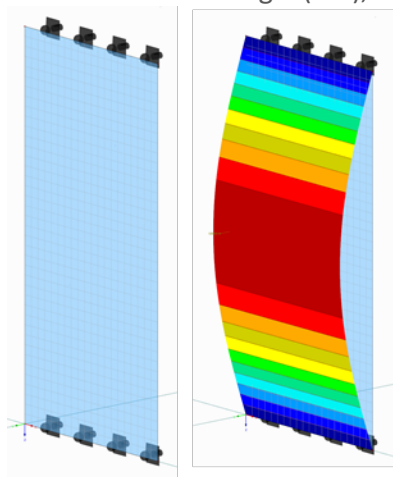
Zudem ist mit einer Einwirkung durch Regen zu rechnen. In Summe sind somit die Einwirkungen Winddruck, Windsog und Regenimpulse vorhanden. Infolge der Überlagerung von Wind und Regen werden hohe Frequenzen angenommen.

Abbildung 27: Simulationsergebnisse auf Dlubal RWind. Links die Geschwindichkeitsverteilung (in m/s) und rechts die daraus resultierenden Kräfte (in N/m²) [Institut für Architekturtechnologie (IAT), TU Graz]



Wie eine erste vereinfachte Modalanalyse eines Textils zeigte, bewegen sich die Eigenfrequenzen im Bereich von 33 bis 57 Hz. Dies bedeutet, dass für eine Anregung im Resonanzbereich sehr hohe Einwirkungsfrequenzen erforderlich sind. Betrachtet wurde hierbei die erste Eigenform mit zwei unterschiedlichen Materialmodellen (siehe Abbildung 28).

Abbildung 28: Modalanalyse Modell (li) und 1. Eigenform (re) [Institut für Architekturtechnologie (IAT), TU Graz]



Im nachfolgenden Schritt wurde eine Modalanalyse eines Fassadentextils mit entsprechenden Materialparametern durchgeführt, um die Eigenfrequenzen einer „Textil-Fassade mit piezoelektrischen Bändern“ abschätzen zu können. Wie diese Simulation anhand drei unterschiedlicher Materialmodelle gezeigt hat, weist die angestrebte Fassadenkonstruktion Eigenfrequenzen im Bereich von 2 bis 10,9 Hz auf (siehe nachfolgende Tabellen).

Tabelle 5: Materialparameter Gewebe und Gestrick [Achim Vohrer: Experimentelle Analyse und Simulation der Verformung luftgefüllter textiler Hüllen, Institut für Textil- und Verfahrenstechnik, Denkendorf 2012]

		Elastizitätsmodul N/mm ²	Querkontraktionszahl	Schubmodul N/mm ²	Materialparameter (nach Vohrer 2012)
Gewebe	Materialmodell am Materialpunkt	3000	0,4	-	1
	Strukturbezogenes Materialmodell	650	0,1	90	2
Gestrick	Materialmodell am Materialpunkt	3000	0,4	-	1
	Strukturbezogenes Materialmodell	120	0,5	20	3

Tabelle 6: Ergebnisse der 3 Materialparameter [Institut für Architekturtechnologie (IAT), TU Graz]

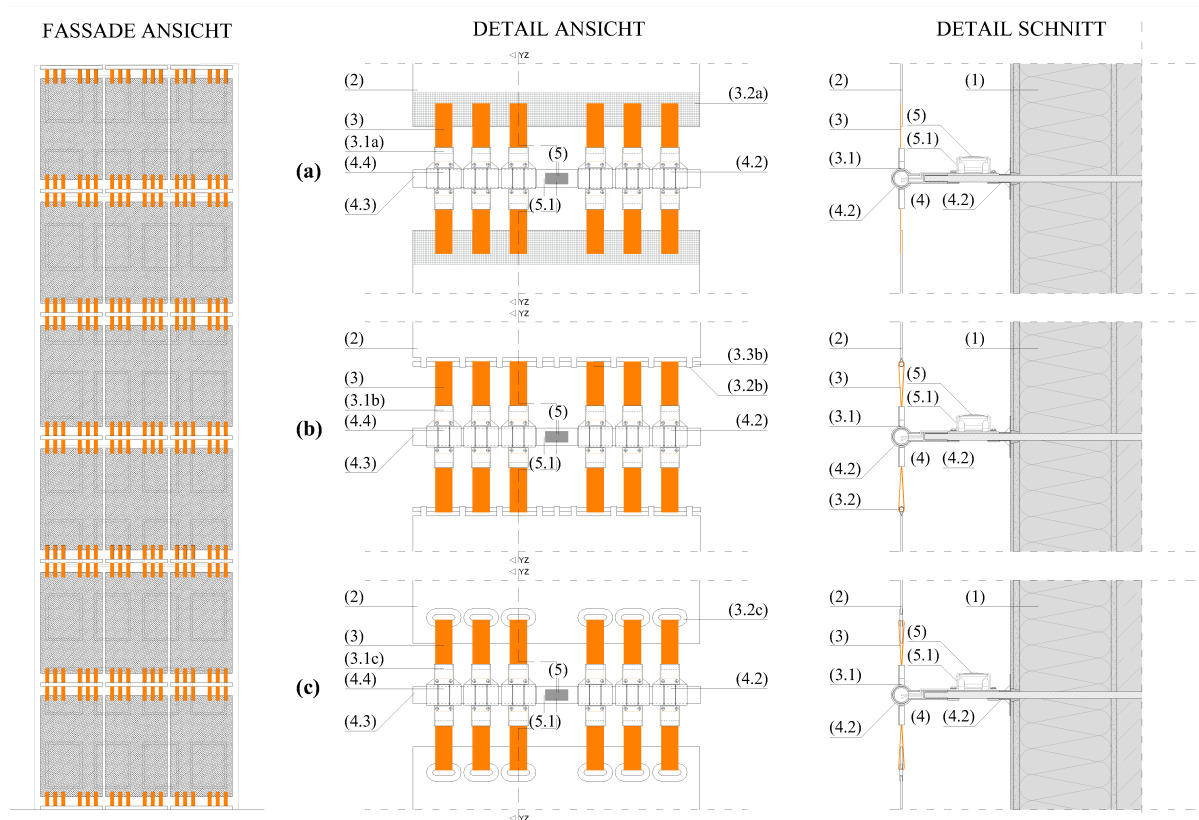
Eigenform für unterschiedliche Materialparameter (Eigengewicht)			
Materialparameter (nach Vohrer 2012)	Eigenkreisfrequenz rad/s	Eigenfrequenz Hz	Eigenperiode s
1	68,5	10,9	0,092
2	29,4	4,67	0,214
3	14,5	2,31	0,433

Durch die geringe Biege- und Dehnsteifigkeit sowie der Lagerung der Fassadentextile wird angenommen, dass die Anregerfrequenzen die Eigenfrequenzen der Konstruktion überschreiten oder zumindest erreichen müssen, was zu einem Schwingen der Textile führt.

Konstruktiver Aufbau

Die baulichen Komponenten des Fassadensystems (siehe Abbildung 29) sind neben der thermischen Gebäudehülle (1), z.B. bestehend aus einer Gebäudehülle in Massiv- oder Skelettbauweise mit Wärmedämmung, die Fassadentextile (2) mit Piezotextilbändern (3), eine entsprechende Unterkonstruktion (4) und aktive Sensoren (5, 5.1). Je nach Ausbildung des Systems und Anwendungsbereich ist die Fassade im Neubau oder in der Sanierung, als Komponente der thermischen Hülle oder als vorgesetzte Variante (Beispielsweise als konstruktiver Sonnenschutz) vorstellbar.

Abbildung 29: Textil-Fassade mit piezoelektrischen Bändern [Institut für Architekturtechnologie (IAT), TU Graz]



Die Unterkonstruktion besteht aus punktförmig angeordneten, auskragenden Befestigungsankern (4.1), die akustisch entkoppelt mit der Gebäudehülle (Primärstruktur) verbunden sind. Auf diese Anker werden T-förmige Stahlverbinder (4.2) geschraubt, an denen wiederum horizontale Stahlformrohre (4.3) mittels Schellen befestigt werden. Diese dienen einerseits zur Führung der Stromkabel (5.1) für die Stromversorgung der Sensoren (5) und andererseits zur Befestigung der Piezotextilbänder (3). Dazu werden auf die Stahlformrohre (4.3) als Scharniere ausgebildete und damit drehbare Stiftgelenke (4.4) aufgebracht, an denen die Piezotextilbänder (3) mit einer Klettverbindung (3.1a) oder mittels Klemmleisten (3.1b, 3.1c) kraftschlüssig befestigt werden. Durch die Ausführung der Bolzenverbindungen (4.4) als drehbare Verbindung können auf die Textilien einwirkende Kräfte aufgenommen werden und die Belastung in den Piezotextilbändern wird im Hinblick auf eine möglichst hohe Zugbelastung gefördert sowie Längsdehnungen und Knicken an der Klemmstelle vermieden. Darüber hinaus erfolgt die elektrische Kontaktierung (Innen- und Außenpol) der Piezotextilbänder (3) an den Zapfenverbindungen (4.4).

Das Fassadentextil (2) als Bauteil besteht z.B. aus Polyestergerewebe mit einer Kunststoffbeschichtung oder Glasgewebe mit einer PTFE-Beschichtung (Teflon) und somit UV-stabil, witterungsbeständig und schwerentflammbar (nach DIN 4102 B1). Neben der Aufnahme der Windeinwirkung dienen diese Membranen als Witterungsschutz und Verschattungselement und schützen damit vor sommerlicher Überhitzung.

Zur Verbindung mit den Piezo-Textilbändern (3) ist das Textil an zwei gegenüberliegenden Enden mit ovalen Ösen (3.2c), Textilschlaufen (3.2b) oder mit einer klettfähigen Haken-/Pilzkopffläche (3.2a) versehen. Durch die ovalen Ösen können die piezotextilen Bänder (3) direkt in Form einer Schlaufe geführt werden. In die Fassadentextilschlaufen wird zunächst ein weiteres Stahlformrohr (3.3b) als Zwischenelement eingesetzt, um das die Piezotextilbänder (3) dann als Schlaufe geführt werden. Die Ausführung ist abhängig von der Anzahl der gewünschten bzw. erforderlichen Piezobänder pro Fassadentextil, bezogen auf den konstruktiv erforderlichen Abstand der Ovalösen wie auch auf den Energieertrag. Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass ein zu kleiner Schlaufenradius zu erhöhtem Verschleiß und einer kürzeren Lebensdauer der Piezotextilbänder (3) führen wird.

Ist das Textil mit einer klettfähigen Haken-/Pilzkopfoberfläche versehen, können Piezobänder mit Klett durch Aufdrücken direkt mit dem Textil verbunden werden. Damit entfällt das Problem des kleinen Schleifenradius, was zu einer längeren Lebensdauer der Bänder führen wird. Darüber hinaus ist eine einfachere Installation und eine einfache Nach- oder Umrüstung von Piezobändern möglich. Zum Beispiel, wenn zusätzliche oder anders positionierte Sensoren benötigt werden.

Der Abstand zwischen den Textilien und der thermischen Gebäudehülle bzw. dem dahinterliegenden Aufbau (z.B. Primärstruktur bzw. thermischen Hülle), ist in Abhängigkeit der Dehneigenschaft des Textils und der notwendigen Verformung zur Energieerzeugung zu wählen. Demnach ist der Zwischenraum (die Hinterlüftungsebene) ein Bestandteil der planenden Parameter im Zusammenhang der Fassaden-Konstruktion.

Grundsätzlich sind pro Fassadentextil-Ende sechs piezoelektrische Textilbänder (30 cm x 3 cm) angedacht, wobei 12 Bänder (zwei gegenüberliegende Fassadentextil-Enden) eine *NETBEE*-Sensorschnittstelle (5) und potenzielle Sensoren (5.1) an der Schnittstelle oder an der Fassadenfront versorgen. Diese werden hinter den Fassadentextilien direkt am Befestigungsanker (4.1) mit Hülsen montiert. Durch die Bildung von Befestigungspunkten rund um die Gebäudeöffnungen können neben den außen angebrachten Sensoren auch die innen angebrachten Sensoren mit Energie versorgt werden. Unter anderem sind auch die Verlegung und Bündelung der Sensoren durch die Rasterung der Fassade flexibel. Die möglichen Daten umfassen Klimadaten und Bauteildaten.

Eine mögliche Variation stellen Textilien auf Dächern dar, welche beispielsweise an der Attika befestigt und schräg oder (leicht vorgespannt) horizontal abgespannt, oder über die Attikafläche verlaufend ausgeführt werden. Weiters wäre denkbar, ausklappbare Fassadenelemente (s.g. Segel), welche sich nach dem Wind ausrichten und als gezielte Verschattung und Energieversorgung der Sensorik dienen, auszuführen. Die Ausrichtung sowie Verschattung könnten gesteuert werden (intelligente Gebäude).

Piezotechnologie

Bei der vorrangig angedachten Piezotechnologie handelt es sich um Textilbänder, die in dem in der Einleitung erwähnten vorausgehenden Forschungsprojekt u.a. von Anja Lund entwickelt und, mit ihr gemeinsam, in vorliegendem Projekt weiter untersucht wurden. Diese Bänder werden mittels Schlaufenbildung, Klettverbindung oder Klemmen in das Fassadensystem integriert.

Weitere potentielle Möglichkeiten der Integration von Piezotechnologien werden im Rahmen der laufenden Dissertation („Energy to Envelope, Gebäudehülle als autarke Sensortechnologie“) von Toni Levak (stellv. Projektleiter dieses Projektes) untersucht und erforscht.

Im Rahmen des Projektes wurden unter Anleitung von Anja Lund am RI.SE (Research Institutes of Sweden) 3 cm breite und 1 mm dicke piezoelektrische Textilbänder in verschiedenen Längen angefertigt. Die Bänder wurden in industriellen Bandwebmaschinen gewebt und bestehen aus piezoelektrischen Fäden und einem leitenden Garn. Hierzu wurden in einem ersten Schritt Fäden schmelzgesponnen, welche aus piezoelektrischen Mikrofasern bestehen. Diese piezoelektrischen Faserfilamente bestehen wiederum aus einem leitfähigen Kern, der in Kettrichtung (Längsrichtung der Fäden) von einer β -Phasen-Poly(vinyliden-fluorid) (PVDF)-Hülle umgeben ist. Das leitende Garn fungiert als äußere Elektrode. Die innere Elektrode ist vollständig von der äußeren Elektrode abgeschirmt. Zur Energieableitung sind die Faserenden der piezoelektrischen Fasern (der Innen-Pol) von der Umhüllung befreit und mit einer Silberpaste verbunden. Als zusätzlicher Schutz und Kontaktstelle wurde hier zudem eine Kupferfolie aufgebracht. Der aus der Außenelektrode bestehende Gegenpol (das leitende Garn) kann an jeder beliebigen Stelle des Textils abgegriffen werden.

Versuche „Piezotextil-Band“

In weiterer Folge werden ausgewählte Versuchsergebnisse der am *Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI)* durchgeführten Versuche (Aufbau siehe Kapitel „Projekthalt“) dargestellt. Aus Gründen der Geheimhaltung wird der Prüfbericht nicht veröffentlicht.

Piezotextil-Band als einzeln geführtes Band

In einem Einzelversuch wurde die Zugfestigkeit des Piezo-Textilbandes ermittelt. Dabei wurde eine maximale Längs-Zugkraft von 1,3 kN über einen 30 mm breiten Textilstreifen gemessen. Die Längs-Zugfestigkeit des Textilbandes ergibt 42 N/mm.

Das beste Ergebnis im Kontext des Energieertrages wurde bei einem dynamischen Zugversuch der Piezo-Textilbänder (Einspannlänge 153 mm, Klemmlänge 124 mm) ohne Lastwiderstand (0 Ohm) bei einer Längenänderung von von 10 mm ($\varepsilon = 8\%$) und einer Frequenz von 1 Hz gemessen. Es ergibt sich mit einem vorgeschalteten Widerstand von 910 k Ω ein elektrischer Strom von 0,79 μ A bei einer Effektivspannung von 1,58 V. Dies ergibt eine elektrische Leistung von 1,25 μ W was über einen Zeitraum von einem Tag (86400 s) eine Energie von 0,108 Ws bzw. J ergibt. Mit den ermittelten Werten wäre bei einem Band eine Messung in 13,9 Tagen oder eine Übertragung in rund 1389 Tagen bei minimaler Messdauer möglich.

Aufgrund der grundlegenden elektrotechnischen Eigenschaften sollten zudem mehrere Textilien in Reihe geschaltet werden, um so die inneren Widerstände in den Textilien möglichst gering zu halten. Dies zeigen auch diese grundlegenden Formelzusammenhänge:

$$R_{ges,Serie} = \sum_{i=1}^n R_i; \frac{1}{R_{ges,Serie}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i} \Rightarrow R_{ges,Parallel} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}}$$

vereinfacht für gleiche Widerstände bei gleichen Bandlängen ergibt sich:

$$R_{ges,Parallel} \Omega = \frac{R \Omega}{N} \text{ für } N - \text{Bänder}$$

Der Gesamtwiderstand ist bei Parallelschaltungen immer geringer als der kleinste Einzelwiderstand der Schaltung, was sich sehr vorteilhaft auf die elektrotechnische Konstruktion auswirkt.

Zudem bedeutet die Klemmung einen Verlust an piezoelektrischem Material, welches nicht gedehnt wird und somit keine Energie erzeugt. Dementsprechend ist dieser Bereich möglichst kurz auszuführen oder im Kontext von Fügetechnologie zu optimieren.

Piezotextil-Band als einzeln geführte Schlaufe

Bei den Schlaufen erzielte ein Versuch (Einspannlänge von 2x109 mm und Klemmlänge von 109 mm) mit einer Belastungsfrequenz von 3 Hz bei einer Längenänderung von 1 mm und einem Lastwiderstand von 2 M Ω die besten Messwerte. Mit einer Effektivspannung von 3,273 V errechnet sich daraus ein Strom von 1,63 μ A was eine elektrische Leistung von 5,354 μ W ergibt. Mit diesen Werten wird in 24 h bei gleichbleibender Belastung eine Energie von 0,462 J bzw. Ws gespeichert. Damit (0,462 J Ws über 24 Stunden gerechnet) wäre es theoretisch möglich, mit dem *NETBEE*-Modul 1 Messung in 3,25 Tagen oder eine Übertragung in rund 365 Tagen durchzuführen. Nicht berücksichtigt sind hierbei beispielsweise die minimale, aber vorhandene Selbstentladung des Akkus wie auch Verluste innerhalb der Ladeelektronik.

Infolge des doppelten Klemmens der Kontaktstellen kam es vermehrt zu einem Schlupf des Textils bei Belastungsspitzen. Diese Stelle ist konstruktiv besonders zu beachten und eventuell auch zusätzlich, zum Beispiel durch Verschraubungen, zu verstärken.

Piezotextil-Band als parallel geführte Schlaufen

Ein für diesen Bericht ausgewählter Versuch, eine dynamische Belastung von zwei parallel geschalteten Bändern (Länge 300 mm), führte bei einer Belastungsfrequenz von 9 Hz und einer Längenänderung von 1 mm zu einem berechneten Strom von 6,951 μ A und einer elektrischen Leistung von 43,965 μ W bei einer effektiven Spannung von 4,88 V, gemessen über 2 Sekunden. Daraus ergibt sich eine elektrische Energie von 87,93 Mikrojoule oder $0,879 * 10^{-4}$ Ws und, über 24 Stunden gerechnet, eine Energieerzeugung von 7,6 J Ws. Mit diesen errechneten Werten wäre es somit möglich 5 Messungen innerhalb von 24h oder eine Übertragung in rund 20 Tagen durchzuführen.

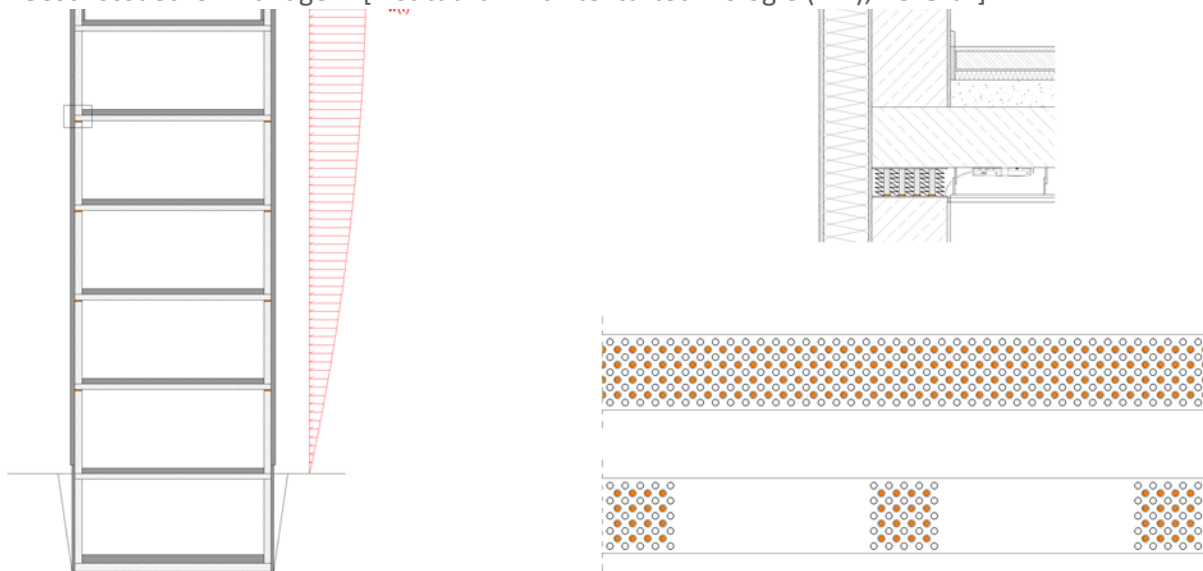
Im oben dargestellten Konzept „Textil-Fassade mit piezoelektrischen Bändern“ sind je *NETBEE*-Modul 12 parallelgeschaltete Piezo-Textil-Bänder angedacht. Über 24 h wäre es hierbei theoretisch möglich, 1 Messung in 0,5 h oder eine Übertragung in 1,6 Tagen durchzuführen. Hierbei ist zudem anzumerken, dass angenommen wird, dass sich bei diesem Aufbau (aufgrund der Parallelschaltung) der Gesamtwiderstand zusätzlich verringern würde, was die Effizienz des Systems noch weiter erhöhen könnte.

Zudem ist zu erwähnen, dass bei allen durchgeführten Versuchen die Parallelschaltung signifikant bessere Werte erreichte. Somit sollten alle Konzepte mit parallelgeschalteten Piezo-Harvestern ausgestattet werden, um effizienter zu werden.

5.1.2. Piezoelektrisches Geschosdecken-Auflager

Das vorliegende Konzept beschreibt ein konstruktives System, bei welchem die Auflager der Deckenplatten einzelner Geschosse piezoelektrisch ausgeführt sind. Infolge von Windeinwirkungen kommt es zu Gebäudeschwankungen und Kippbewegungen. Auf der windabgewandten Seite wirken Druckimpulse auf die piezoelektrischen Auflager, welche diese aufnehmen und in elektrische Spannungen umwandeln. Derselbe Effekt zeigt sich beim Nachlassen der Einwirkung auf der windzugewandten Seite. Zudem ist anzunehmen, dass ein Auspendeln des Gebäudes zu weiteren Druckimpulsen führt.

Abbildung 30: Schematische Darstellung der Anwendung von piezoelektrischen Geschosdecken-Auflagern [Institut für Architekturtechnologie (IAT), TU Graz]



Da bei diesem Ansatz viele konstruktive Abhängigkeiten bestehen, aber auch die aktuelle Baupraxis (schnelle statische Ableitung auftretender Einwirkungen) hinterfragt wird, wird angenommen, dass dieses System nur beim Neubau und nach umfassender weiterer Forschung, wie auch der Abschätzung von Gefahrensituationen, zum Einsatz kommen kann. Das Konzept wurde trotz dieser Abhängigkeiten entwickelt, da im Widerspruch zur aktuellen Baupraxis hoher Innovationsgehalt und Potential für neue Denkansätze besteht.

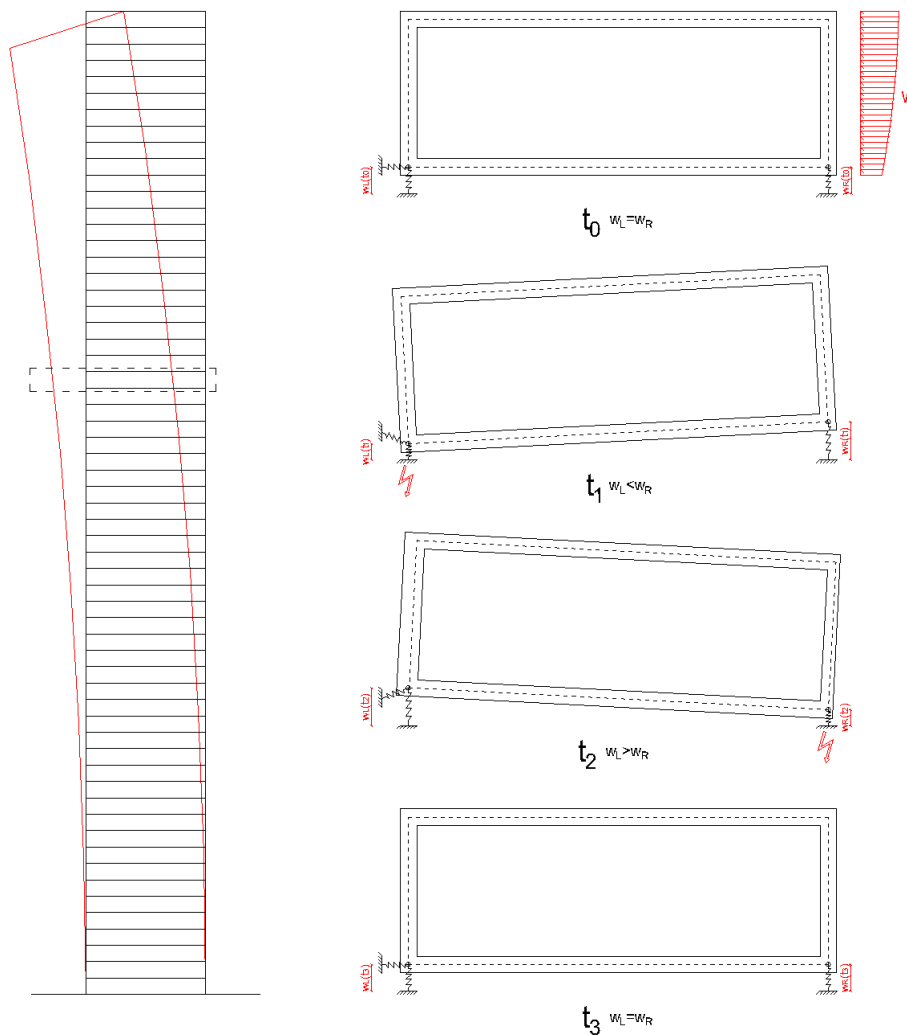
Einwirkung

Als primäre Einwirkung wird in diesem Konzept Wind angedacht. Je nach konstruktiver Ausbildung und klimatischer Einwirkungen (Standort, Gebäudeorientierung) können die Schwingfrequenzen stark variieren und infolge der Baumasse sehr hohe Drucklasten auftreten.

Wie die nachfolgende Abbildung zeigt, kommt es durch eine äußere horizontale Belastung (Windkraft) zu einem Schwingen eines hohen Gebäudes (t_0). Durch diese Belastung kommt es zu einer außermittigen Lastverteilung des Gebäudes und eine Seite, in diesem Beispiel die linke, wird auf Druck belastet (t_1). An dieser Gebäudeseite werden die Piezoscheiben aktiviert. Durch ein zurückschwingen des Gebäudes kommt es zu einem erneuten Lastwechsel. Nun bewirkt der zurückschwingende Impuls eine erhöhte Druckkraft auf der rechten Seite (t_2). Solange kein weiterer

Impuls auftritt wird dieses Schwingenspiel wiederholt bis das System wieder in den Ausgangszustand (t_3) übergeht (ähnlich einer Einmassen-Schwingung mit Dämpfung).

Abbildung 31: Prinzipskizze zur Nutzung windinduzierten Gebäudeschwingung. [Institut für Architekturtechnologie (IAT), TU Graz]

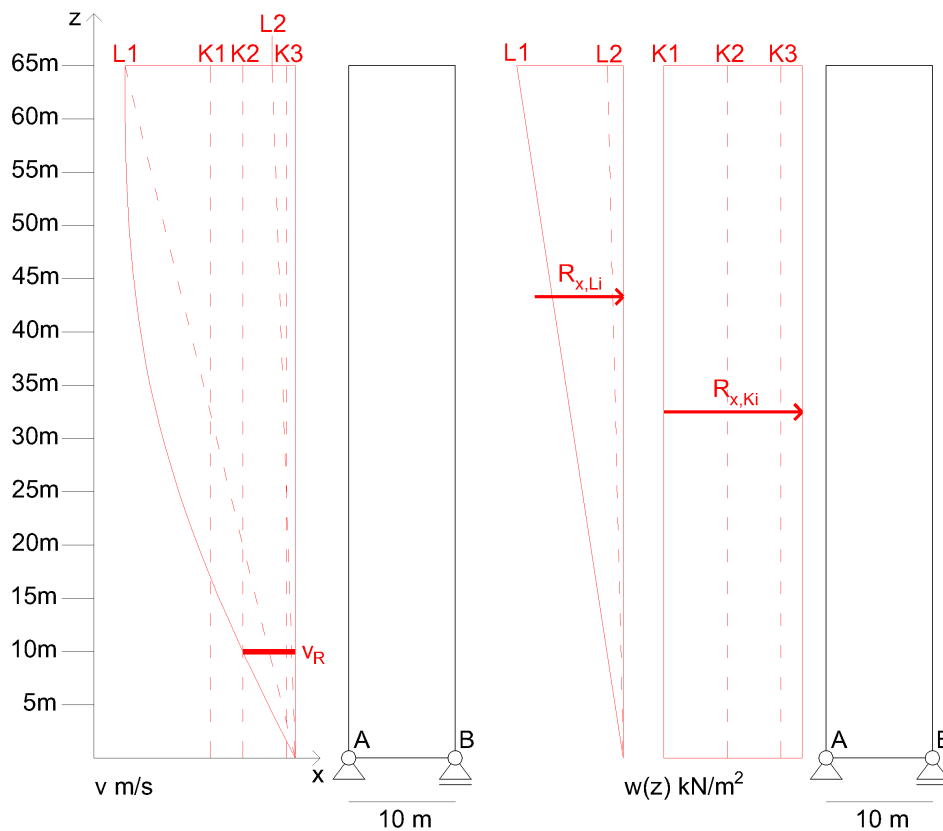


Um die einwirkenden Kräfte, infolge einer zusätzlichen Windbelastung, in den Auflagern abschätzen zu können, wird im Folgenden ein Hochhaus mit einer Höhe von 65 m und einer Breite von 10 m und einer Länge von 20 m betrachtet. Die einwirkende Windbelastung wird einmal mit der Bemessungsgeschwindigkeit für den Standort Graz ($v_R = 20,4 \text{ m/s}$) und der durchschnittlichen Windgeschwindigkeit von 2 m/s ermittelt. Eine weitere Vereinfachung bezieht sich auf die Verteilung der Windgeschwindigkeit und damit der Windbelastung. Die logarithmische Verteilung wird zum einen gemittelt und im zweiten Fall linear angenähert. Damit ergeben sich die folgenden Betrachtungsfälle K1, K2, K3, L1 und L2 (siehe nachfolgende Abbildung).

Für die Ermittlung der Windspitzen und Windgeschwindigkeiten wurde weiterhin das logarithmische Modell verwendet:

$$v_2(h_2) = v_1 \frac{\ln\left(\frac{h_2}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_1}{z_0}\right)}$$

Abbildung 32: Prinzipskizze zur Berechnung der unterschiedlichen Windbelastungen. [Institut für Architekturtechnologie (IAT), TU Graz]



Die Kräfte K1 bis L2 wurden jeweils über die Formel $w = c * p * v^2$ berechnet. Anschließend wird das Momentengleichgewicht um den Auflagerpunkt A wie folgt gebildet:

$$\sum M_A = 0 \rightarrow \int_{h_1}^{h_2} w(z) dz * h_z - \Delta B_z * b = 0$$

Daraus ergeben sich in der ersten Annahme einer konstanten Verteilung der Windgeschwindigkeiten (K1, K2, K3) und Druckverteilung die resultierenden Gesamtbelastungen in x-Richtung zu:

$$R_{x,K1} = 75,21 \frac{kN}{m}$$

$$R_{x,K2} = 32,5 \frac{kN}{m}$$

$$R_{x,K3} = 0,312 \frac{kN}{m}$$

Dabei bezieht sich $R_{x,K1}$ auf den Mittelwert aus der logarithmischen Verteilung über die Höhe des betrachteten Modells. Aus dem Momentengleichgewicht um A folgen die aus der Windbelastung resultierenden zusätzlichen Druckbelastungen im Auflager B zu:

$$\Delta B_{z,K1} = 244,43 \frac{kN}{m}$$

$$\Delta B_{z,K2} = 105,625 \frac{kN}{m}$$

$$\Delta B_{z,K3} = 1,014 \frac{kN}{m}$$

Unter der Annahme einer linearen Verteilung der Geschwindigkeit (L1, L2) ergeben sich die resultierenden Belastungen in x-Richtung zu:

$$R_{x,L1} = 58,695 \frac{kN}{m}$$

$$R_{x,L2} = 0,51 \frac{kN}{m}$$

Daraus lassen sich über das Momentengleichgewicht um A erneut die Änderungen der Auflagerkraft in B ermitteln:

$$\Delta B_{z,L1} = 254,35 \frac{kN}{m}$$

$$\Delta B_{z,L2} = 2,21 \frac{kN}{m}$$

Unter der Annahme einer 30 cm breiten Auflagerfläche kommt es zu folgenden Druckspannungen über eine Länge von 20 m ($A = 6 \text{ m}^2$):

$$\Delta \sigma_{K1} = 814,76 \frac{kN}{m^2} = 0,815 \frac{N}{mm^2}$$

$$\Delta \sigma_{K2} = 352,08 \frac{kN}{m^2} = 0,352 \frac{N}{mm^2}$$

$$\Delta \sigma_{K3} = 3,38 \frac{kN}{m^2} = 0,003 \frac{N}{mm^2}$$

$$\Delta \sigma_{L1} = 847,83 \frac{kN}{m^2} = 0,848 \frac{N}{mm^2}$$

$$\Delta \sigma_{L2} = 7,37 \frac{kN}{m^2} = 0,007 \frac{N}{mm^2}$$

Diese überschlägigen Berechnungen zeigen, dass bei Sturmsituationen mit einer Druckspannung von bis zu $0,85 \text{ N/mm}^2$ gerechnet werden kann. Selbst bei sehr geringen Windbelastungen können bis zu $0,003 \text{ N/mm}^2$ am untersten Auflager möglich sein. Dies zeigt das generell mit Druckdifferenzen in den Auflagern zu rechnen ist und dadurch eine Anwendung von Piezoelementen, welche frequent betrieben werden, prinzipiell möglich ist. Ausschlaggebend hierfür ist vor allem die einwirkende (Wind-) Frequenz.

Konstruktiver Aufbau

Das Konzept geht von einem Hochhaus aus, welches als Röhrensystem oder mittels Kopfriegel-System ausgebildet ist. Demzufolge sind die Außenwände und die Verbindungen zwischen den Wänden schubsteif ausgeführt (Röhrensystem). Oder es sind die obersten Geschosse ausgesteift und über eine Scherwand mit dem Fundament verbunden (Kopfriegel-System).¹⁰⁶ In jedem Geschoss sind zudem zwischen Geschossdecke und darunter liegender Außenwand Piezo-Elemente angeordnet. Infolge einer seitlichen Belastung kommt es zu den oben beschriebenen Druckkräften in den Piezo-Elementen.

Die Sensorenschnittstelle *NETBEE*, Sensoren und Leitungen können bei diesem Konzept beispielsweise in abgehängten Decken aber auch im Außenbereich positioniert werden. Es können somit Klimadaten und Bauteildaten erfasst werden.

Grundsätzlich ist bei diesem Konzept zu beachten, dass keine Beeinträchtigung der Nutzung des Gebäudes und keine Beschädigungen der Konstruktion entstehen. Die Bewegungen sollen somit ausreichend Druck und damit Energie erzeugen, gleichzeitig, aber so gering wie möglich sein. Zudem wären in weiterer Folge ein Kriechen und ein dauerhaftes Absetzen der Deckenplatte zu beachten.

Als Variante könnte das Konzept unter Industriemaschinen oder in Böden/Auflagern für Industriemaschinen zum Einsatz kommen. Im Kontext von Frequenz muss hierbei bedacht werden, dass diese nur dann auftreten würde, wenn die Maschinen im Einsatz sind.

Piezotechnologie

Die primär angedachten Piezoprodukte beschränken sich auf druckbelastbare Aktoren und/oder Piezo-Scheiben. Im Kontext einer Weiterentwicklung könnte aber auch angedacht werden, diese als „piezoelektrische Elastomere“ auszubilden.

Piezoscheiben werden aus piezoelektrischen Keramiken hergestellt und reagieren auf eine Druckbelastung mit einem messbaren Spannungsausgang. Je nach Einsatzgebiet werden diese Scheiben aus ferroelektrisch weichem (Sensorik, Aktorik, Luftultraschall) oder hartem (Sonar, Leistungsschall) Piezomaterial hergestellt. Die Abmessungen, Kontaktierung, elektrischen Anschlüsse, Polarität können individuell auf die jeweilige Anwendung angepasst werden.¹⁰⁷ Die meisten heute hergestellten Piezokeramiken werden auf Basis von Blei-Zirkonat-Titanat (PZT) hergestellt und gelten als besonders effizient.¹⁰⁸

Die Piezoscheibe, welche in diesem Konzept angedacht und im Projekt getestet wurde, ist die *Piezoelektrische Scheibe* von *PI Ceramic GmbH* und gehört zur Klasse der ferroelektrischen harten PZT-Materialien. Diese können hohen elektrischen und mechanischen Belastungen standhalten. Im Fall des getesteten Materials liegt die Druckfestigkeit bei >600 MPa (600 N/mm²).¹⁰⁹

Versuche „Piezoelektrische Scheibe“

Wie die dynamischen Versuche zeigen, führen höhere Lasten zu höheren Spannungsspitzen. Allerdings war diese Zunahme nicht linear und nahmen mit höheren Lasten immer mehr ab.

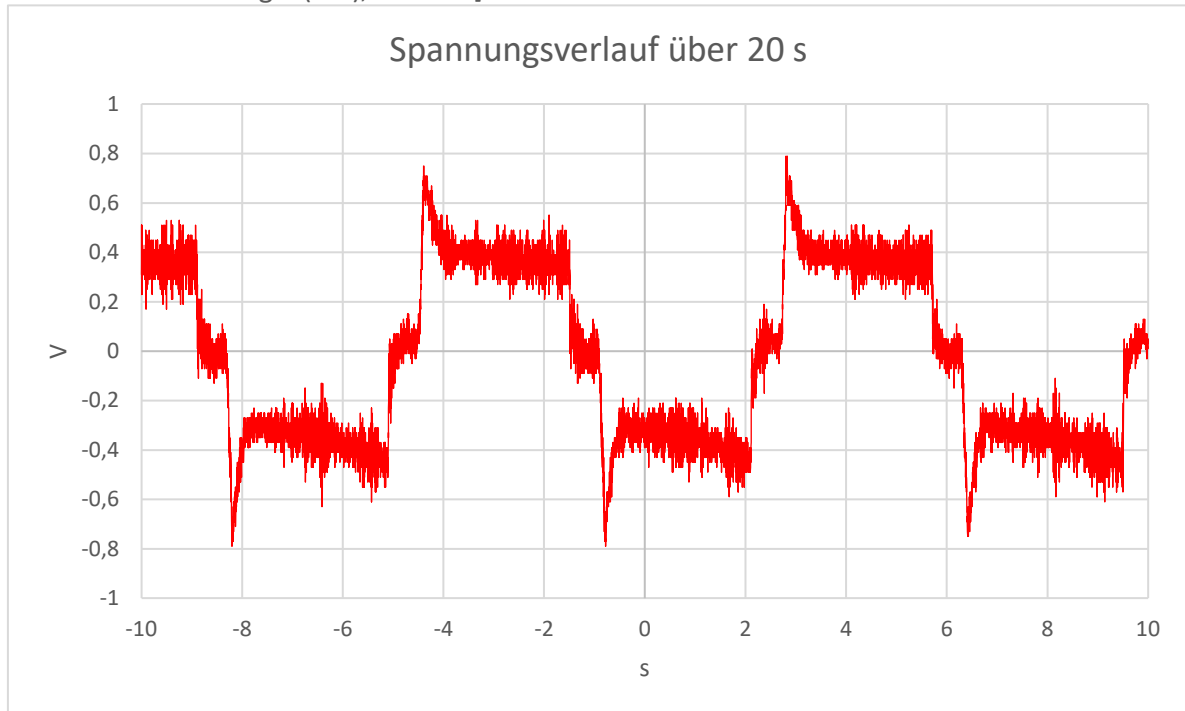
¹⁰⁶ Vgl. Engel 2009, 279.

¹⁰⁷ Vgl. PI Ceramic GmbH.

¹⁰⁸ Vgl. Mercadelli/Sanson/Galassi 2010, 118.

¹⁰⁹ Vgl. PI Ceramic GmbH.

Abbildung 33: Beispiel eines gemessenen Spannungsverlaufs [Institut für Architekturtechnologie (IAT), TU Graz]



In der obigen Abbildung ist der Spannungsverlauf gut zu sehen. Mit der Formel für die effektive Spannung für eine endliche Anzahl an Messwerten folgt:

$$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_n^2} \quad \text{für } n = 10000: \text{RMS} = 0,356 \text{ V}$$

Mit einem vorgeschalteten Widerstand von 1 k Ω folgt eine Stromstärke von 0,356 μA und einer elektrischen Leistung von 0,127 μW . Dies entspricht bei einer Dauer von 10 s einer elektrischen Energie von $1,3 \cdot 10^{-6}$ Ws beziehungsweise 1,27 μJ . Bei einer durchgehend gleichbleibenden Belastung würden so in 24 h 0,011 J beziehungsweise Ws erzeugt werden.

Ein Belastungstest, mit dem Ziel einer Zerstörung der Münze, wurde bei 70kN (184 N/mm²) beendet. Es kam zu keiner Zerstörung der Münze. Die gemessenen Spannungsverläufe wurden bei einem Belastungswechsel von 6 kN aufgezeichnet was einer Spannungsdifferenz von ungefähr 15,79 N/mm² entspricht.

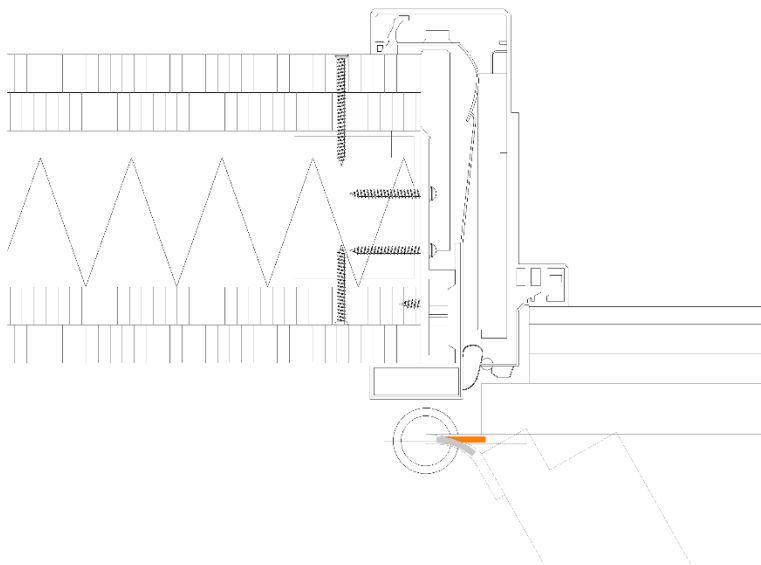
Mit der oben dargestellten aus den Messwerten errechneten Energie ist es möglich, mit dem *NETBEE* Modul eine Messung in \sim 136 Tagen oder eine Übertragung in rund 13.636 Tagen durchzuführen. Zudem ist anzumerken das aufgrund der Größe der Münzen in einem (linearen) Auflager beispielsweise 100 solcher Scheiben eingesetzt werden können. Dadurch könnte, bei Nutzung eines Auflagers eines Geschosses, ungefähr eine Messung pro Tag und eine Übertragung in rund 136 Tagen ermöglicht werden.

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass es einen optimalen Punkt und ein optimales Verhältnis zwischen Frequenz und Belastung geben muss. Zudem ist der Spannungsverlauf anders als bei den zuvor getesteten Objekten. Bei Aufbringen der Last steigt die Spannung rasant an, wird danach nicht sofort entlastet, fällt die Spannung langsam wieder ab und konvergiert gegen null. Bei einer Entlastung und erneuten Belastung springt die Spannung vom positiven Quadranten in den negativen. Die Werte sind allerdings betragsmäßig gleich. Dies ist wahrscheinlich auf die Umpolarisierung der Kristalle im inneren der Münze zurückzuführen. Für das Konzept bedeutet das, dass sich die Münzen gut in eine Primärstruktur einbauen lassen.

5.1.3. Piezoelektrisches Türsystem

Das Konzept „Piezoelektrisches Türsystem“ basiert auf der Idee, das Türblatt einer Drehflügeltür nicht mittels herkömmlicher Türbänder, sondern mit einem piezoelektrischen „Scharnier“ zu befestigen. Demzufolge wird bei jeder (höherfrequenten) Bedienung der Tür (Öffnen und Schließen) Energie erzeugt. Die potenzielle Anwendung betrifft neue oder nachgerüstete Türen und Innen- wie auch Außentüren.

Abbildung 34: Piezoelektrisches Türsystem [Institut für Architekturtechnologie (IAT), TU Graz]



Einwirkung

Die Einwirkung wird bei diesem Konzept durch die Nutzer*innen gebildet. Sobald diese die Tür manuell Öffnen und Schließen, oder ein automatisches Öffnen und Schließen aktivieren, kommt es zu einer Drehbewegung. Und infolge dieser Drehbewegung zu einer Dehnung im piezoelektrischen Material, wodurch, bei entsprechender Frequenz, Energie erzeugt wird. Grundsätzlich ist je nach Situation, Position der Tür in einem Gebäude und Nutzungsfrequenz, mit unterschiedlichen Frequenzen zu rechnen. Wobei betont werden muss, dass diese möglichst hoch sein sollten.

Konstruktiver Aufbau

Das Konzept besteht aus einem Türblatt und einem Türrahmen oder Türstock. Das Türband, welches zwischen Türblatt und Türrahmen angeordnet ist, ist als piezoelektrisches Element ausgeführt. Dieses

scheibenförmige Bauteil dient dazu, das Türblatt in Position zu halten und eine Drehbewegung und somit Öffnen der Tür zu ermöglichen, wobei bei jeder Drehung um einen Mindestradius das piezoelektrische Element gebogen wird und Energie erzeugt werden kann. Grundsätzlich muss zudem darauf geachtet werden, das Element durch zu große Biegeradien nicht zu beschädigen oder gar zu zerstören. Die Sensorik (*NETBEE* und angedockte Sensoren) werden am Türblatt oder am Türrahmen integriert und können (je nach Anwendungssituation) Klimadaten und Bauteildaten erfassen.

Piezotechnologie

Als piezoelektrisches Element wird bei diesem Konzept primär der *DuraAct Flächenwandler* von *PI Ceramic GmbH* angedacht. Diese Elemente erzeugen Energie bei einer dynamisch veränderlichen Biegung von beispielsweise 90° , wobei der erforderliche Winkel produktabhängig ist. Im Kontext des erforderlichen Biegewinkels sind die Befestigungspunkte nicht beweglich oder als Gelenk zu konstruieren, die Flächenwandler bilden das Gelenk.

Da das am Markt erhältliche Produkt nicht als Montagemittel gedacht ist, müsste das Element hierzu optimiert und entwickelt werden. Im Rahmen des Konzeptes wurde diesbezüglich angedacht, das Element vollständig zu ummanteln, wobei die Ummantelung die konstruktiven Lasten aufnimmt und auf den Flächenwandler nur eine Biegebeanspruchung übertragen wird.

Versuche „Duraact Flächenwandler“

Im Rahmen der Versuche mit dem Produkt P-876.A15 konnten Spannungsspitzen von 1-1.5 V erreicht werden. Damit ist dieses Produkt um ein Vielfaches effizienter als die dünneren Ausführungen (P-876.A11 und P-876.A12). Höhere Auslenkungen, also Biegeradien, führten ebenso zu besseren Ergebnissen.

Bei den Flächenwandlern wies ein Versuch mit dem Produkt P-876.A15 die besten Messwerte auf. Bei einer Auslenkung von 9 mm mit einer Frequenz von 1,333 Hz und einem vorgeschalteten Widerstand von $2\text{ M}\Omega$ wurde eine effektive Spannung von 1,377 V gemessen. Somit folgt eine Stromstärke von $0,688\ \mu\text{A}$ und damit eine elektrische Leistung von $1,48\ \mu\text{W}$. Die mögliche Energie welche in einem Tag gespeichert werden kann beträgt somit $0,128\ \text{Ws}$ bzw. J. Somit könnte eine Messung alle 11,8 Tage und eine Übertragung alle 1.172 Tage durchgeführt werden.

Wie festgestellt werden konnte, hängt der maximalen Spannungsausschlag von Frequenz und Biegeradius ab. Die dünneren Flächenwandler (P-876.A11 und P-876.A12) können im Gegensatz zu den dickeren (P-876.A15) größere Auslenkungen aufnehmen und sind elastischer. Die Ausführung ist somit an den Verwendungszweck anzupassen.

Wie die Versuche zudem zeigen, kommt es bei direkter Befestigung des Flächenwandlers mittels Klemmen schnell zu einem Verschleiß oder Beschädigungen des Produktes. Für eine dauerhafte Befestigung und den angedachten Einsatz als Scharnier, ist die Thematik der Befestigung besonders zu beachten.

Um die Effizienz des Systems weiter zu steigern, können Array-Systeme von *Pi-Ceramic*, also eine Parallelschaltung mehrerer Flächenwandler angewandt werden. Hierbei ist es denkbar, dass Tür-Scharnier über die gesamte Höhe des Türblatts auszubilden.

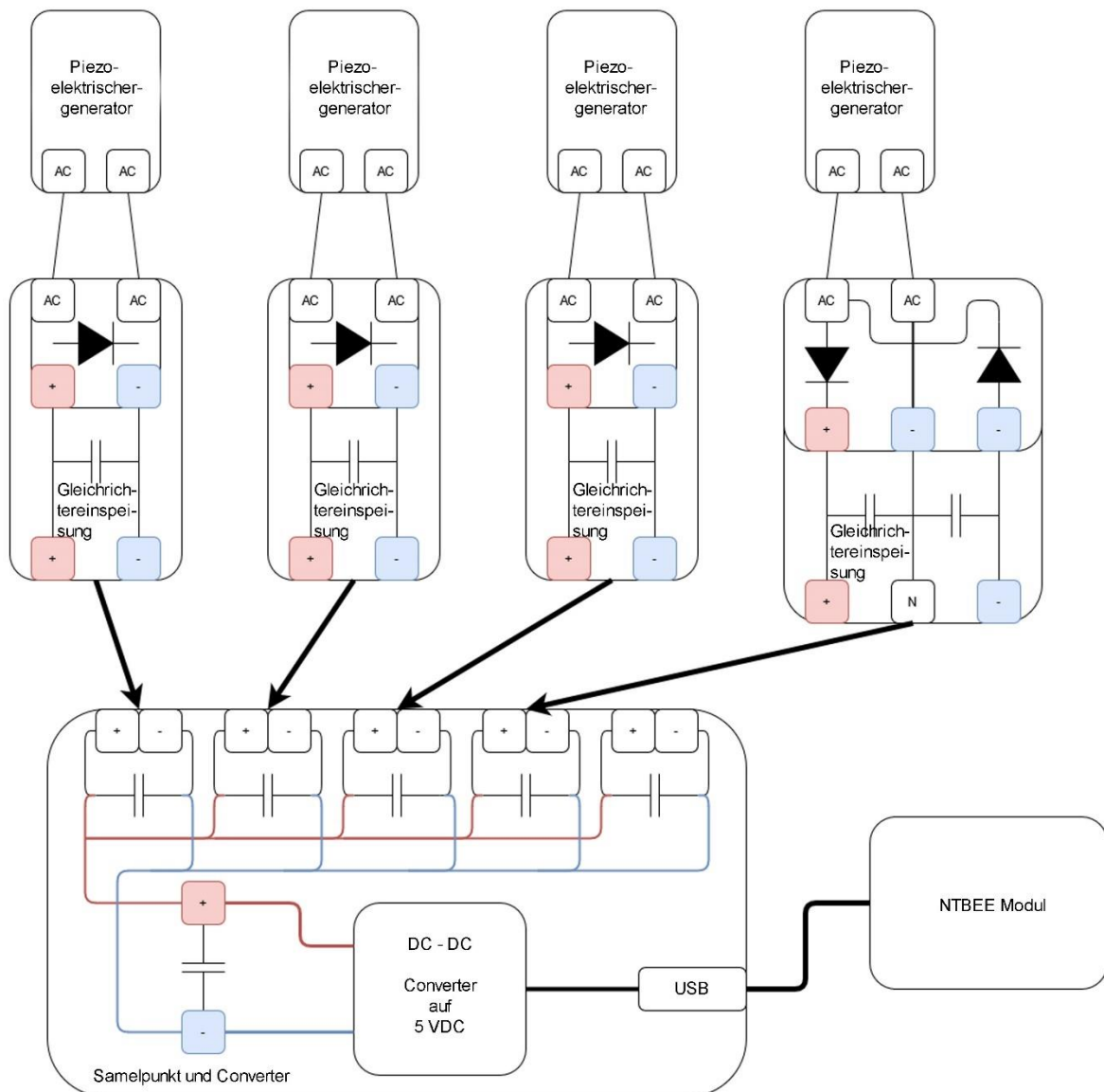
5.2. Sensorik (PieNet, NetTra)

5.2.1. Harvest Elektronik

Auf elektrotechnischer Ebene wurden, im Hinblick auf eine Weiterentwicklung des *NETBEE*-Moduls, technische Grundlagen zur Entwicklung einer geeigneten Harvest Elektronik zur Zwischenspeicherung der größtmöglichen Energie geschaffen. Diese Grundlage umfasst elektronische Messwerte, Erfahrungswerte und elektronische Versuchsaufbauten.

Die Abbildung unten zeigt das Konzept einer mehrstufigen Harvesting-Elektronik. Jeder piezoelektrische Generator muss getrennt abgegriffen werden, um zu verhindern, dass sich die generierten Ströme eliminieren. Daher ist eine mehrkanalige Ausführung notwendig.

Abbildung 35: Konzept Harvesting Elektronik [NET-Automation GmbH]



Piezo-Elemente erzeugen Wechsellspannungen je nach Krafteinwirkung. Um diese zu sammeln, müssen die Ströme addiert werden und die Spannung gleichgerichtet werden. Der Gleichrichter vernichtet grundsätzlich immer einen Teil der Spannung, hierbei wurden zwei Ausführungen angedacht:

- Silizium Dioden (0,6 V; 0,7 V) - Spannungsverlust in Durchlassrichtung sowie Durchbruchspannung (meist grösser 1000 V).
- Schottky Dioden (0,4 V) - Spannungsverlust in Durchlassrichtung (bei kleinen Strömen weniger). Wobei die Durchbruchspannung je nach Type bei 40 V liegen kann.

Es wurden zwei Versionen der Harvesting-Platine entwickelt und untersucht, wobei bei beiden die Energie aus Wechselstrom in Gleichstrom umgewandelt wird. Sobald die Spannung die Sammelspannung überschreitet, wird Strom über die Dioden durchgelassen. Dies umfasst Harvest Schaltungen mit drei Gleichrichtervarianten und Wandler welche wie nachfolgend dargestellt konstruiert wurden:

- Brückengleichrichter - Variante 1 (links)
 - Brückengleichrichter cd-HD2004 Schottky Gleichrichter
 - I_{\max} : 500 mA; U_{sperr} : 40 V
 - $U_{\text{durchlass}}$: 490 mV
- Brückengleichrichter - Variante 2 (Mitte)
 - Brückengleichrichter DF005s2
 - I_{\max} : 2 A; U_{sperr} : 50 V
 - $U_{\text{durchlass}}$: 800 mV / 360 mA
- Brückengleichrichter - Variante 3 (rechts)
 - Gleichrichter mit 2 Schottky Dioden
 - I_{\max} : 1 A U_{sperr} : 30 V
 - $U_{\text{durchlass}}$: 230 mV / 100 mA
- DC – DC Wandler (*CJMCU-3588 Buck Converter* (siehe nachfolgende Abbildung rechts))
 - Nanopower Energy / Harvesting Power Supply / with 14V minimum V_{in}
 - V_{in} : min. 14 V - max. 20 V
 - I_{\max} : 100 mA
 - 4 Spannungslevels U_{Ausgang} : 3,45 V / 4,1 V / 4,5 V / 5,0 V
 - Spannungsspitzen werden über pz1 pz2 aufgenommen

Abbildung 36: Gleichrichtervarianten [NET-Automation GmbH]

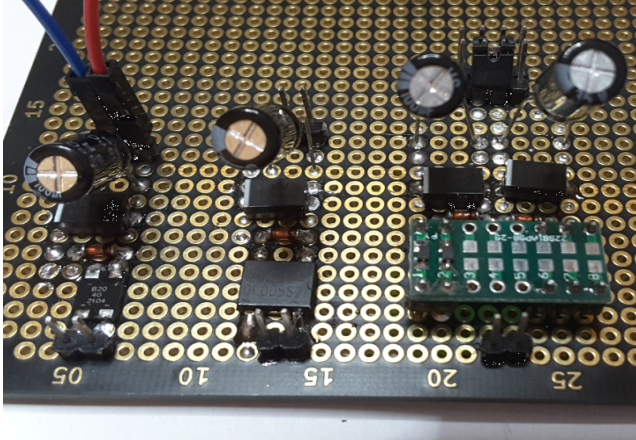
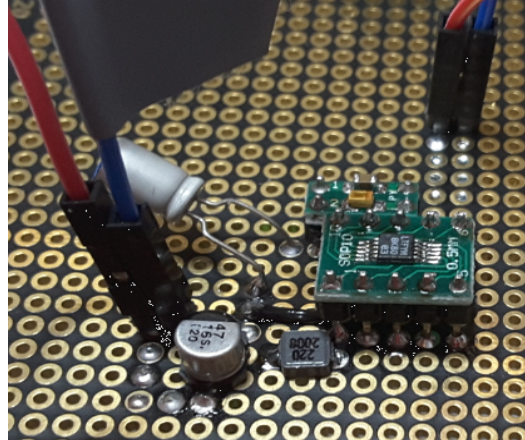


Abbildung 37: Harvest Schaltung mit ITC3588-2 [NET-Automation GmbH]

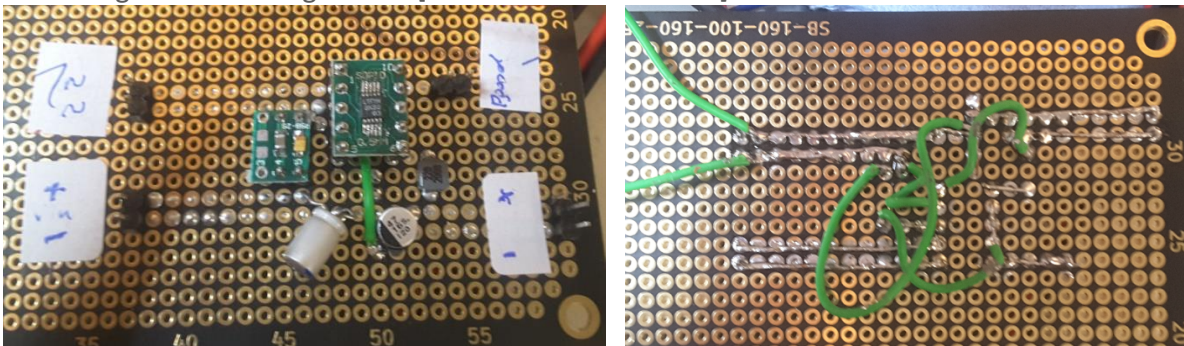


Wie sich zeigt, kam es bei Gleichrichtervariante 1 (siehe Abbildung oben links, links) im Rahmen der Energiespeicherung zu wenig Verlusten (0,6 V) bei Gleichrichtervariante 2 (siehe oben links, Mitte) zu mehr Spannungsverlust (1,1 V) und bei Gleichrichtervariante 3 (siehe oben links, rechts) zu einer Spannungsverdopplung bei Leerlauf (positive sowie negative Halbwelle wandern in verschiedene Kapazitäten) sowie zu 0,2 - 0,4 V Verluste (je nach Strombelastung).

Wie sich zudem zeigt, werden beim Wandler, getestet mit einer LED, ohne Last 5 V auch unter 14 V erzeugt. Zudem kommt es zu 2,54 V Spannungsabfall am 1 k Ω Widerstand, zu einem 1,76 V Spannungsabfall an der Diode wie auch insgesamt zu 4,3 V zum Messzeitpunkt mit 2,54 mA Strom bei 10,9 mW.

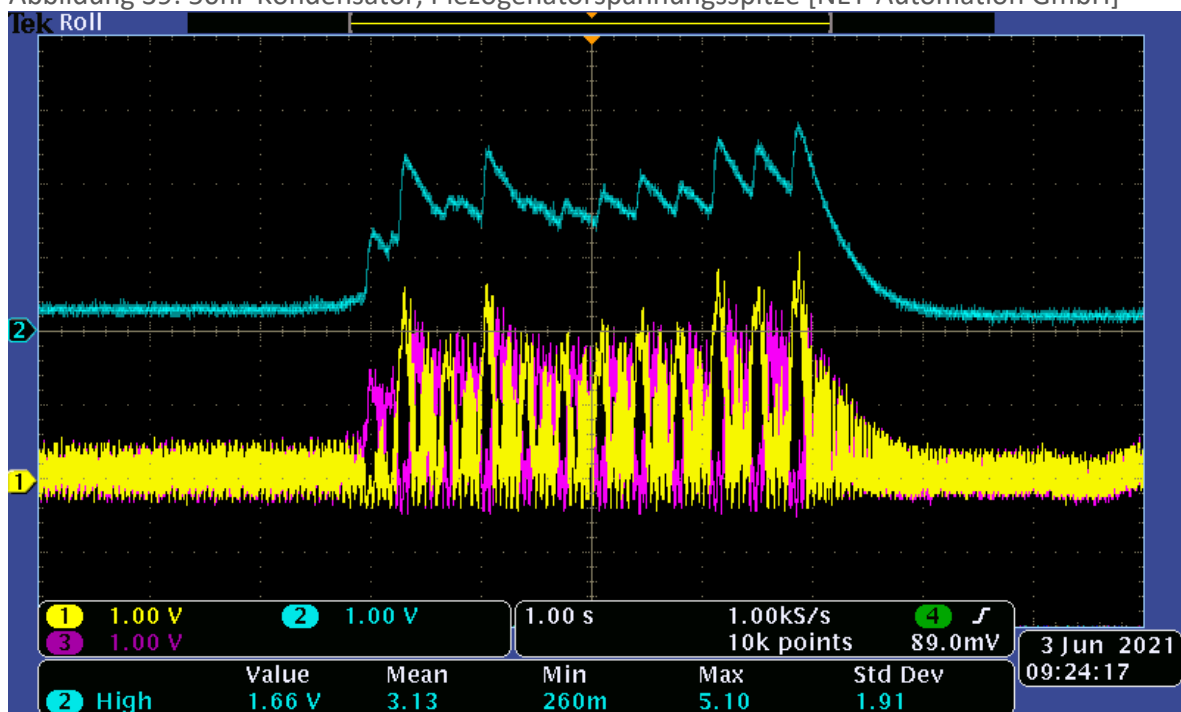
Wie eine weiterführende Untersuchung der Harvesting-Platine, infolge von Messungen zeigt, funktioniert das Laden nur am Maximum der Eingangsspannung (19,8 V Netzteilspannung). Mit 16,2 V gibt der LTC3588-2 IC-Spannung aus, der Strom fließt jedoch nur kurzzeitig. Die Kontroll-LED leuchtet durchgängig, aber die Lade LED am *NETBEE* Ver.3 blinkt nur kurz in einem Intervall auf. Unterschreitet die Versorgung 14 V schaltet auch die Kontroll-LED ab (Hysterese). Hierbei wurde festgestellt, dass der IC eine gute Kühlung benötigt und eventuell mehrfach ausgeführt werden muss, beispielsweise mit einer erweiterten Schaltung mit einem externen Transistor. Dafür ist eine Dimensionierung des Spule-Cap-Systems notwendig.

Abbildung 38: Harvesting Platine [NET-Automation GmbH]



Zudem wurde der Brückengleichrichter 2 in Kombination mit unterschiedlichen Kondensatoren (0nF, 20nF, 50nF) untersucht. Die Belegung am Oszilloskop war hierbei wie folgt: CH#1 erstes Potential Piezoelement, CH#2 Spannung am Kondensator +Gnd, CH#3 zweites Potential Piezoelement. Bei der Analyse des 50nF Kondensators (siehe nachfolgende Abbildung) konnte festgestellt werden, dass jede Piezogeneratorspannungsspitze ersichtlich ist, allerdings sind die ersten etwas niedriger, da sie einen Teil der Kapazität befüllen. Zudem wird die, für Kondensatoren typische, Kondensatorentladekurve sichtbar. Darüber hinaus wurde sichtbar, dass die Kapazität des Piezoelements größer als 50nF ist, das Speicherverhalten ($\sim \tau$) zwischen 1,5 s und 2s zu liegen scheint. Die Einlagerung der Energie kann nur in dem Moment geschehen, in dem die Piezospannung, die Gleichrichterdiodespannung größer der aktuellen Kondensatorspannung ist.

Abbildung 39: 50nF Kondensator, Piezogeneratorspannungsspitze [NET-Automation GmbH]



Nachfolgend sind unterschiedliche Belastungen aufgezeigt (bei einem 500nF Kondensator). Die ersten Pulse werden benötigt, um das Spannungspotential aufzubauen. Voller Strom wird benötigt um einen Teil der Spannung aufzubauen (die potentiell mögliche Spannung wird nicht erreicht). Nachdem jedoch die Spannung erreicht wird, fließt nur ein geringer Strom.

Abbildung 40: Einzelner Puls am Eingang (Piezoelement) [NET-Automation GmbH]

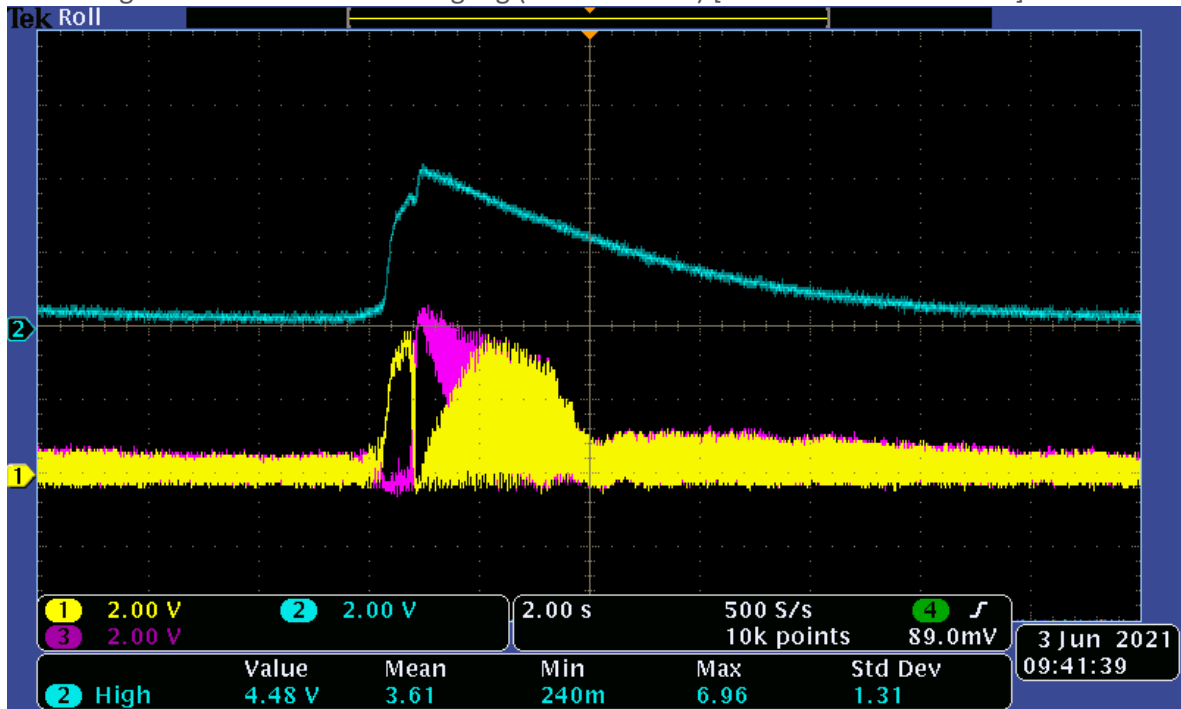


Abbildung 41: Mehrere Pulse aufladen Tau ~6 Sekunden [NET-Automation GmbH]

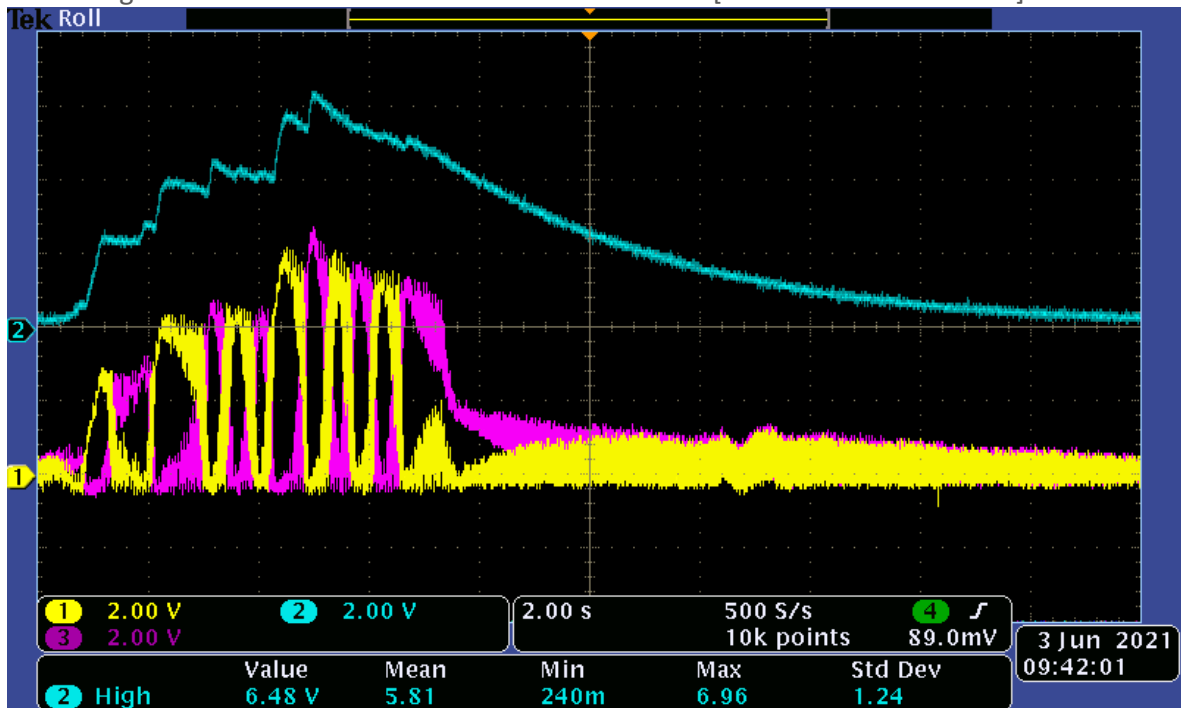


Abbildung 42: Zusammenpressen [NET-Automation GmbH]

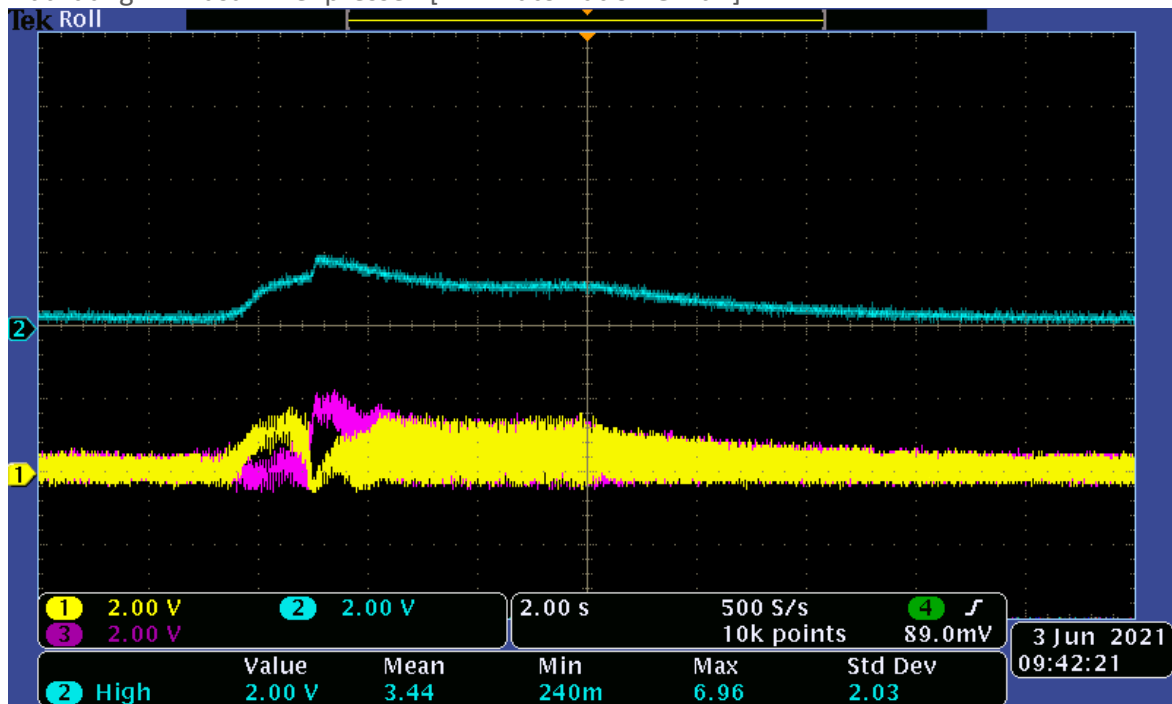
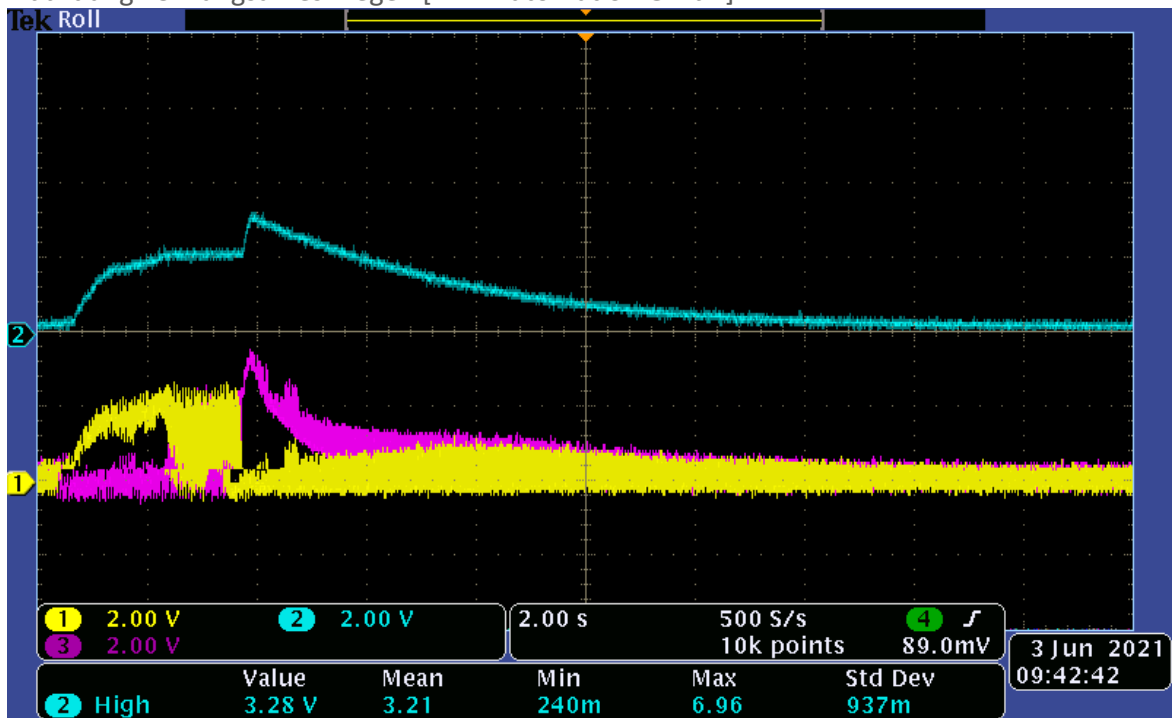


Abbildung 43: Langsames Biegen [NET-Automation GmbH]



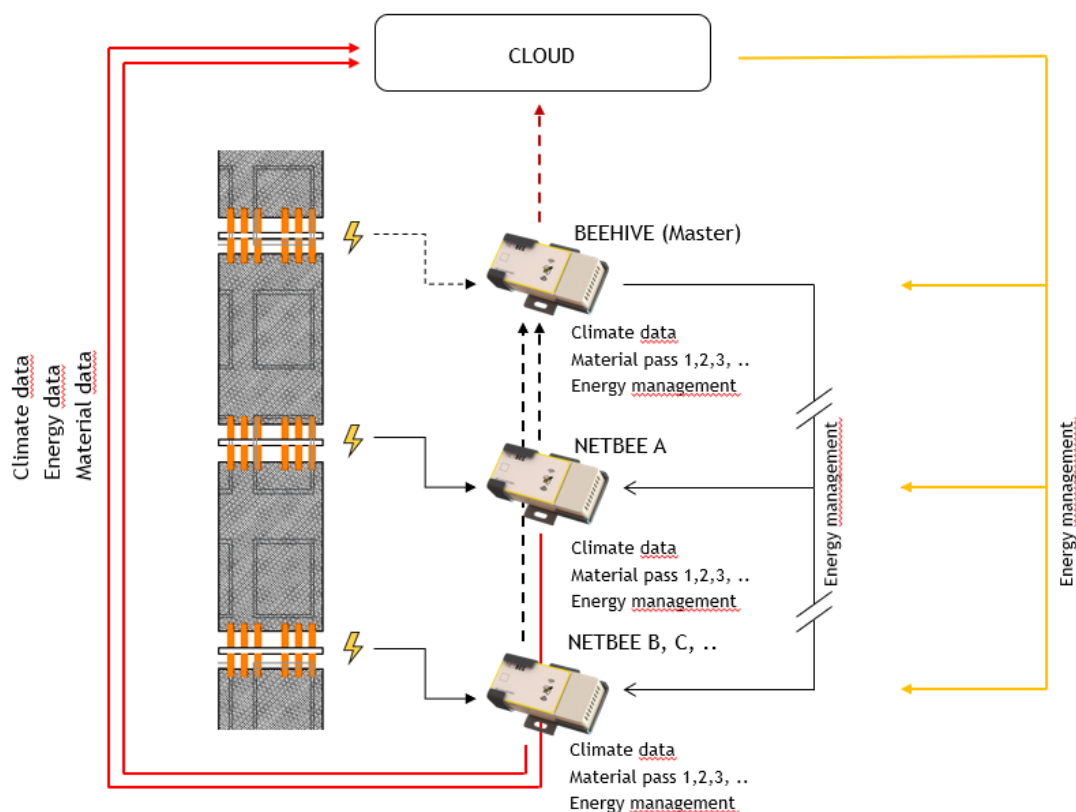
Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass für ein effektives Harvesting die Spannungsquelle (Piezoelement zur Stromgenerierung), die Schwingungsfrequenz und die elektronische Schaltung der Harvesting Platine optimal aufeinander abgestimmt sein müssen und dies (auch aufgrund der wechselnden Beringungen im Bauwesen) eine hohe Herausforderung darstellt.

Des Weiteren wurde im Bereich Sensorik eine spezielle *NETBEE* Firmware entwickelt, welche für das hochfrequente Auslesen von Strom und Spannung (Leistungsberechnung) erforderlich war. Die notwendige Datenübertragung zwischen *NETBEE* Hardware und Cloud wurde via Narrowband-IoT realisiert, wobei die Cloud auf die neue Firmware abgestimmt werden musste. Zudem wurden spezifische API-Schnittstellen programmiert, um Daten aus der Cloud auszulesen und zu nutzen.

5.2.2. Sensor-System

Im Kontext der Anwendung der Sensorik im bautechnischen Konzept „Textil-Fassade mit piezoelektrischen Bändern“ wurde auf grundlegender Ebene ein System erdacht, wie mehrere Sensoren interagieren, Daten messen wie auch austauschen können. Wie auf nachfolgender Abbildung ersichtlich, dienen die *NETBEE*-Module hierbei dazu, Messungen vorzunehmen, wie auch Bauteildaten in Form von Materialpässen zu speichern. Diese Daten können in eine Cloud übertragen, oder auch direkt am Sensor ausgelesen werden. Darüber hinaus wäre es denkbar, dass im Falle unterschiedlicher Energieversorgung, die Sensoren ihre Daten abgleichen und nur ein Sensor (mit dem höchsten Akkustand) eine Übertragung vornimmt, oder öfter sendet.

Abbildung 44: Klimadaten, Bienenstock [Institut für Architekturtechnologie (IAT), TU Graz]



Die Sensorenschnittstellen übernehmen hierbei die Funktion der Vermittlung zwischen Personen (Planer*innen, Facility Management, Besitzer*innen, Bewohner*innen usw.), dem Gebäude und dem Dashboard oder BIM-Modell.

Auf den Sensorenschnittstellen werden Klima- und Bauteildaten gespeichert, wie auch, im Kontext der Übertragung und Messung, ein Energiemanagement durchgeführt. Die Daten können einzeln in die Cloud übertragen werden, oder mittels *BEEHIVE* gesammelt und gesondert übertragen werden. Wie auch vor Ort ausgelesen werden. Die Cloud übernimmt die Aufgabe der Datenspeicherung und Verwaltung, kann aber auch das Energiemanagement unterstützen. Angedacht ist zudem, dass das Modul *BEEHIVE* eine weitere Ebene des Energiemanagements darstellen kann.

Ein zusätzlicher Ansatz war hierbei zudem Datenschutz durch physische Zugänglichkeit. Somit Klima- und Bauteildaten nur abrufbar sind, wenn das Gebäude betreten werden kann. Hierzu könnten zwar Sensoren im Außenraum angebracht werden, die Sensorenschnittstelle *NETBEE* jedoch geschützt im Gebäudeinneren.

5.3. Digitalisierung (NetTra, DatPre)

5.3.1. Energieverbrauch

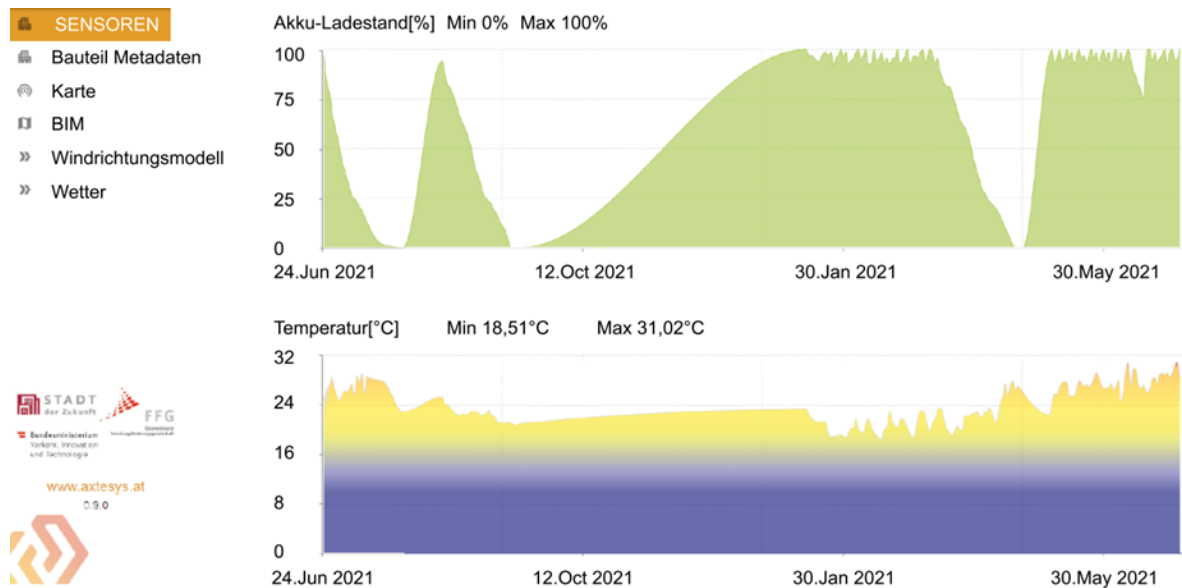
Im Hinblick auf die Reduktion des Energieverbrauchs wurden im Bereich der Digitalisierung potentielle Messdaten der Sensoren (von *NET-Automation GmbH*), sowie der Energieverbrauch und Übertragungszyklen von Daten analysiert und diskutiert.

Damit aus Daten Erkenntnisse gewonnen werden können, wurde in einem ersten Schritt ein Dashboard entwickelt, dessen zentrales Feature in der Visualisierung der Sensordaten sowie deren Akkuladestände und -Spannungen besteht (siehe nachfolgende Abbildung). Hierbei wurde folgender Technologie-Stack gewählt:

- Node.js Backend mit Nginx Webserver
- React, Typescript und CSS Frontend
- Material UI
- Recharts für die Graph-Visualisierung

Je Sensor ist es im Dashboard möglich, den Zeitraum und die Auflösung der Daten anzupassen, um sowohl langfristige Trends („Jahr“) als auch höher aufgelöste Daten („Tag“ oder „Stunde“) anzeigen und auswerten zu können. Zusätzlich werden die Maximal- und Minimalwerte des gewählten Zeitraums angezeigt und für Messwerte wie Temperatur und CO₂-Konzentration eine Farbcodierung in die Diagramme eingebaut, um eine Überschreitung von Grenzwerten schnell erkennen zu können (siehe Abbildung 45).

Abbildung 45: Darstellung der Sensormesswerte im Dashboard [axtesys GmbH]



Im Kontext von Energieverbrauch und somit Akku-Lebensdauer sind die Mess- und Übertragungsintervalle die wesentlichsten Faktoren und bieten somit einen guten Ansatzpunkt für Optimierung. Einerseits indem die Anzahl der Messungen gesenkt wird, aber vor allem, indem Übertragungen seltener durchgeführt werden, wenn Messgrößen/Daten sich nicht geändert haben oder der Akkustand sehr niedrig ist.

Zunächst wurde als einfachste Variante eine reaktive Anpassung der Mess- und Sendeintervalle anhand des Akku-Ladestands implementiert. Wenn dieser unter bestimmte Schwellwerte fällt erfolgt ein längeres Intervall und umgekehrt. Dadurch ist es möglich, bei ausreichender Energieversorgung eine hohe Daten-Auflösung zu erreichen, während bei knapper Energie (etwa bei wenig piezoelektrischer Energiegewinnung aufgrund von Windstille) die Auflösung reduziert wird, um zwar weiterhin Datenpunkte zu erhalten, allerdings weniger bzw. seltener um vollständige Ausfälle zu vermeiden. Je nach Intervall wurde der Akku-Ladestand extrapoliert (und die zu erwartende Rest-Laufzeit in oben dargestelltem Dashboard angezeigt).

Weiters wurde anhand der historischen Sensordaten sowie der letzten Messpunkte untersucht, durch „Predictive Modeling“ die zu erwartenden Schwankungen bei den Sensordaten abzuleiten. Und daraus folgend, bei historisch konstanten Messwerten, das Übertragungsintervall zu verlängern. Eine Herausforderung bei der Implementierung war hierbei, dass die entsprechende Logik im Backend des Web-Dashboards und nicht direkt am Sensor verortet ist. Somit muss derzeit eine Übertragung der Sensordaten stattfinden, bevor der Algorithmus die Intervalle evaluieren kann. Die Möglichkeit, Mess- und Sendeintervall getrennt zu setzen wurde daraufhin im Projektverlauf in die Firmware der *NETBEE* Module eingebaut, jedoch noch nicht in die REST Schnittstelle. Somit konnte diese Optimierung nicht getestet werden und wurde nur konzeptionell erarbeitet.

Der Algorithmus basiert hier auf Erfahrungen bei der Erstellung der IDR-Library (FFG-Projekt 866436, 868431) und kann wie folgt dargestellt werden:

Vorbedingungen

- Der Sensor misst in fixen Intervallen, überträgt die Daten aber nicht notwendigerweise unmittelbar
- Es wird definiert, nach wie vielen Messungen die Messwerte übertragen werden (n_{transmit})
- Es soll so selten wie möglich gesendet werden, aber mit maximalem Informationsgehalt
- Es wird sichergestellt, dass wichtige Messwerte ohne große Verzögerung gesendet werden
- Erkennung von wichtigen Messwerten bzw. Ausreißern durch den Algorithmus

Workflow

1. Analyse der zuletzt übertragenen Daten auf Ausreißer / wichtige Messwerte
2. Berechnung eines guten, neuen Übertragungsintervalls (n_{transmit})
3. Setzen des Übertragungsintervalls (n_{transmit})

Algorithmus

1. Berechne die Menge der Ausreißer / wichtigen Werte in den zuletzt übertragenen Werten
2. Ermittle p_{hat} , die Wahrscheinlichkeit eines Ausreißers / wichtigen Wertes
3. Berechne n_{transmit} mit Hilfe der Quantil-Funktion der negativen Binomialverteilung, sodass gewährleistet ist, dass mit der nächsten Übertragung mit der Wahrscheinlichkeit `maxImportantValuesProb` eine Anzahl von `maxImportantValues` nicht überschritten wird.

Anpassungen

- Ober-/Untergrenzen für n_{transmit}
- Anpassung der Parameter an den aktuellen Akku-Ladestand

5.3.2. Datenmanagement und Predictive Modeling

Bezugnehmend auf die Resilienz der gebauten Struktur ist es notwendig wie anfänglich erwähnt, Kenntnisse über die verbauten Bauteilkomponenten über den Lebenszyklus eines Gebäudes zu besitzen. Ziel ist ein nachhaltiges, ökologisches wie auch ökonomisches Umgehen mit dem Verbrauch der Ressourcen zu etablieren und somit die Wiederverwendung der Baukomponenten in Abhängigkeit auf ihre Qualität und den s.g. Ist-Zustand in Rahmen ihrer Anforderung bewerten zu können und gegebenenfalls zu ersetzen oder einer anderen Funktion zuzuführen. Der Fokus liegt darin, Bauteile in ihrer Nutzungszeit zu erhöhen und somit effektiv in der Dauer zu optimieren. Aber auch, durch Kenntnis über die Einwirkungen auf Bauteile die Wiederverwendung oder Recycling zu ermöglichen.

Klimadaten

Ausgehend von Messdaten des *NETBEE*-Moduls wurde eine Benutzeroberfläche möglichst ähnlich zu jener der Sensordaten gestaltet: Je Sensor mit Graph-Visualisierung sowie einer Auswahl des Intervalls, siehe Abbildung 46.

Abbildung 46: Messwerte der Wetterstation [axtesys GmbH]



Bauteildaten

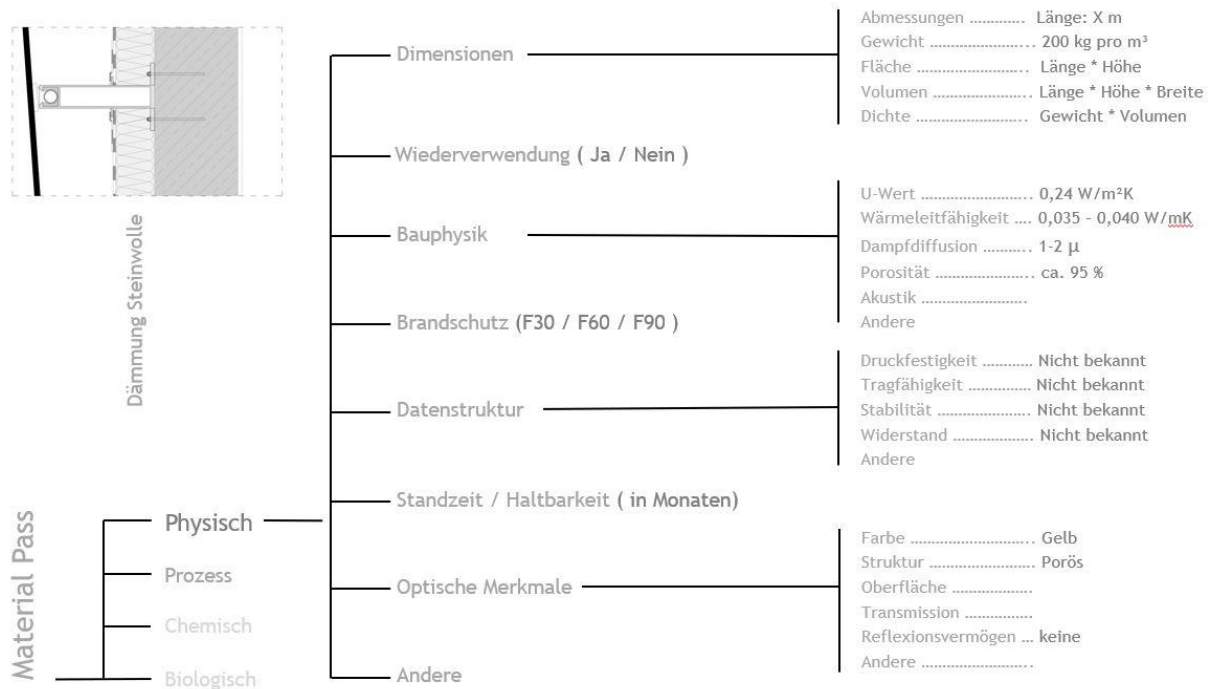
Ausgehend von „Building as Material Banks“ wurde im Kontext von Bauteildaten der Fokus auf die physischen Eigenschaften gelegt, da diese im Kontext der Kreislaufwirtschaft als besonders wesentlich eingeschätzt wurden. Diese Eigenschaften betreffen Aspekte wie Dimensionen, Brandschutz, Optische Merkmale, Datenstruktur, Bauphysik und Wiederverwendbarkeit.¹¹⁰

Aufgrund der großen Menge an aufkommenden Daten bietet es sich an, orientiert an BIM, Gebäude in Einzelbauteile einzuteilen. Diese könnten sich wie folgt unterteilen: Außenwände, Innenwände, Decken, Dächer, Fundamente, etc. Die Bauteile selbst werden durch ihre Grundabmessungen definiert. Öffnungen besitzen eigene Abmessungen und werden über den geometrischen Mittelpunkt in dem Bauteil verortet. Alle weiteren Materialkennwerte und Aufbauten werden als Index (Beispiel AW_n für eine Außenwand) gespeichert. In diesen sind die genauen Schichtdicken und die jeweiligen Materialindexe aufgelistet (Beispiel MAT_n). Diese können auf eine extern gespeicherte Materialbibliothek verweisen in der die Materialkennwerte wie auch Ökobilanzen gespeichert werden. Diese Systematik wird in gängigen BIM Programmen zum Teil bereits angewendet.

Hinsichtlich der Datenaufbereitung und ihrer Bereitstellung, können durch hinterlegte Datensätze in den Sensormodulen zum einen detaillierte Informationen zum Bauteil erhoben werden, zum anderen, auch die Reparatur und die aktualisierten Daten in diesem „Material Passport“ gespeichert werden. Ein möglicher Aufbau eines solchen Passports ist aufbauend auf „Heinrich Matthias, Lang Werner: Materials Passports - Best Practice. München 2019“ nachfolgend in Abbildung 47 dargestellt.

¹¹⁰ Vgl. Heinrich/Lang 2019, 4.

Abbildung 47: Aufbau Materialpassport¹¹¹



Um hier auch nach der womöglich sehr langen Nutzungsdauer des Bauteils noch das Auslesen von Daten sicherzustellen, ist ein einfaches und etabliertes Datenformat zielführend. Hier wurde auf ein JSON-Format gesetzt.

Zudem lassen sich so auch die gemessenen Sensordaten selbst in das Datenformat integrieren. So können zum Beispiel zu hohe Feuchtigkeitswerte, welche die Materialeigenschaften verändern, langfristig dokumentiert werden. Dazu wurden im Dashboard Masken zur Eingabe der Bauteildaten integriert, welche direkt aus den BIM Daten entnommen werden können. Diese werden direkt über das NETBEE-Cloud API auf den Sensor übertragen und dort gespeichert.

¹¹¹ Institut für Architekturtechnologie (IAT), TU Graz basierend auf Heinrich/Lang 2019.

Abbildung 48: Eingabe Materialpassport [axtesys GmbH]

Bauteil W1 2001BEECOLONY0121

Bauteildaten | S1: IP Feinkörniger Kalkputz | S2: AP KalkZement Putz | S3: EPS Dämmplatten | Übersicht

Bezeichnung: Fertigstellung:

Geometrische Daten

Länge: [m] | Breite: [m] | Höhe: [m]

Lage: [x, y, z]

Öffnungen (1)

Art der Öffnung: Länge: [m] | Breite: [m]

Schichten (3)

Bezeichnung: Material: Fertigstellung:

Bauteil W 1 2001BEECOLONY0121

Länge: 4 m
Breite: 1.4 m
Höhe: 2 m
Fläche: 6.06 m²
Volumen: 8.51 m³
Lage: -
Fenster: 1.6x1.2 m

Schichten: 3
Bezeichnung: TEST 2
Fertigstellung: 06.07.2022

Wärmedurchlasswiderstand
I: 0.13 m²K/W
A: 0.04 m²K/W
Gesamt: 16.19 m²K/W

U-Wert: 0.06 W/m²
Gewicht: 7767.2 kg
Porenanteil: -

Grenzwerte

Bauteil	Feuchtigkeit	U-Wert
W1	-	0.06
S1	-	-

Virtuelle Sensordaten

Eine Fragestellung des Projekts beschäftigt sich mit der Nutzung der Sensordaten. Im Idealfall lässt sich ein Mehrwert generieren, wenn neben den für das Gebäude essenziellen Use Cases sich darüber hinaus noch andere Anwendungsfälle erschließen.

Dies betrifft die Erfassung des umgebenden Mikroklimas. Die im Bauteil verbauten Sensoren haben für diesen Use Case jedoch die Einschränkung, dass sie nur in einer nahen Umgebung Daten erfassen können. Werte außerhalb des Bauteils sind zum einen nicht erwünscht, zum anderen physisch schwer umzusetzen. So könnten zum Beispiel Sonneneinstrahlung, Windgeschwindigkeit oder Regen nicht direkt gemessen werden.

Im Laufe des Projekts war es noch nicht möglich, ausreichend Daten für das Lernen eines solchen Modells zu sammeln. Als nächstbeste Alternative bot sich an, Daten aus dem NIST National Institute of Technology (NIST)¹¹² zu verwenden. Die Daten stammen aus einem Windtunnel-Experiment, bei dem Gebäudemodelle mit Luftdrucksensoren ausgestattet wurden und dann aus verschiedenen Richtungen dem Wind ausgesetzt wurden. Die Sensoren waren an den sechs Gebäudeseiten, vier senkrechte Wände und zwei Dachseiten, in einem feinen Raster angebracht worden. Für unser Experiment wurden die Daten auf $4 \times 4 \times 6 = 96$ Bereiche aggregiert. Durch die verschiedenen Gebäudemodelle und Szenarien war es möglich mehr als 10000 Beobachtungen zu erstellen. Davon wurden 75% als Trainingsdaten und 25% als Testdaten verwendet (siehe Abbildung 49 und Abbildung 50).

¹¹² Vgl. Ho/Surry/Morrish 2003.

Abbildung 49: Windrichtung und -druck an einem Gebäude aus NIST Daten [axtesys GmbH]

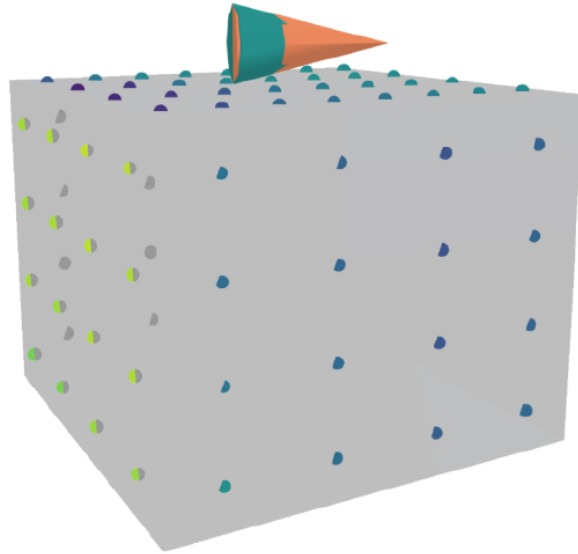
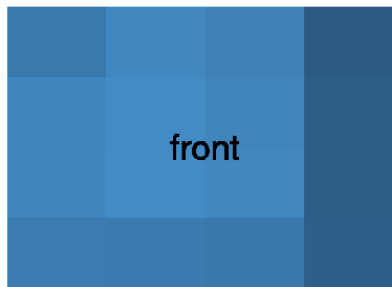
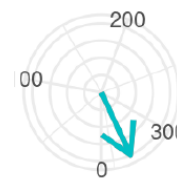


Abbildung 50: Darstellung eines Datensatzes der Winddaten mit Windrichtungsvorhersage und Fehler [axtesys GmbH]

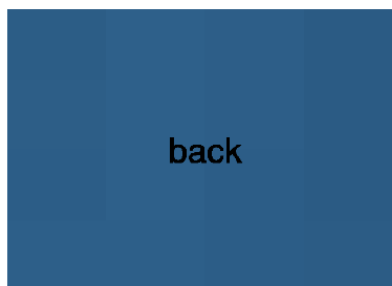
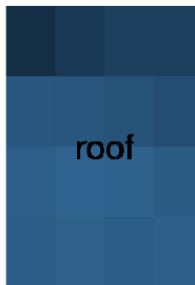
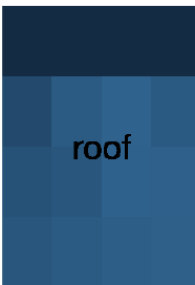
File Name: ADW100s100D040a3350
 Roof Slope: 100%
 Exposure: Suburban
 Model Scale: 1%
 Leakage Type: Distributed leakage
 Building Height: 40 ft



Wind Direction



Prediction
 True Wind



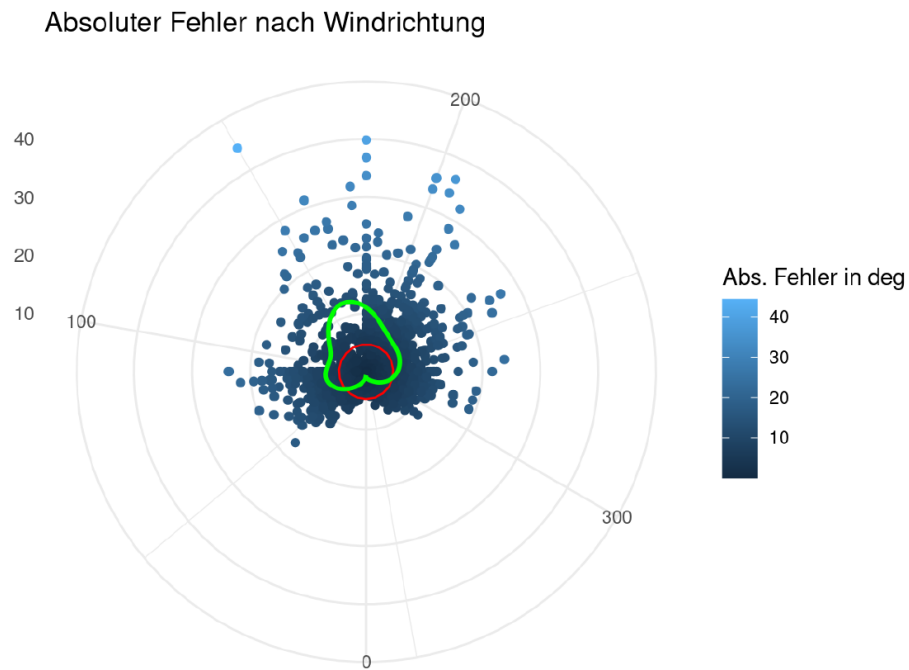
Absolute Prediction Error

0.04

Zur Vorhersage der Windrichtung wurde eine RNN Architektur verwendet und mit den Daten trainiert. Über eine Grid-Suche wurde auch bedingt Hyper-Parameter Tuning angewendet. Zielgröße war die quadratische Abweichung der Windrichtung in Grad.

Das beste Modell lieferte im Test-Set eine mittlere absolute Abweichung von 4.6 Grad. Die Windrichtung ließ sich in diesem Fall mit guter Genauigkeit vorhersagen. Eine mögliche Anwendung eines so trainierten Modells bei Piezo-Elementen an den Gebäudeaußenseiten ist also durchaus denkbar (siehe Abbildung 51).

Abbildung 51: Vorhersagefehler des Modells nach Windrichtung [axtesys GmbH]



Betrachtet man die Erfahrungswerte ganzheitlich, so darf die Hypothese aufgestellt werden, dass in weiterer Zukunft eine Schnittstelle entwickelt werden kann, welche auf Basis der Umgebungsdaten kombiniert mit den Realdaten der Bausubstanz, Abnutzungs- und Instandsetzungsdaten aus der Konstruktion selbst ablesen kann.

6 Schlussfolgerungen

Die industrielle Forschung „Piezo-Klett“ eröffnet neue Perspektiven im Rahmen der bautechnischen Konstruktion, zur autarken Energieversorgung aktiver Sensortechnologien und deren Optimierung, im Feld der Datenerfassung und des Datenmanagements, wie auch der Anwendung von piezoelektrischen Objekten sowie der Klettverbindung.

Die gewonnenen Ergebnisse und Erkenntnisse der industriellen Forschung eröffnen für das Projektteam eine Grundlage in neuen Forschungsbereichen. Es wird angestrebt, diese in unterschiedlichen Folgeprojekten weiterzuführen und im Rahmen einer Dissertation zu vertiefen.

6.1. Bautechnische Konstruktion

Entgegen den gegenwärtigen Normierungs- und Konstruktionsanforderungen sind im Hinblick auf die Projektidee einzelne Gebäudeteile so zu konstruieren, dass Einwirkungen zu möglichst starken Schwingungen und Vibrationen in der Konstruktion führen. Ein dahingehendes Umdenken im Rahmen der Konstruktion besitzt Relevanz für die gesamte Baubranche und kann zu neuen Bausystemen, Bauprodukten aber auch Planungs- und Konstruktionsweisen führen.

Im Hinblick auf aktuelle Normen (OIB-Richtlinien, Eurocode) und die Baupraxis nimmt das Projektteam jedoch an, dass für eine baurechtliche Zulassung „einwirkungsoptimierter“ Konstruktionen weiterer Forschungsbedarf besteht, wie auch Überzeugungsarbeit geleistet werden müsste. Grundsätzlich wären in einem ersten Schritt einzelne Systeme oder Systemkomponenten (z.B. bei Fassaden) anzudenken, bei welchen zudem geringe Sicherheitsbedenken bestehen. Da hierbei ein besonderes Augenmerk auf Gefahren im Rahmen der Nutzung zu legen ist.

Im Kontext der Einwirkungen wird angenommen, dass Windkräfte die höchsten sich „regelmäßig“ wiederholenden dynamischen veränderlichen Lasten im Hochbau generieren. Dementsprechend besteht hohes Potential in der Weiterentwicklung des oben dargestellten Konzeptes „Textil-Fassade mit piezoelektrischen Bändern“ und ist Gegenstand der laufenden Dissertation („Energy to Envelope, Gebäudehülle als autarke Energiequelle/Sensortechnologie“) von Toni Levak (stellv. Projektleiter dieses Projektes).

6.2. Energieversorgung aktiver Sensortechnologien

Wie im Rahmen der Versuche und Berechnungen dargestellt werden konnte, ist ein Betrieb der Sensorschnittstelle *NETBEE* mit piezoelektrischen Komponenten theoretisch möglich. So wurde auf Grundlage von Versuchsergebnissen errechnet, dass bei dynamischer Belastung von zwei parallel geschalteten Bändern über 24 Stunden, eine Energieerzeugung von 7,6 J stattfindet. Damit wäre es möglich, mit dem *NETBEE*-Modul fünf Messungen in 24 Stunden oder eine Übertragung in 20 Tagen durchzuführen. Im Kontext des Konzeptes „Textil-Fassade mit piezoelektrischen Bändern“ und 12 parallelgeschalteten Piezo-Textil-Bändern wäre eine Messung in 0,5 h oder eine Übertragung in 1,6 Tagen denkbar.

Im Rahmen der elektrotechnischen Entwicklung hat sich jedoch gezeigt, dass für eine tatsächliche Energieversorgung aufgrund der hohen Komplexität und bereichsübergreifende Abhängigkeiten weitere Entwicklungsschritte notwendig sind. Diese betreffen die Harvesting-Platine (in Abhängigkeit des Anwendungsfalls, der anzunehmenden Frequenz und den Umgebungsbedingungen) im *NETBEE*-Modul, wie auch Optimierungen auf softwareebene hinsichtlich Datenzwischenspeicherung, -management und -übertragung.

Das potenzielle Marktpotenzial eines autarken und piezoelektrisch betriebenen *NETBEE*-Moduls ist hoch und betrifft Sensorik im Neubau wie auch der Sanierung. Insbesondere im Kontext der angestrebten Resilienz von Gebäuden und Kreislaufwirtschaft wird Kenntnis über die Baustruktur, und damit Sensorik und Datenerfassung wie auch -management immer wichtiger.

6.3. Datenerfassung und Datenmanagement

Sensortechnologien ermöglichen ein präzises Erfassen von Umweltdaten und Bauteildaten. Zudem können Einwirkungen in Abhängigkeit der Sensoren und ihrer Funktion wie Vibration und Oberflächenveränderungen gemessen werden. Dies eröffnet auf digitaler Ebene eine mögliche Vergleichbarkeit von Gebäuden und ihrer Simulationen, in Abhängigkeit tatsächlicher Einwirkung und kann in weiterer Folge Auswirkungen auf die Planungs- und Baupraxis haben, wie auch die Verbesserung von den Planungs-, Analysesoftwaren ermöglichen.

Hierbei wird die Möglichkeit der Nutzung von energie-produzierenden Objekten zur Generierung von Daten angesprochen, welche nicht in erster Linie für diese Nutzung angedacht waren. Dieser Ansatz kann beispielsweise auch auf Photovoltaik angewandt werden, und besitzt Relevanz für Städteplaner, wie auch zukunftsorientierte Stadtplanung im Kontext der klimatischen Veränderung. Relevant ist zudem die Optimierung von Mess- und Sendezyklen.

Im Kontext des Datenmanagements ist, durch die autarke Energiequelle, auf der Sensorschnittstellen eine dezentrale Speicherung und das Nachverfolgen von Langzeitdaten, insbesondere unabhängig von Cloudsystemen, möglich. Hierbei entstehen Potentiale für das Facilitymanagement, auch infolge des Auslesens von Daten vor Ort. Aber auch anhand digitaler und auf den Lebenszyklus von Gebäuden angepasster Materialkennwerte und ihrer Nutzungseigenschaften im Kontext von Resilienz und Kreislaufwirtschaft in Abhängigkeit ihrer Protokolle bzw. der s.g. „Material Passports“¹¹³.

6.4. Piezotechnologie

Grundsätzlich wurde festgestellt, dass die Anwendung piezoelektrischer Komponenten (Piezo-Textil-Band, Flächenwandler, Piezoelektrische Scheibe) in Gebäuden und Baukonstruktionen hohes Potential besitzt. In Abhängigkeit der Konstruktion und Technologie könnten hierbei auch konstruktionsspezifische Aufgaben übernommen werden. Für eine solche Anwendung müssen die Komponenten auf ein Trägermaterial aufgebracht oder entsprechend konstruiert werden, um Beschädigungen zu vermeiden. Wesentlicher Aspekt besteht hierbei in der Konstruktion infolge der

¹¹³ Vgl. Heinrich/Lang 2019, 4.

jeweiligen Füge-technik (Klemmen, Kleben, Kletten, Formschluss) wie auch in der Vermeidung von Beschädigungen (Ableitung hoher Lasten).

Bemerkenswert war zudem die Feststellung, dass ein nasses Piezo-Textil-Band bei vergleichbarer mechanischer Wirkung im gleichen Versuchsaufbau eine um den Faktor $\sim 11,5$ höhere elektrische Leistung aufweist. Ein Einsatz unter Witterung also auch Vorteile haben kann.

6.5. Klettverbindung

Die Projektinhalte im Kontext der Klettverbindung sind Gegenstand einer Erfindungsmeldung an die TU Graz und einer möglichen Patentierung. Daher können hierzu keine Details publiziert werden. Mögliche Verwertungs- und Verbreitungsaktivitäten betreffen Klettverbindungen im Allgemeinen.

7 Ausblick und Empfehlungen

Die industrielle Forschung „Piezo-Klett“ eröffnet neue Ansätze im Rahmen der Baukonstruktion, der Energieversorgung aktiver Sensortechnologien, als auch im Bereich der Datenerfassung und des Datenmanagements. Insbesondere im Kontext eines neuartigen Energieversorgungssystems.

Dies gilt somit vor allem für autarke Versorgungsstrukturen und eröffnet Potenziale für das Facility Management, wie auch für die Optimierung sowie die Entscheidungsunterstützung bei der Planung zukünftiger Gebäude.

Darüber hinaus werden neue Sichtweisen auf die Baukonstruktion und nachhaltige Energieerzeugungssysteme eröffnet, indem Gebäude den Umweltbedingungen ausgesetzt werden und passiv zu Energieträgern werden. Über die Bauteile hinaus denkt das Forschungsprojekt "Piezo-Klett" durch die Kombination mit Sensortechnologien ein präzises Monitoring von Umwelteinflüssen, insbesondere Wind an, und eröffnet damit Möglichkeiten zur präzisen Vergleichbarkeit von Simulation und Auswirkung, in ganzheitlicher Weise im Bauwesen.

Das Forschungsteam ist sich bewusst, dass im Hinblick auf eine Etablierung des vorgeschlagenen Systems und um der Vision dieses Systems näher zu kommen, umfassende weitere Forschung notwendig ist. Zunächst bedarf es im Bereich der Elektrotechnik und Piezotechnologie weiterer Versuche und Simulationen um die Vielzahl an dynamischen voneinander abhängigen Variablen besser beschreiben zu können. Wie auch, um die Schaltungen und Konstruktionen für den jeweiligen Einsatzbereich zu optimieren. Im Bereich des Energy-Harvestings und der elektronischen Schaltungen ist daher eine Kooperation mit einem facheinschlägigen Institut mit Forschungsschwerpunkt im Bereich der Mikroelektronik und des Energy-Harvestings anzustreben.

Des Weiteren wäre es in einem nächsten Schritt notwendig, die für das Bauwesen neuartigen piezoelektrischen Materialien (Piezo-Textil-Band, DuraAct Flächenwandler von *PI Ceramic GmbH*, Piezoelektrische Scheibe von *PI Ceramic GmbH*) hinsichtlich ihrer bautechnischen Eigenschaften weiter zu untersuchen und zu klassifizieren. Wie auch neue Entwicklungsschritte im Bereich des „Piezo-Textil-Bandes“, besonders im Bereich der elektrischen Kontaktierung des Textils, zu setzen.

Im Kontext der Baukonstruktion sind in weiterführenden Untersuchungen bestehende Gebäude hinsichtlich der dynamischen (Wind-) Einwirkungen zu untersuchen (digitale Simulationen, Messungen mit Sensorik) oder Demonstrationsobjekte zu bauen und zu untersuchen. Womöglich besteht für digitale Simulationen auch die Möglichkeit, Materialmodelle von piezoelektrischen Komponenten zu adaptieren oder zu entwickeln, um eine genauere Betrachtung in diversen Simulationsprogrammen zu ermöglichen und die entwickelten Konstruktionen mit den einschlägigen Normen nachweisen zu können.

Im Bereich der Datenspeicherung und Datenverwaltung ist die Abstimmung der Mengen an Sensordaten (Klimadaten und Bauteildaten) und deren Auswertung weiter zu untersuchen. Hierbei stellt sich die Frage, wie mit möglichst wenig Daten möglichst konkrete Aussagen für eine Kreislaufwirtschaft getroffen werden können. Hierzu können Daten, welche aus 1 zu 1 Versuchen resultieren genutzt werden, aber auch im städtebaulichen Kontext Simulationen durchgeführt werden.

8 Verzeichnisse

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Klettverbindung bestehend aus den Klettelementen Pilzkopf und Schlaufe	15
Abbildung 2: Klettverbindung Duotec®, bestehend aus den Klettelementen Pilzkopf und Pilzkopf....	15
Abbildung 3: ISOVER Vario®	16
Abbildung 4: Klett Nassbausystem	16
Abbildung 5: Fastening membrane	18
Abbildung 6: Reversible Befestigungsmechanismen; Querschnittsansicht in Eingriff (o), Vorsprung einer weiteren Ausführungsform (u)	18
Abbildung 7: System StoSustainR	19
Abbildung 8: Putzträgerplatte mit Schlaufenbeschichtung, (re) Justierbares Befestigungselement mit Pilzkopfoberfläche.....	19
Abbildung 9: Forschungsfeld „Klett-TGA“, TGA-System und Rohbaustoff mit Klettschnittstellen	20
Abbildung 10: Klettbeton, Versuchskörper Hakenstruktur.....	21
Abbildung 11: Übersicht „Active Velcro System“	21
Abbildung 12: Prinzipschaltbild eines Sensors mit Funkelektronik und Energy Harvesting	22
Abbildung 13: Schwerpunktverschiebung des Kristalls infolge einer mechanischen Einwirkung beziehungsweise einer angelegten Spannung (inverser Piezoeffekt).....	23
Abbildung 14: Energiedichte	24
Abbildung 15: Schematischer Schaltplan eines Energy Harvesting Systems	25
Abbildung 16: Herstellung und piezoelektrisches Verhalten der gewebten Bänder. Foto der Bandwebmaschine, die für die Herstellung der piezoelektrischen Textilien verwendet wurde. Fotos der Textilbänder (trocken und in Wasser getaucht). Die Ausgangsspannung bei Dehnung wird auf dem Bildschirm des Oszilloskops angezeigt. Darstellungen der Webstruktur (unten schematisch, Foto rechts).....	26
Abbildung 17: Forschungsfeld [Institut für Architekturtechnologie (IAT), TU Graz]	30
Abbildung 18: Versuche Energy-Harvesting Platine 1 [NET-Automation GmbH]	32
Abbildung 19: Versuche Energy-Harvesting Platine 2 [NET-Automation GmbH]	33
Abbildung 20: Spannungsquelle Frequenzgenerator FG1617 Voltcraft (li), Netzteil HMP4040 (re) [NET-Automation GmbH]	33
Abbildung 21: Piezotextil-Band [Institut für Architekturtechnologie (IAT), TU Graz]	36
Abbildung 22: Piezotextil-Band als Schlaufe im Zugversuch [Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz].....	36
Abbildung 23: DuraAct Flächenwandler PI Ceramics GmbH [Institut für Architekturtechnologie (IAT), TU Graz]	37
Abbildung 24: DuraAct Flächenwandler im Versuchsaufbau [Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz].....	37

Abbildung 25: Piezoelectric Disc – PI Ceramic GmbH (PRYY+0187) [Institut für Architekturtechnologie (IAT), TU Graz]	38
Abbildung 26: Aufbau Druckversuch Piezoscheibe [Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI), TU Graz]	38
Abbildung 27: Simulationsergebnisse auf Dlubal RWind. Links die Geschwindichkeitsverteilung (in m/s) und rechts die daraus resultierenden Kräfte (in N/m ²) [Institut für Architekturtechnologie (IAT), TU Graz]	46
Abbildung 28: Modalanalyse Modell (li) und 1. Eigenform (re) [Institut für Architekturtechnologie (IAT), TU Graz]	46
Abbildung 29: Textil-Fassade mit piezoelektrischen Bändern [Institut für Architekturtechnologie (IAT), TU Graz]	48
Abbildung 30: Schematische Darstellung der Anwendung von piezoelektrischen Geschossdecken-Auflagern [Institut für Architekturtechnologie (IAT), TU Graz]	52
Abbildung 31: Prinzipskizze zur Nutzung windinduzierten Gebäudeschwingung. [Institut für Architekturtechnologie (IAT), TU Graz]	53
Abbildung 32: Prinzipskizze zur Berechnung der unterschiedlichen Windbelastungen. [Institut für Architekturtechnologie (IAT), TU Graz]	54
Abbildung 33: Beispiel eines gemessenen Spannungsverlaufs [Institut für Architekturtechnologie (IAT), TU Graz]	57
Abbildung 34: Piezoelektrisches Türsystem [Institut für Architekturtechnologie (IAT), TU Graz].....	58
Abbildung 35: Konzept Harvesting Elektronik [NET-Automation GmbH]	60
Abbildung 36: Gleichrichtervarianten [NET-Automation GmbH].....	62
Abbildung 37: Harvest Schaltung mit ITC3588-2 [NET-Automation GmbH]	62
Abbildung 38: Harvesting Platine [NET-Automation GmbH]	62
Abbildung 39: 50nF Kondensator, Piezogenatorspannungsspitze [NET-Automation GmbH]	63
Abbildung 40: Einzelner Puls am Eingang (Piezoelement) [NET-Automation GmbH]	64
Abbildung 41: Mehrere Pulse aufladen Tau ~6 Sekunden [NET-Automation GmbH]	64
Abbildung 42: Zusammenpressen [NET-Automation GmbH]	65
Abbildung 43: Langsames Biegen [NET-Automation GmbH]	65
Abbildung 44: Klimadaten, Bienenstock [Institut für Architekturtechnologie (IAT), TU Graz]	66
Abbildung 45: Darstellung der Sensormesswerte im Dashboard [axtesys GmbH]	68
Abbildung 46: Messwerte der Wetterstation [axtesys GmbH]	70
Abbildung 47: Aufbau Materialpassport	71
Abbildung 48: Eingabe Materialpassport [axtesys GmbH].....	72
Abbildung 49: Windrichtung und -druck an einem Gebäude aus NIST Daten [axtesys GmbH].....	73
Abbildung 50: Darstellung eines Datensatzes der Winddaten mit Windrichtungsvorhersage und Fehler [axtesys GmbH]	73
Abbildung 51: Vorhersagefehler des Modells nach Windrichtung [axtesys GmbH].....	74

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Potentialabschätzung [Institut für Architekturtechnologie (IAT), TU Graz]	35
Tabelle 2: Potentialabschätzung „Textil-Fassade mit piezoelektrischen Bändern“ [Institut für Architekturtechnologie (IAT), TU Graz]	42
Tabelle 3: Potentialabschätzung „Piezoelektrische Kipp-Auflager“ [Institut für Architekturtechnologie (IAT), TU Graz]	43
Tabelle 4: Potentialabschätzung „Piezoelektrisches Türsystem“ [Institut für Architekturtechnologie (IAT), TU Graz]	43
Tabelle 5: Materialparameter Gewebe und Gestrick [Achim Vohrer: Experimentelle Analyse und Simulation der Verformung luftgefüllter textiler Hüllen, Institut für Textil- und Verfahrenstechnik, Denkendorf 2012]	47
Tabelle 6: Ergebnisse der 3 Materialparameter [Institut für Architekturtechnologie (IAT), TU Graz]..	47

Literaturverzeichnis

Austrian Standards International: ÖNORM A 6241-2 (Digitale Bauwerksdokumentation - Teil 2: Building Information Modeling (BIM) - Level 3-iBIM). 2015

Bahr Carolin, Lennerts Kunibert: Lebens- und Nutzungsdauer von Bauteilen. 2008

Barvosa-Carter William Ventura, Browne Alan L. Grosse Ponte, Jonson Nancy L. Northville, Keefe Andrew C. Encino: Reversible Befestigungsmechanismen. DE112007002135T5, 2007

Bosch Thermotechnik GmbH: Passive und aktive Sensoren: Die Funktion im Vergleich. online unter: <https://www.heizung-steuern.com/de/de/passive-und-aktive-sensoren/> (abgerufen am 17.08.2022; 17:49)

Brei, Diann/Lindner, Douglas/Frecker, Mary/LaVigna, Chris/Clement, Joe: Electronically Integrated Active Compliant Transmission (ACT) Actuation Technologies. Proof-of-Concept Investigation of Active Velcro for Smart Attachment Mechanisms, University of Michigan 2003

Bringezu S., Ramaswami A., Schandl H., O'Brien M., Pelton R., Acquatella J., Ayuk E., Chiu A., Flanegin R., Fry J., Giljum S., Hashimoto S., Hellweg S., Hosking K., Hu Y., Lenzen M., Lieber M., Lutter S., Miatto A., Singh Nagpure A., Obersteiner M., van Oers L., Pfister S., Pichler P., Russell A., Spini L., Tanikawa H., van der Voet E., Weisz H., West J., Wijkman A., Zhu B., Zivy R.: Assessing global resource use. 2017

Browne Alan, Barvosa-Carter William, Johnson Nancy, Momoda Leslie, Stanford Thomas: Electroactive polymer releasable fastening system and method of use. US20040074069A1, 2003

Building Smart International: What is openBIM®? online unter: <https://www.buildingsmart.org/about/openbim/openbim-definition/> (abgerufen am: 02. August 2022; 17:07)

Bundesministerium für Landwirtschaft Regionen und Tourismus, Bundesministerium für Verkehr Innovation und Technologie: #mission2030. Die österreichische Klima- und Energiestrategie, Wien 2018

Digikey: LoRaWAN® Technologies. online unter: <https://www.digikey.at/en/resources/iot-resource-center/lora> (abgerufen am 01. August 2022; 11:13)

DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: Eurocode 0 – Grundlagen der Tragwerksplanung, 2011

Dourlens-Quaranta Sophie, Carbonari Giulia, De Groote Maarten, Borragán Guillermo, De Regel Sofie, Toth Zsolt, Volt Jonathan, Glicker Jessica: Study on the Development of a European Union Framework for digital building logbooks – Final report, Belgium 2021

Eichelmann Uwe: UTCI (Universal Thermal Climate Index). 2019, online unter: <https://tu-dresden.de/bu/umwelt/hydro/ihm/meteorologie/forschung/glossar/hrc-utci-universal-thermal-climate-index> (abgerufen am 02. August 2022; 13:55)

Engel Heino: Tragsysteme / Structure Systems. Hatje Cantz Verlag GmbH, Deutschland 2009

Erturk Alper, Inman Daniel J.: Piezoelectric Energy Harvesting. John Wiley & Sons, 2011

European Commission: Europäischer Grüner Deal. 2019, online unter: https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_de (abgerufen am: 15. August 2022; 15:07)

EUROPEAN STANDARD: EN 15804:2012+A2:2019. Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte, 2019

Eurostat statistics explained: Waste statistics. online unter: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Waste_statistics, (abgerufen am: 25.02.2022)

Goger G., Piskernik M., Urban H.: Studie – Potenziale der Digitalisierung im Bauwesen. 2018

Gottlieb Binder GmbH Co. Kg: Verfahren zum Herstellen eines Befestigungssystems, insbesondere für Bauelemente fotovoltaischer Anlagen. EP20120008066, 2012

Grinfeld Michael A., Segletes Steven B.: Towards Mechanochemistry of Fracture and Cohesion. General Introduction and the Simplest Model of Velcro. Aberdeen 2010

Heinrich Matthias, Lang Werner: Materials Passports - Best Practice. München 2019

Heinrich, J: BIM in Ländervergleich: Wer führt bei der Nutzung in Europa? 2021, online unter: <https://www.planradar.com/at/bim-europavergleich/> (abgerufen am: 15. August 2022; 15:05)

Henning W.: Kreislaufwirtschaft als gesellschaftspolitische Herausforderung. In: GWP – Gesellschaft. Wirtschaft. Politik, 2021

Hering Ekbert, Schönfelder Gert: Sensoren in Wissenschaft und Technik. Funktionsweise und Einsatzgebiete. Vieweg+Teubner 2012

Ho T.C. E., Surry D., Morrish D.: NIST/TTU Cooperative Agreement – Windstorm Mitigation Initiative: Wind Tunnel Experiments on Generic Low Buildings. London, Ontario, Canada 2003

Hsu Chin-Lung, Lin Judy Chuan-Chuan: An empirical examination of consumer adoption of Internet of things services: Network externalities and concern for information privacy perspectives. In: Computers in Human Behavior, 2016

International Energy Agency, United Nations Environment Program: 2018 Global Status Report: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector. 2018

Jehle P, Seyffert S, Wagner S: IntelliBau - Anwendbarkeit der RFID-Technologie im Bauwesen. 2011

Jinmei Liu, Long Gu, Nuanyang Cui: Core-Shell Fiber-Based 2D Woven Triboelectric Nanogenerator for Effective Motion Energy Harvesting. 2019

Kangqi Fan, Chunchui Xu, Weidong Wang: Complete Charging for Piezoelectric Energy Harvesting System. Berlin 2014

Krüger Georg: Klettverschlüsse. Materialien, Herstellung, Prüfung, Anwendungen. München 2013

LEAD Innovation Management GmbH: Umsetzungsgrad: Bim Level und BIM Dimensionen. Online unter: <https://www.lead-innovation.com/blog/building-information-modeling/> (abgerufen am: 02. August 2022; 17:15)

Lund Anja, Rundqvist Karin, Nilsson Erik, Yu Liyang, Hagström Bengt, Müller Christian: Energy harvesting textiles for a rainy day. Woven piezoelectrics based on melt-spun PVDF microfibers with a conducting core. NPJ Flexible Electronics, 2018

Meeting mit Vertreter*innen der Stadtbaudirektion und des Umweltamtes der Stadt Graz, Projekt „City-Remixed“ (Land Steiermark), 10.12.2021

Mercadelli E., Sanson A., Galassi C.: Porous Piezoelectric Ceramics. In: Materials Science, 2010

Meschede Dieter: Gerthsen Physik. Berlin 2015

Momoda Leslie A., Browne Alan Lampe, Johnson Nancy L., Barvosa-Carter William, Stanford Thomas B.: Releasable fastening system based on ionic polymer metal composites and method of use. US5973701B2, 2002

NET-Automation GmbH: Datasheet NETBEE Autark. 2020

NET-Automation GmbH: Produkte. 2018, online unter: <https://www.net-automation.at/produkte/> (abgerufen am 01. August 2022; 10:55)

OpenAQ.: Open air quality. Online unter: https://openaq.org/#/map?_k=h4ftcg (abgerufen am 01. August 2022; 10:56)

Österreichisches Institut für Bautechnik: OIB-Richtlinie 1. Mechanische Festigkeit und Standsicherheit, 2015

PI Ceramic GmbH: P-111 – P-153 PICA Shear Scheraktoren. Online unter: <https://www.piceramic.de/de/produkte/piezokeramische-aktoren/scheraktoren/p-111-p-151-pica-shear-scheraktoren-102900/> (abgerufen am 01. August 2022; 10:45)

PI Ceramic GmbH: P-876 DuraAct Flächenwandler. Online unter:
<https://www.piceramic.de/de/produkte/piezokeramische-aktoren/flaechenwandler/p-876-duraact-flaechenwandler-101790/> (abgerufen am 01. August 2022; 10:45)

PI Ceramic GmbH: Piezoelektrische Materialien. Online unter:
<https://www.physikinstrumente.de/de/expertise/technologie/piezotechnologie/piezoelektrische-materialien/> (abgerufen am 18.08.2022; 18:53)

PI Ceramic GmbH: Piezoelektrische Scheiben, Online unter:
https://www.piceramic.de/de/produkte/piezokeramische-bauelemente/scheiben-staebe-und-zyylinder/piezoelektrische-scheiben-1206710/#imagegallery_grid-1 (abgerufen am 01. August 2022; 10:45)

PI Ceramic GmbH: PL112 – PL140 PICMA® Bender. Online unter:
<https://www.piceramic.de/de/produkte/piezokeramische-aktoren/biegewandler/pl112-pl140-picma-bender-103000/> (abgerufen am 01. August 2022; 10:45)

Piezo Hannas (Wuhan) Tech Co.,Ltd.: PZT Material Piezoceramic Tube for Acoustic Transducer (Datenblatt)

Piezosystem Jena GmbH: Serie N (Datenblatt). 2013

Piezosystem Jena GmbH: Serie P (Datenblatt). 2013

Piezosystem Jena GmbH: Series R and RA (Datenblatt). 2010

Q.met GmbH: Stadtklima. online unter: <https://www.wetter.net/wetterlexikon/eintrag/stadtklima> (abgerufen am 02. August 2022; 14:38)

Raudaschl Matthias: Klettbeton - Analyse und Herstellung verbindungsfähiger Betonstrukturen am Vorbild der Klettverbindung. Graz 2020

Rhoese Thomas: Trennwandssystem mit Wandelementen. DE202005006946U1, 2005

Riewe R., Oswald F., Pavicevic A., Kresevic Z., Raudaschl M.: Klett-TGA: Entwicklung von Klett-Befestigungssystemen für die Technische Gebäudeausrüstung. Wien 2019

Saint-Gobain ISOVER Austria GmbH: Vario® XtraSafe Klimamembran. Online unter:
<https://www.isover.at/produkte/varior/varior-xtrasafe-klimamembran> (abgerufen am: 15. August 2022; 15:00)

Schaumburg Andreas: Klettsystem in oder an einem Gebäude. DE202012003999U1, 2012

Schwede Dirk, Störl Elke: Methode zur Analyse der Rezyklierbarkeit von Baukonstruktionen, In: Bautechnik 94, 2017

Sigfox: Our story. 2022, online unter: <https://www.sigfox.com/en/sigfox-story> (abgerufen am 01. August 2022; 10:54)

Sto Ges.m.b.H: StoSystain R: Kletten statt kleben! Die Fassade der Zukunft. 2017, Online unter:
https://www.sto.at/media/documents/download_broschuere/kategorie_fassade/sto_systain_folder_-Ansicht-Neu.pdf (abgerufen am 16. Mai 2020)

Tachauer E, Provencher R, Banker S, Provost G: Fastening with wide fastening membrane. US20030070391A1, 2002

Tegel Project GmbH: FUTR HUB – Das Kompetenzzentrum für urbane Daten. Online unter: <https://www.berlintxl.de/das-projekt/futr-hub> (abgerufen am 01. August 2022; 10:43)

Trebut F, Pfefferer B: Anforderungen an die Kreislauffähigkeit von Massivbaustoffen, 2021

Uponor Vertriebs GmbH: Klett Nassbausystem. Online unter: <https://www.uponor.com/de-at/produkte/fussbodenheizung-und-kuehlung/klett-nassbausystem> (abgerufen am: 15. August 2022; 15:00)

Viezo: Technology. By transforming vibrations into electricity we allow rolling stock assets to monitor themselves without any human input. Online unter: <https://viezo.it/technology/> (abgerufen am: 08 Februar 2022; 11:34)

Wang Z. L.: Piezotronics and Piezo-Phototronics (Microtechnology and MEMS). Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2013

Abkürzungsverzeichnis

bzw.	Beziehungsweise
Ges. m. b. H.	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
s.g.	Sogenannte
usw.	und so weiter
u.v.m.	und viele mehr
z.B.	zum Beispiel
stellv.	Stellvertretend
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
BIM	Building Information Modeling
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
GmbH & Co. KG	Gesellschaft mit beschränkter Haftung & Compagnie Kommanditgesellschaft
μW	Mikrowatt
V	Volt
mV	Millivolt

J	Joule
kΩ	Kiloohm
MΩ	Megaohm
μA	Mikroampere
Ws	Wattsekunde
mA	Milliampere
nF	Nano-Farad
GSM	Global System for Mobile Communications
IoT	Internet der Dinge
LTEM	Long Term Evolution
TGA	Technische Gebäudeausrüstung
kWh/m ² a	Kilowattstunde pro Quadratmeter und Jahr
TU Graz	Technische Universität Graz
CFD	Computational Fluid Dynamics
kN	Kilonewton
N	Newton
MPa	Megapascal
mm	Millimeter
cm	Zentimeter
m	Meter
F&E	Forschung und Entwicklung
m/s	Meter pro Sekunde
N/m ²	Newton pro Quadratmeter
kg/m ³	Kilogramm pro Kubikmeter
Hz	Hertz

PVDF	Polyvinylidenfluorid
h	Stunden
s	Sekunden
JSON	JavaScript Object Notation
API	Programmierschnittstelle

A large, light blue geometric shape, resembling a right-angled triangle or a trapezoid, is positioned on the right side of the page. It has a vertical right edge and a horizontal top edge, with a diagonal line connecting the top-left corner to the bottom-right corner.

**Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)**

Radetzkystraße 2, 1030 Wien

[bmk.gv.at](https://www.bmk.gv.at)