

Dämmstofffreie High-Performance- Außenwand aus Ziegelmauerwerk

B. Freytag, H. Ferk, H. Gamerith

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

41/2023

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/>

Dämmstofffreie High-Performance- Außenwand aus Ziegelmauerwerk

Priv.-Doz. Dr.techn. Bernhard Freytag, DI Heinz Ferk,
Em.Univ.Prof. Horst Gamerith
Technische Universität Graz, Labor für Konstruktiven Ingenieurbau

Graz, Februar 2023

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	6
2	Abstract	8
3	Ausgangslage	10
	3.1. Die Außenwand -verantwortlich für die Energiebilanz eines Gebäudes-	10
	3.2. Dämmstoffreies Ziegelmauerwerk	11
	3.3. Mauerwerk mit dämmstoff-gefüllten Ziegeln	12
	3.4. Alternative Innovationsstrategien, eigene Entwicklungen.....	12
	3.5. Projektziel	13
4	Projekthalt	14
	4.1. Auswahl geeigneter Tone	14
	4.2. Optimierung des Ziegel-Lochbilds.....	15
	4.3. Herstellung prototypischer Ziegel.....	15
	4.4. Bauphysikalische Tests und Messungen	17
	4.4.1. Akustisches Verhalten	17
	4.4.2. Wärmeleitfähigkeit des Scherbens.....	17
	4.5. Mechanische Versuche	19
	4.5.1. Grundlegende Untersuchungen zur Druckfestigkeitsprüfung von Mauersteinen	19
	4.5.2. Druckversuche an TRALAM-Ziegeln.....	20
	4.5.3. Druckversuch am TRALAM-Mauerwerk	21
5	Ergebnisse	23
	5.1. Herstellbarkeit von TRALAM-Ziegeln	23
	5.2. Ergebnisse und Erkenntnisse im Bereich der wissenschaftlichen Grundlagen des Mauerwerksbaus.....	25
	5.2.1. Wärmeleitung – Mess- und Rechenmethoden	25
	5.2.2. Prüfung der Druckfestigkeit.....	26
	5.3. Fortschritte in der TRALAM-Technologie.....	27
	5.3.1. Lochbild.....	27
	5.3.2. Festigkeit der Ziegel.....	27
	5.3.3. Tragfähigkeit im Mauerwerksverband	28
	5.3.4. Luftschallschutz	29
	5.4. Beitrag zur „Stadt der Zukunft“	30
6	Schlussfolgerungen	31
7	Ausblick und Empfehlungen	33
8	Verzeichnisse	34

1 Kurzfassung

Über die Außenwand eines Gebäudes laufen, abhängig vom Dämmniveau, etwa 1/4 der Wärmeverluste zwischen innen und außen. Dies verdeutlicht die Bedeutung der Außenwand für den Energiebedarf eines Gebäudes. Aufgrund der steigenden Anforderungen in den Baugesetzen sinkt dieser Anteil, wobei heute häufig Wärmedämmverbundsysteme (WDVS) als Dämm-Maßnahme für Außenwände Verwendung finden. Damit kann zwar den Anforderungen für die Transmissionswärmeverluste entsprochen werden jedoch werden im Sinne der künftig immer wichtiger werdenden Stofftrennung, Rückbaubarkeit und der stofflichen Wiederverwertung zunehmend homogene Bausysteme auf mineralischer Basis am Markt gefordert. Die monolithische, mineralisch verputzte Ziegelmauer kann sowohl die Nachhaltigkeitsanforderungen als auch die hohen thermischen Anforderungen an städtische Wohn- und Bürogebäude erfüllen, wenn die Architektur, das Mauerwerk und der Ziegel dahingehend optimiert sind. Die derzeit am Markt befindlichen, thermisch optimierten, hochporosierten Ziegel, sind zu wenig tragfähig, um der städtischen Verdichtung Rechnung zu tragen und den dafür erforderlichen Mehrgeschoßwohnbau realisieren zu können. Es stellt sich nun die Frage, ob es möglich ist, die erforderlichen Festigkeitseigenschaften und die hohen Anforderungen an das thermische Verhalten in einem Ziegel zu vereinen.

DI Andreas Petermann widmete sich dieser Frage im Rahmen seiner Masterarbeit. Er wies theoretisch nach, dass mit einem neuartigen Lochbild (patentiert unter dem Namen TRALAM von Horst Gamerith) in Kombination mit einem „mittelschweren“ Scherben das Problem gelöst werden kann. Anhand einer Case-Study eines 8-geschossigen Wohngebäudes zeigte er, dass die Anforderungen an die Tragfähigkeit eines 50 cm-TRALAM-Mauerwerks bei einer Gebäudehöhe von 22m erreicht werden, der Heizwärmebedarf nach U-Wert-Verfahren jenem eines Wärmedämmverbundsystems entspricht und ein zusätzlicher solarer Energiegewinn über die nicht gedämmte, opake Außenfläche von mindestens 10% lukriert wird. Es ist klar, dass für die Steigerung der Tragfähigkeit ohne Veränderung der Scherbenfestigkeit mehr Ton gebrannt und verbraucht wird; mit all den damit verbundenen Auswirkungen auf die Kennwerte des ökologischen Fußabdrucks; aber lediglich des Fußabdrucks der Herstellung. Im Gegenzug wird mit dem High-Performance-Mauerwerk für die Schaffung ein und derselben Wohnfläche nur ein Drittel des Baugrundes und ein Drittel der Dachfläche benötigt, es wird bei 8-geschossigen Gebäuden keine zusätzliche Dämmung der Außenwand erforderlich und die Lebensdauer wird signifikant verlängert. Bei geeignetem Design trägt eine ausgewogene Speichermasse der Ziegel zur Dämpfung sommerlicher Überwärmung bei.

Um diese vielversprechenden, aber derzeit noch rein theoretischen Ergebnisse auch in die Realität übertragen zu können, ist eine umfassende, experimentelle Verifikation notwendig. Als erster Schritt soll in dem hier vorgestellten Sondierungsprojekt die Frage nach der industriellen Herstellbarkeit solcher Ziegel beantwortet werden. Der herstellungstechnische Knackpunkt ist die für das neue Lochbild erforderliche Reduktion der Luftspaltdicke der Ziegel von üblicherweise nicht weniger als 8 mm auf 4 mm.

Mit Hilfe der Erfahrung der österreichischen Ziegelindustrie, vertreten durch den Forschungsverein Steine-Keramik, wurde der am besten geeignete, in Österreich vorhandene Ton gesucht. Die Tests an den Rohstoffen und die Evaluierung derselben erfolgte am Ziegelforschungsinstitut Essen. Alle Tests

zur Herstellung der Ziegel wurden aus Kostengründen am Viertelstein durchgeführt. Für die nachfolgenden Versuche zur Bestimmung der wichtigsten Eigenschaften der gebrannten Testziegel wurden, wenn notwendig, die Viertelsteine zu Ganzsteinen verklebt. Schlussendlich wurden die so ermittelten Eigenschaften wie Druckfestigkeit, E-Modul, Mauerwerksfestigkeit, Wärmedurchlasswiderstand, Eigenfrequenzen und Schalldämmmaß zur Beurteilung der Qualität der hergestellten Testziegel herangezogen.

Die Herstellung eines Mundstücks für Ziegel mit 4mm-Luftspalten entpuppte sich als unproblematisch. Ebenfalls zeigte sich, dass das Extrudieren der Ziegel bei geeigneter Einstellung der Plastizität der Tonmischung kein Problem darstellt, obwohl sich bei der Vielzahl der Testziegel unerwünschte Querrisse einstellten. Diese Querrisse sind jedoch nur auf die ungleichmäßige Verdichtung, was der Überlastung des Laborextruders geschuldet ist, zurückzuführen und werden in einem industriellen Set-up nicht erwartet. Der Trocknungsprozess musste lediglich angepasst werden, um dem höheren Luftströmungswiderstand in den 4mm-Kanälen gerecht zu werden. Die neuartige Ziegelgeometrie verlangt eine um ca. 5 h verlängerte Vorheizphase im Brennprozess.

Der gebrannte Scherben und somit auch die Testziegel weisen eine unerwartet hohe Rohdichte auf, was sich in einer sehr hohen Druckfestigkeit aber leider auch in einer zu hohen Wärmeleitfähigkeit widerspiegelt. Die in der Literatur angegebenen Scherbenleitfähigkeiten, die den Ausgangspunkt der Entwicklung des TRALAM-Mauerwerks repräsentieren, konnten experimentell nicht bestätigt werden. Im Gegensatz dazu zeigten die Versuche deutlich höhere Festigkeiten, als es auf Basis des Stands der Technik und der Wissenschaft zu erwarten war. Die Druckfestigkeit am Einzelstein ist um ca. 30% höher als angestrebt. Sogar der Testversuch an einem Mauerwerkspfeiler, dessen Einzelsteine Querrisse aufwiesen, die im Endprodukt nicht vorhanden sein werden, zeigte ein sehr homogenes Bruchbild und eine unerwartet hohe Druckfestigkeit. Die dynamischen Untersuchungen am Einzelstein bestätigen die prognostizierte Qualität des TRALAM-Ziegels hinsichtlich seiner schallschutztechnischen Performance.

Da das Projekt zeigt, dass die industrielle Herstellung von Ziegeln mit sehr dünnen Luftspalten unproblematisch ist, macht es Sinn, alle weiteren Schritten, die bereits vor der Sondierung geplant wurden, in Angriff zu nehmen. Im Mittelpunkt des Folgeprojekts steht die Durchführung eines einjährigen, großmaßstäblichen Feldversuchs in einem der Prüfhäuser an der TU-Graz mit all den dafür notwendigen theoretischen Vor- und Auswertearbeiten. In diesem Versuch soll die tatsächliche Gesamtenergiebilanz der dämmstofffreien TRALAM-Außenwand messtechnisch bestimmt werden und den Anforderungen der Norm, die aufgrund der physikalischen Unvollständigkeit der verwendeten Rechenmodelle die Wärmedämmverbundsysteme bevorzugt behandelt, gegenübergestellt werden. In diesem Großversuch muss in jedem Fall mit ganzen Steinen gearbeitet werden, was eine enge Kooperation mit der Ziegelindustrie erfordert. Da noch nicht alle angestrebten Ziegeleigenschaften im Sondierungsprojekt erreicht werden konnten, bedarf es weitergehender Untersuchungen, wie diese zu erreichen sind, bevor die prototypische Produktion der Ganzsteine gestartet wird. Es gibt drei Schrauben an denen zu drehen ist: (i) Änderungen in der Tonmischung (Reduktion der Rohdichte und der Wärmeleitfähigkeit); (ii) Nutzen der festgestellten Festigkeitsreserven: die Festigkeit kann auch mit weniger Tonanteil erreicht werden, was mit einer wärmetechnischen Verbesserung des Ziegels einhergeht; (iii) Wenn vom aktuell sehr feinen Rastermaß des Ziegelverbands abgegangen wird, eröffnet sich ein großes wärmetechnisches Potenzial aufgrund gelockerter Randbedingungen für das Lochbild.

2 Abstract

One quarter of all heat flows between the interior and exterior of a building passes through the exterior wall. This illustrates the importance of the exterior wall on the energy demand of a building. Driven by legal regulations on "energy saving and thermal insulation", external thermal insulation composite systems have become established. Although these fulfil the required thermal insulation properties, they cause air temperatures in neighbourhoods to rise in summer, they hinder the wall from extracting solar thermal energy during the heating season and they have to be disposed of as hazardous materials at the end of their relatively short service life. The monolithic, mineral plastered brick wall, on the other hand, can meet both the sustainability requirements and the high thermal requirements of urban residential and office buildings as long as the architecture, the masonry and the brick are optimised for this purpose. The thermally optimised, highly porous bricks currently on the market are weak. They cannot be used to realise the architecture of choice, namely multi-storey housing. The question now arises as to whether it is possible to combine the required strength properties and the high demands on thermal behaviour in one brick.

DI Andreas Petermann addressed this question as part of his master's thesis. He proved theoretically that the problem can be solved with a new layout of the air chambers (patented under the name TRALAM by Horst Gamerith) in combination with a "medium-weight" clay. Based on a case study of an 8-storey residential building, he showed that the load-bearing capacity requirements of a 50cm TRALAM masonry are achieved for a building height of 22m, the heating requirement according to the U-value method corresponds to that of a composite thermal insulation system and furthermore, 10% additional solar energy can be gained via the non-insulated opaque outer surface. It is obvious that an increase of the load-bearing capacity without changing the fired clay strength, more clay has to be fired and consumed. Thus, all the associated characteristic values of the ecological footprint become worse but only those of the production's footprint. In return, the high-performance masonry requires only one third of the building ground and one third of the roof area to create the same living space, no insulation material is used in 8-storey buildings, the service life is significantly extended, and it brings solar energy gains in winter as well as a reduction of overheating in summer.

In order to be able to transfer these promising, but currently still purely theoretical results to reality, comprehensive, experimental verification is necessary. As a first step, the exploratory project presented here aims at answering the question of the industrial manufacturability of such bricks. The production-related sticking point is the reduction of the air gap thickness of the bricks from usually no less than 8 mm to 4 mm. This is necessary for the new air chamber layout.

With the help of the experience of the Austrian brick industry, represented by the "Forschungsverein Steine-Keramik", the most suitable clay available in Austria was sought in this project. The tests on some clays delivered and the evaluation of the same were carried out at the Ziegelforschungsinstitut Essen. All tests regarding the production of the bricks were carried out on quarter bricks for financial reasons. For the subsequent tests to determine the most important properties of the fired test bricks, the quarter bricks were glued together to form whole bricks, if necessary. Finally, the properties determined in this way, such as compressive strength, modulus of elasticity, masonry strength, thermal resistance, natural frequencies and sound reduction index, were used to assess the quality of the manufactured test bricks.

The production of an extrusion nozzle for bricks with 4mm air gaps turned out to be unproblematic. Likewise, it turned out that extruding the bricks was not a problem if the plasticity of the clay mixture was adjusted appropriately. However, undesirable transverse cracks appeared in a large number of test bricks. These cracks are only due to the non-homogeneous compaction, which is due to the overloading of the laboratory extruder. Such cracks are not expected if an industrial set-up is used. The drying process had to be slightly adjusted to accommodate the higher airflow resistance in the 4 mm chambers. The new brick geometry requires a preheating phase in the firing process that is extended by approx. 5 hours.

The fired body and thus also the test bricks have an unexpectedly high bulk density, which is reflected in a very high compressive strength but unfortunately also in a high thermal conductivity. The conductivity of fired material given in the literature, which represents the starting point for the theoretical development of TRALAM masonry, could not be confirmed experimentally. In contrast, the tests showed significantly higher strengths than expected based on the state of the art and science. The compressive strength on the single brick is approx. 30% higher than targeted. Even the experiment on a masonry body, whose individual bricks showed transverse cracks that will not be present in the final product, showed a very homogeneous fracture pattern and an unexpectedly high compressive strength. The dynamic tests on the single brick confirm the predicted quality of the TRALAM brick with regard to its soundproofing performance.

Since the project shows that the industrial production of bricks with very thin air gaps is unproblematic, it makes sense to tackle all the further steps that were already planned before this exploratory project. The focus of the follow-up project is to carry out a one-year, large-scale field test in one of the test houses at the TU-Graz with all the necessary theoretical preparation and evaluation work. In this test, the actual thermal energy balance of the insulation-free TRALAM exterior wall is to be determined by measurement and compared with the demands of the Austrian standard. It must be mentioned that the standard gives preferential treatment to composite thermal insulation systems due to the use of physically incomplete calculation models. In this large-scale test, whole bricks must be used in any case, which requires close cooperation with the brick industry. Since it has not yet been possible to achieve all the desired brick properties in the exploratory project, further research on how these can be achieved is needed before prototypical production of the whole bricks will start. There are three screws to be turned: (i) changes in the clay mixture (reduction of bulk density and thermal conductivity); (ii) utilisation of the observed strength reserves: the strength needed can also be achieved with less clay content, which goes hand in hand with a thermally improvement of the brick; (iii) if the currently very fine grid size of the brick bond is extended, a large potential for thermal improvement opens up due to relaxed boundary conditions for the air chamber layout.

3 Ausgangslage

3.1. Die Außenwand -verantwortlich für die Energiebilanz eines Gebäudes-

Die Außenwand ist ein wichtiger Leistungsträger für ein funktionierendes Klima im Innenraum des Gebäudes. Aus Sicht des Energiebedarfs für ein Gebäude hat die Außenwand, je nach wärmetechnischer Konzeption, etwa zu einem Viertel bis zu einem Fünftel Anteil an den vorhandenen Wärmeströmen, die Fenster und Außentüren in dieser Wand etwa ein weiteres Viertel bis über ein Drittel.

Im städtischen Wohnbau haben sich in den letzten Jahrzehnten im Zusammenhang mit den in der OIB Richtlinie 6 „Energieeinsparung und Wärmeschutz“ laufend verschärften Anforderungen und aufgrund des am Markt immer vorhandenen Strebens nach kostengünstigen Systemen die Wärmedämm-Verbundsysteme (WDVS) etabliert. Dabei übernimmt in den meisten Fällen eine Stahlbetonwand oder eine Ziegelwand die tragende Funktion und eine außen durch Verklebung angebrachte Dämmstoffschichte die wärmedämmende Funktion. Die verwendeten Dämmstoffe reichen von geschäumten Kunststoffen (EPS, PUR, XPS, Bakelit) bis hin zu Mineralwolle, seltener aber auch Hanf, Perlite, Mineralschaum oder z.B. Holzfaserplatten. Neben der Tatsache, dass die Trennung des Dämmstoffs vom Beton oder Ziegel mit vertretbarem Aufwand derzeit nicht möglich ist, sind einige der früher häufig verwendeten Dämmstoffe (EPS mit HBCD, Mineralwolle mit gefahrenrelevanten Fasereigenschaften) heute als Gefahrenstoff [BAWP (Bundes-Abfallwirtschaftsplan bzw. BGBl. I 58/2017 Altlastensanierungsgesetz] zu behandeln; ein Fakt, der den Weg zu klimaneutralen Städten keinesfalls unterstützen kann.

Die außen angeordnete Dämmstoffschichte erfüllt zwar die Anforderungen an eine Außenwand hinsichtlich Wärmedämmung und bei entsprechender Ausführung auch hinsichtlich des erforderlichen Schlagregenschutzes, gleichzeitig verhindert aber genau diese außenliegende Dämmschichte den Eintrag solarer Wärmeenergie in der kalten Jahreszeit über die große „Nicht-Fenster“-Außenfläche. Dieser Teil des solaren Energiegewinns wird aktuell bei der Berechnung des Heizwärmebedarfs eines Gebäudes generell nicht berücksichtigt (ÖNORM EN ISO 52016-1: Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Energiebedarfs für Heizung und Kühlung, Innentemperaturen sowie der Heiz- und Kühllast in einem Gebäude oder einer Gebäudezone – TEIL 1: Berechnungsverfahren). Aufgrund dieses formalen, methodischen Missstands werden Wärmedämmverbundsysteme im Vergleich zu monolithischen Außenwänden unterbewertet, insbesondere, wenn der so genannte U-Wert vergleichbar ausfällt. Bumann errechnet solare Zugewinne über die opake Außenwand zwischen 10 und 20% [1].

Darüber hinaus führt die außenliegende Wärmedämmung zu einem raschen Aufheizen der Oberfläche bei solarer Einstrahlung, wodurch sich die Umgebungstemperaturen eines Stadtquartiers deutlich erhöhen. Dies stellt insbesondere hinsichtlich der zunehmenden Sommertemperaturen im Zuge des Klimawandels ein großes Problem dar. Aufgrund der geringen Speichermasse der dünnen Putzschichten auf WDVS müssen die Putze hydrophobiert werden und mit Algiziden behandelt werden, um Schimmel-, Algen- und Pilzbildung an den Putzflächen zu vermeiden. Diese werden mit

Schlagregen und unter UV-Belastung im Laufe der Jahre ausgewaschen und landen in unseren Gewässern, mit entsprechend negativen Auswirkungen auf die Umwelt.

Mineralischer Putz, wie er bei monolithischer Ziegelbauweise zur Anwendung kommt, kann hingegen Feuchtigkeit aufnehmen und speichern, und bei erneuter Sonneneinstrahlung kommt ein Verdunstungsprozess in Gange, der für eine Kühlung der Oberfläche und eine Verzögerung der Erwärmung der Wand sorgt. Eine gute, mittlere Wirkung als Speichermasse an der Innenseite bringt den Vorteil mit sich, dass es zum einen zu einer Dämpfung der Mittagsspitze der Temperatur im Raum kommt, zum anderen aber – bei vorhandener Lüftungswirksamer Kühlung – auch noch ein ausreichend rasches Abkühlen der Wand abends im Schlafzimmer möglich macht.

3.2. Dämmstofffreies Ziegelmauerwerk

Der Ziegel, einer der ältesten Baustoffe, wurde ursprünglich als kleinformatiger Vollziegel im Verband vermauert. Für die Entwicklung zu den heute üblichen, großformatigen Hochlochziegeln stehen zwei treibende Faktoren. Einerseits die Verschiebung der Wertigkeit von den Rohstoffen hin zur Arbeitskraft und andererseits das Streben nach immer besseren, wärmedämmenden Eigenschaften. Es wurde sowohl an den dämmenden Eigenschaften des Materials an sich (Scherben), als auch am Lochbild gearbeitet. Ein für alle physikalischen Eigenschaften des Mauerwerks wichtiger Aspekt, der Ziegelverband, wurde in diesem Prozess zugunsten verringerter Aufwandszeiten hintangestellt. Stellvertretend für den aktuellen Zenit dieser Entwicklung wird hier beispielhaft der für ein 50 cm dickes Mauerwerk verwendete Ziegel „Vital Solex Plan“ der Fa. Leitl angeführt (Abbildung 1)

Abbildung 1: Ziegelstein „Vital Solex Plan“ von Leitl [2]



Die Tragfähigkeit des Mauerwerks ist zugunsten der Wärmedämmeigenschaften so weit gesunken, dass sich Gebäude mit solchen Ziegeln nur mit bis zu maximal 3 Geschossen realisieren lassen; eine Tatsache, die dem Ziegel als Wandbaustoff in monolithischer Bauweise im städtischen Bereich, wo Grundflächen knapp sind und deshalb in die Höhe gebaut werden muss, die Wettbewerbsfähigkeit genommen hat.

Im vergangenen Jahrzehnt gab es die ersten Initiativen, das Ziegelmauerwerk neben dem klassischen Einfamilienhausbau auch wieder im städtischen Mehrgeschossbau zu forcieren. Als Beispiel sei hier das Low-Tech-Bürogebäude 2226 in Lustenau mit 6 Geschossen angeführt (siehe Abbildung 2 links). Es wurde die Strategie verfolgt, die erforderliche Wärmedämmung der Außenhülle durch zwei Mauerwerksschalen (je 38cm dick) mit einer dämmenden äußeren Ziegelschicht mit einer geringen Druckfestigkeit und einer tragenden inneren Ziegelschicht mit erhöhter Druckfestigkeit zu erreichen.

Die Außenwand hat somit eine Gesamtdicke von ca. 78 cm ohne Verputz. Das Gebäude ist ein Haus ohne Heizung (nur innere Lasten werden genutzt), ohne mechanische Lüftung, ohne Kühlung und ohne Sonnenschutz. Das Gebäude ist seit 2013 in Betrieb und funktioniert seither problemlos ohne besonderen technischen Einsatz. Es ist ein sehr intelligent geplantes und gebautes System der „Selbstregelung“, wobei ein Konzeptbestandteil die große Speicherfähigkeit und die Möglichkeit der Energieaufnahme über die Außen-Oberfläche der massiven Wand ist [3].

Abbildung 2: links: Low-Tech-Bürogebäude 2226 in Lustenau (Bildquelle [4]); rechts: 8-geschoßiges Wohnquartier in Regensburg (Bildquelle [5])



3.3. Mauerwerk mit dämmstoff-gefüllten Ziegeln

Eine ähnliche Zielrichtung der Gebäudearchitektur wurde in Regensburg beim Bau eines achtgeschossigen Wohnhauses verfolgt [2]. Bei diesem Bauvorhaben wurde ein 42,5cm dicker mit Perlit gefüllter porosierter Hochlochziegel verbaut.

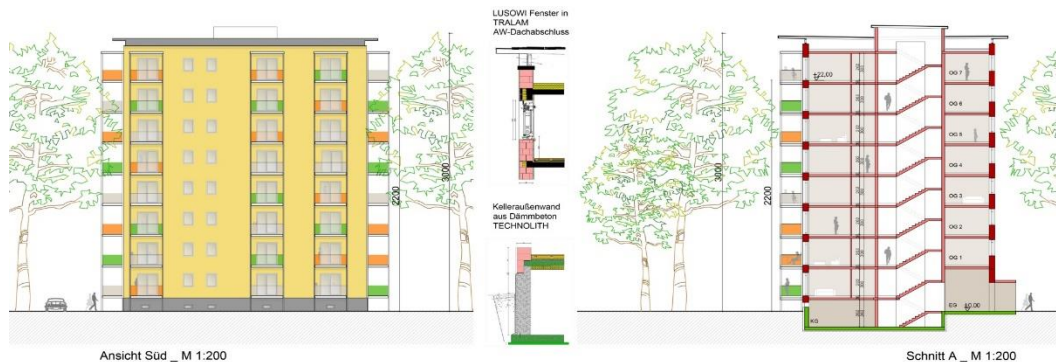
In Österreich wurde etwa zeitgleich von der Fa. Wienerberger das Ziegelsystem „Porotherm W.i“ entwickelt. Dabei sind die Hohlkammern des Ziegels deutlich vergrößert und mit Mineralwolle gefüllt. Mit diesem Ziegel können 6-geschossige Bauwerke mit sehr guten Wärmedämmeigenschaften errichtet werden, wie es z.B. mit einem Wohnhaus in der Seestadt Aspern gezeigt wurde [6], [7].

3.4. Alternative Innovationsstrategien, eigene Entwicklungen

Loibner schreibt 2019 [8] „Auch Ziegel wollen hoch hinaus“ und stellt dabei die Prototherm W.i-Philosophie dem in diesem Projekt vorgeschlagenen Ansatz „TRALAM“ (Patentschrift AT 520195 B1 2019-02-15, Inhaber und Erfinder Horst Gamerith) gegenüber. TRALAM steht für „Tragende Lamellen“ und verfolgt 3 Ziele. (i) Erhöhung der Ziegeltragfähigkeit durch Verringerung des Lochanteils bei gleichzeitiger (ii) Reduktion der Wärmeleitfähigkeit durch Verkleinern der Luftspalte und (iii) die Verbesserung der bauphysikalischen Mauerwerkseigenschaften und Anschlüsse durch intelligente Ziegelverbandslösungen. Die Grundidee basiert auf der Tatsache, dass durch Verkleinerung des Luftspaltmaßes die wärmedämmende Wirkung des Luftspaltes verbessert wird. Laut ÖN EN ISO 6946 ergibt sich, dass zwei 4 mm Spalte eine um 43% höhere Wärmedämmwirkung haben als ein 8mm Luftspalt [9]. Alle Anschlussdetails lassen sich in einem 12,5 cm-Verbandsraster

bewerkstelligen. Das Mauerwerk basiert auf einem kleinformatigen 25x25 cm-Grundstein, der sich per Sägeschnitt im Verbandsrastermaß einfach teilen lässt. Der kleinste mögliche Teilstein misst 12,5 x 6,25 cm. Jeder abgetrennte Teil besitzt robust gestaltete Außenlamellen. Im Rahmen einer Masterarbeit [9] wurde das TRALAM-Mauerwerk mit theoretischen Methoden hinsichtlich der mechanischen und bauphysikalischen Performance im 8-geschossigen Wohnbau analysiert (siehe Abbildung 3).

Abbildung 3: Ansicht und Schnitt eines 8-geschoßigen Wohngebäudes aus TRALAM-Mauerwerk



Ein weiterer Ansatz zur Verbesserung der mechanischen und bauphysikalischen Eigenschaften monolithischen Ziegelmauerwerks ist die Verbesserung der Eigenschaften des gebrannten Tonmaterials (Scherbe). Das ist ein Ziel, das unter anderem im FFG Projekt „Innovative Brick 2“ angestrebt wird. Es wird versucht, durch die Bildung spezieller Mikroporen die Scherbenfestigkeit zu verbessern und die Brenntemperatur zu senken. Dabei wird das Ziel angestrebt, 15% des Energieverbrauchs bei der Ziegelherstellung einzusparen und weitere Reduktion der Treibhausgasemissionen durch die gleichzeitig verbesserten Wärmedämmeigenschaften zu lukrieren [10], [11].

3.5. Projektziel

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass der mehrgeschossige, städtische Wohn- und Bürobau aus monolithischem Ziegelmauerwerk einen großen Beitrag zur Verbesserung der Energiebilanz von Gebäuden, Quartieren und Städten nicht nur leisten kann, sondern in Zukunft auch leisten wird müssen. Sowohl der makrostrukturelle Ansatz am Ziegel- und Verbandsdesign (TRALAM) als auch der im Projekt INNOVATIVE BRICK 2 verfolgte mikrostrukturelle Ansatz am Scherben haben großes Potential. Im besten Fall werden die Ziegel der Zukunft aus innovativem Scherben in optimiertem TRALAM-Design mit 4 mm Luftspalten hergestellt.

Zur Herstellung von Hochlochziegeln mit nur 4 mm dicken Luftspalten gibt es aber bis jetzt weder praktische Erfahrungen noch wissenschaftliche Erkenntnisse. Seitens der Ziegelindustrie wird die Herstellung als sehr problematisch eingeschätzt. Ziel des Projekts HPZ-Mauerwerk ist es nun, zu zeigen, dass Hochlochziegel mit 4 mm Luftspalten unter Anwendung möglichst konventioneller Methoden hergestellt werden können. Das Ergebnis dieses Sondierungsprojekts soll als Grundlage dienen, um weitere notwendige Forschung im Sinne experimenteller, wissenschaftlicher Verifikation der theoretischen Ergebnisse hinsichtlich des Energie-Haushalts von vielgeschossigen Gebäuden mit Außenwänden aus monolithischem Ziegelmauerwerk starten zu können.

4 Projektinhalt

Der Nachweis, dass sich TRALAM-Ziegel praktikabel herstellen lassen, wurde über Herstellungstests im Labor geführt. Für die Beurteilung der Herstellungsqualität wurden bestimmte Eigenschaften der Testziegel ermittelt. Als anzustrebende Zieleigenschaften wurden folgende definiert:

- Wärmedurchgang: U-Wert $\leq 0,22 \text{ W/m}^2\text{K}$ bezogen auf 50cm Dicke
- günstiges schalltechnisches Verhalten mit Vermeidung von Resonanzeinbrüchen (Analyse über das modale Verhalten des Steins); Mindestschalldämmung des beidseitig verputzten Mauerwerks $R_w \geq 43 \text{ dB}$
- charakteristische, normierte Steindruckfestigkeit $> 21,5 \text{ N/mm}^2$

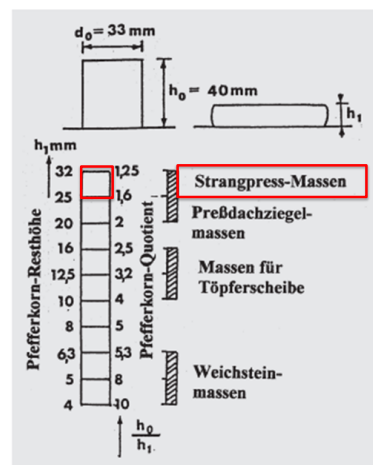
Das Vorgehen wurde in folgende Arbeitspakete strukturiert, die im Großen und Ganzen hintereinander abgearbeitet wurden:

- Auswahl geeigneter Tone
- Optimierung des Ziegel-Lochbilds
- Herstellung prototypischer Ziegel
- Bauphysikalische Tests und Messungen
- Mechanische Versuche

4.1. Auswahl geeigneter Tone

Eine Vorauswahl geeigneter Tonmischungen wurde vom Forschungsverein Steine-Keramik getroffen. Drei der Mischungen wurden hinsichtlich ihrer Plastizität im sogenannten Pfefferkorn-Versuch (siehe Abbildung 4) am Ziegelforschungsinstitut in Essen untersucht. Anhand dieser Analyse wurde entschieden, mit welcher Tonmischung die geplanten Herstellungstests durchgeführt werden.

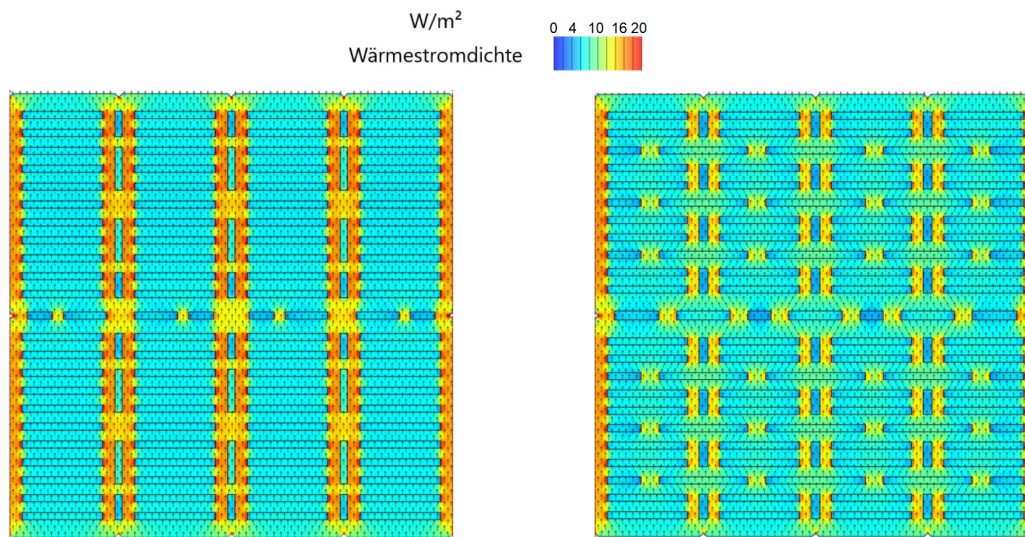
Abbildung 4: Pfefferkornversuch – links: Versuchsaufbau; rechts: Auswertung



4.2. Optimierung des Ziegel-Lochbilds

Auf Grundlage der Ergebnisse der Masterarbeit von DI Andreas Petermann [9] wurde eine weitere Optimierung des Lochbildes vorgenommen. Die Optimierungskriterien waren der Wärmedurchgang, die Steindruckfestigkeit, eine weitestgehend ungestörte Kraftübertragung der Vertikalkräfte im Ziegelverband und eine für das Zerschneiden der Ziegel auf der Baustelle praktikable Anordnung der Trennspalte. Für den Optimierungsprozess wurden in erster Linie numerische Methoden zur Simulation [HTflux] der Wärmeströmung durch den Ziegel angewandt (siehe Abbildung 5). Der Optimierungsprozess erforderte 8 Schritte.

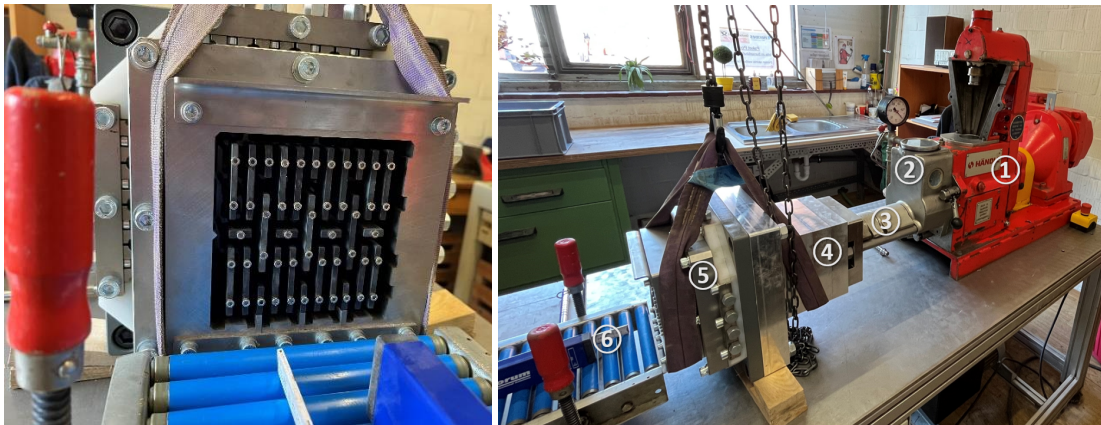
Abbildung 5: Lochbild des TRALAM-Ziegels vor (links) und nach der Optimierung(rechts)



4.3. Herstellung prototypischer Ziegel

Die Herstellung prototypischer Ziegel erfolgte aufgrund der Größe des zur Verfügung stehenden Laborextruders (siehe Abbildung 6) in zwei Schritten. Zuerst wurden Viertelsteine extrudiert, getrocknet und gebrannt, danach wurden diese beschliffen und miteinander zu einem Ganzstein verklebt. Aus der optimierten Lochbildgeometrie wurde eine sogenannte Nasszeichnung, die für die Produktion des Mundstücks erforderlich ist, angefertigt. Die Nasszeichnung berücksichtigt, dass der Ziegel beim Trocknen und Brennen schwinden wird und ist somit genau um dieses Maß größer als das gewünschte Endmaß. Das Einstellen des erforderlichen Wassergehalts, um den Ton möglichst gut mit dem Extruder verarbeiten zu können, ist ein empirischer Prozess. Leider war es nicht möglich, die Verarbeitbarkeit der Tonmischung so zu gestalten, dass die Druckverhältnisse im Presskopf zu einer durchgehend homogenen Verdichtung führten.

Abbildung 6: links: Mundstück; rechts: Laborextruder



1. Vakuum-Labor-Schneckenpresse, 2. Vakuumkammer der Schneckenpresse, 3. Kopplung zwischen Schneckenpresse und Presskopf, 4. Presskopf, 5. Mundstück, 6. Rollen

Das Trocknen der Ziegel erfolgte in einem Kammertrockner bei Raumtemperatur, um eine möglichst langsame Trocknung der Ziegel zu gewährleisten. Mit einer Zwischendecke, die knapp an die Ziegeloberkanten abgesenkt wurde, wurde versucht, die eingeblasene Luft möglichst durch die engen Hohlräume der Ziegel zu leiten. Die Luft wurde wechselweise von links und von rechts für jeweils 20 Minuten eingeblasen.

Um eine geeignete Brennkurve für die Ziegel zu finden, wurde ein Probebrand mit den für diese Tonmischung sonst üblichen Brennparametern durchgeführt. Das Ergebnis des Probebrands war nicht zufriedenstellend (siehe Abbildung 7). Die meisten Ziegel wiesen einen schwarzen Kern auf, was auf zu geringe Sauerstoffzufuhr hindeutet. Die Ausrichtung der Luftkammern der Ziegel und die Art des Schlichtens hatten Einfluss auf die Ausprägung des schwarzen Kerns. Durch Anpassen der Brennkurve wurden in weiterer Folge sehr zufriedenstellende Ergebnisse erzielt. In Summe wurden 200 Viertelsteine in Handarbeit produziert.

Abbildung 7: links: Ziegel vor dem Brennen; Mitte: Ziegel mit schwarzem Kern; rechts: Ziegel nach dem angepasstem Brennprozess



Die Verklebung von Viertelsteinen zu Ganzsteinen wurde bereits vor dem Herstellen der Viertelsteine an handelsüblichen Ziegeln getestet. Das Verkleben mit Epoxidharzmörtel erwies sich als praktikabel. Ein eventueller Einfluss der Verklebung auf das physikalische Verhalten eines Ziegels wurde mit Hilfe einer Modalanalyse im Vergleich zwischen geklebtem und nicht geklebtem Ziegel untersucht. Bei einer Modalanalyse wird der Probekörper z.B. mit einem Impulshammer an unterschiedlichen

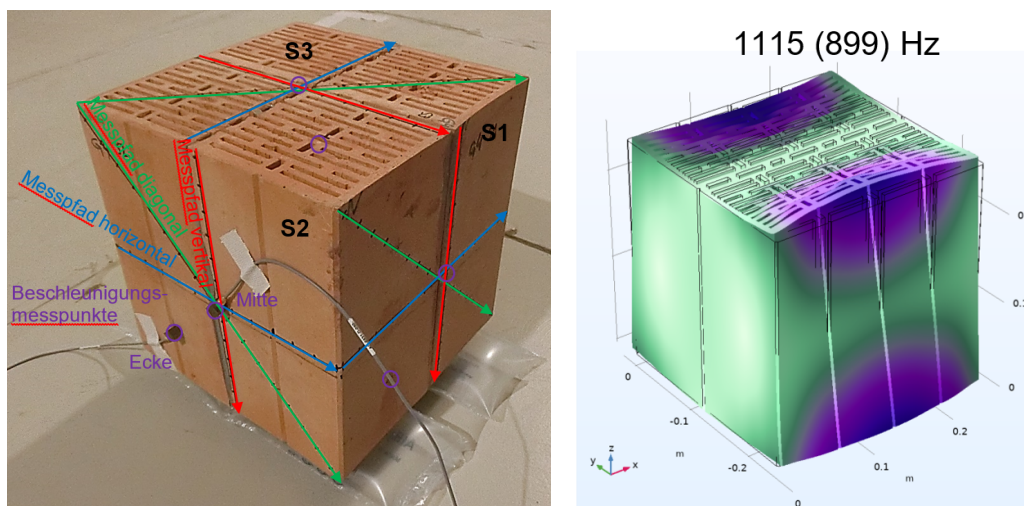
Punkten zum Schwingen angeregt, wobei die eingeleitete Kraft und die dadurch in anderen Punkten erzeugte Beschleunigung gemessen wird. Aus diesen Messergebnissen werden in weiterer Folge die Eigenfrequenzen des Probekörpers ermittelt.

4.4. Bauphysikalische Tests und Messungen

4.4.1. Akustisches Verhalten

Die oben beschriebene Modalanalyse wird auch im Zuge der bauphysikalischen Tests und Messungen am TRALAM-Ziegel angewandt. Hier wird jedoch parallel zur experimentellen Modalanalyse ein numerisches Rechenmodell des Ziegels erstellt, mit dem die Eigenmoden in weiterer Folge simuliert werden (siehe Abbildung 8). Durch Variation der Materialsteifigkeit (Elastizitätsmodul) kann die Berechnung sehr genau an die Messergebnisse angepasst werden. Als Endergebnis erhält man das dynamische Elastizitätsmodul des Scherbens und jene Frequenzen, mit denen sich der Ziegel besonders gut zum Schwingen und somit zur Übertragung von Schall (Lärm) anregen lässt. Mit dem so gewonnenen Elastizitätsmodul wurde das Luftschalldämmmaß einer 50cm dicken TRALAM Wand wiederum mit einem Rechenmodell ermittelt.

Abbildung 8: links: Zusammengeklebter Ganzstein inkl. Messpfade; rechts: zweite Eigenfrequenz und Eigenform des Ziegels



4.4.2. Wärmeleitfähigkeit des Scherbens

Um möglichst viele Erkenntnisse zum Wärmeleitverhalten des Ziegels zu erhalten, wurden mehrere experimentelle Methoden eingesetzt. Die Wärmeleitfähigkeit des Scherbens wurde direkt an plattenförmigen Kleinproben mit zwei ähnlichen Verfahren gemessen: (i) Hot-Disk-Verfahren und (ii) Isomet-Verfahren (siehe Abbildung 9). Die verwendeten Hot-Disk Sensoren bestehen aus einer elektrisch leitenden Doppelspirale aus Nickel, welche zwischen zwei dünnen Schichten Isoliermaterial (Kapton) eingebettet ist. Bei den Messungen wird der flache Sensor zwischen zwei Materialproben, d.h. in diesem Fall zwischen zwei plangeschliffenen Ziegelscherben, platziert, eine zuvor definierte elektrische Spannung (Heizleistung) angelegt, und der Widerstand, also die Temperaturerhöhung über die Zeit, aufgezeichnet. Der Hot Disk Sensor dient somit als Heizquelle und als

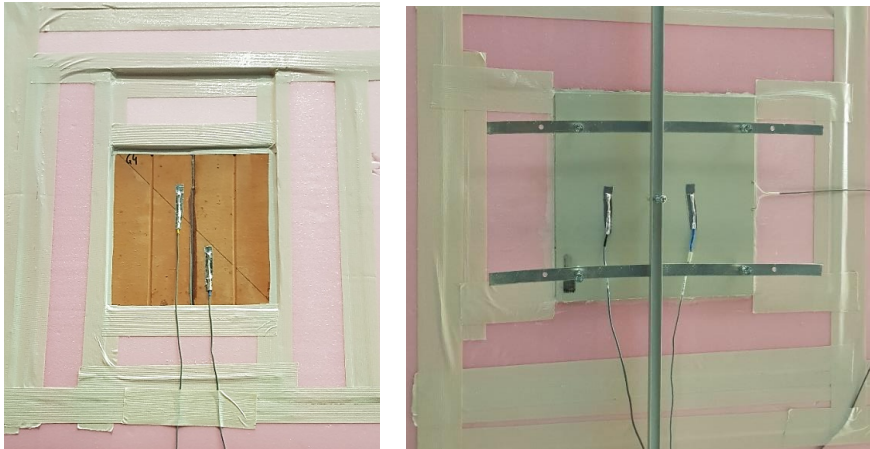
Temperatursensor. Beim Messsystems ISOMET 2114 in Kombination mit einer im Durchmesser 6 cm großen „Surface Probe“ für harte Materialien werden Wärmeflussimpulse über ein elektrisches Widerstandsheizelement ins Probenmaterial einseitig eingebracht und die Temperaturantwort des Materials als Funktion der Zeit gemessen. Der verwendete Messbereich der „Surface Probe“ lag im Bereich 0,3 bis 3,0 W/(mK). Da der Hersteller eine minimal benötigte Probendicke von 20 bis 40 mm je nach Beschaffenheit angibt, wurden aus einem TALAM-Ziegel zwei rd. 1 cm dicke Proben herausgeschnitten, an den Kontaktstellen plangeschliffen und für die Messung übereinandergelegt. Diese Messung wurde einmal auf einer XPS-Platte und einmal auf einer Stahlplatte durchgeführt, um abschätzen zu können, ob die Messung beim gegenständlichen Material mit ca. 20 mm Probendicke durch die Unterlage beeinflusst wird. Auch wurden Vergleichsmessungen mit einer Schicht Wärmeleitpaste zwischen den beiden Ziegelscherben, sowie in Ergänzung dazu auch zwischen der „Surface Probe“ und dem oberen Ziegelscherben als auch zwischen dem Ziegelscherben und der Stahlplatte bzw. der XPS-Platte durchgeführt.

Abbildung 9: links: Messaufbau des Hot-Disk-Verfahrens; rechts ISOMET Messung



Die Wärmeleitfähigkeit des Ziegels wurde in einem Wärmedurchgangsvorversuch bestimmt. Dabei wurde ein verklebter TRALAM-Ziegel in einer sogenannten Hotbox-Messanlage so eingebaut, dass der Wärmestrom zwischen zwei unterschiedlich temperierten Kammern durch den Ziegel verläuft (siehe Abbildung 10). Der Temperaturunterschied der Luft zwischen den beiden Kammern betrug 20°C. Auf einer Seite des Ziegels wurde auf der dafür plangeschliffenen Oberfläche eine Messplatte zur Messung des Wärmestroms (Almemo FQA019C 25x25cm) mit einer dünnen Schicht Wärmeleitpaste appliziert. Zusätzlich wurde die Oberflächentemperatur des Ziegels bzw. der Wärmeflussplatte mittels NTC-Temperatursensoren an jeweils zwei Stellen der zum „kalten“ und „warmen Klima“ zugewandten Seiten gemessen, um den Versuch hinsichtlich des Wärmedurchlasswiderstands auswerten zu können. Nach Erreichen eines stationären Temperaturzustandes wurden die aufgezeichneten, fünfminütigen Werte dieser 5 Messpositionen über einen Zeitraum von ca. 1,5 Tagen gemittelt. Aus dem Messergebnis wurde zu Vergleichszwecken mit Hilfe einer numerischen Simulation dieses Versuchs die Scherbenleitfähigkeit rückgerechnet. In weiterer Folge wurde ein Rechenmodell einer 50cm dicken TRALAM-Wand mit Innen- und Außenputz mit dieser Scherbenleitfähigkeit erstellt und der sogenannte U-Wert (Wärmedurchgangskoeffizient) ermittelt.

Abbildung 10: Versuchsaufbau der Hot-Box-Messung



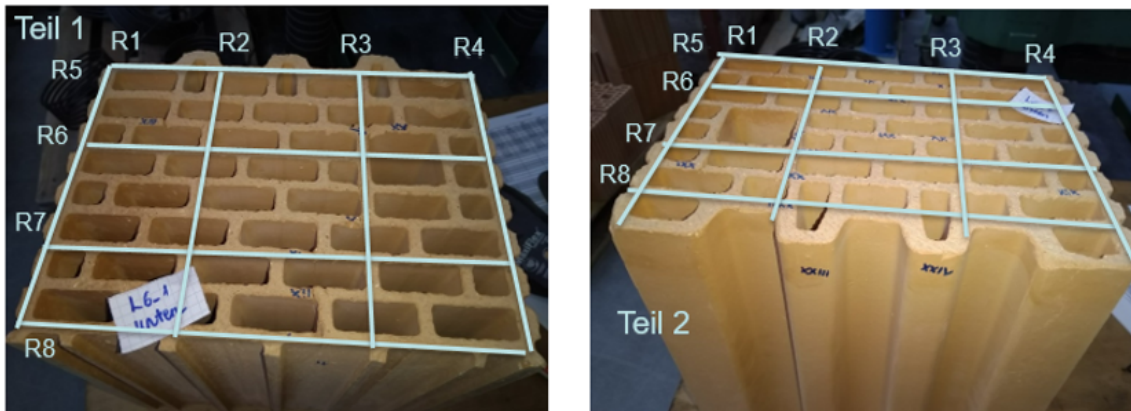
4.5. Mechanische Versuche

Der Zweck dieses Arbeitspakets bestand darin, die Druckfestigkeit und das Verformungsverhalten des Tralam-Ziegels und des Tralam-Mauerwerks experimentell zu bestimmen. Dafür wurde in einer Vorversuchsserie an handelsüblichen Hochlochziegeln der Einfluss der Genauigkeit der Ebenheit der Lasteinleitungsflächen, der Einfluss von Längsrissen und der Einfluss der Planparallelität der Lasteinleitungsflächen auf die Höhe der Bruchlast im Druckversuch untersucht. Auf Basis dieser Erkenntnisse wurden die Druckfestigkeitsprüfungen an den TRALAM-Ziegeln zur Ermittlung der sogenannten Steindruckfestigkeit geplant und durchgeführt. Abschließend konnte an einem Mauerpfeilerversuch auch erste, wichtige Erkenntnisse zum Tragverhalten des TRALAM-Mauerwerks gewonnen werden.

4.5.1. Grundlegende Untersuchungen zur Druckfestigkeitsprüfung von Mauersteinen

Für die Bestimmung der Druckfestigkeit von Mauersteinen wird in der ÖNORM EN 772-1 ein Prüfverfahren angegeben. In diesem wird unter anderem angegeben, wie groß die Toleranzen der Ebenheit der Lasteinleitungsflächen sein dürfen. Werden diese Toleranzen überschritten, schreibt die Norm vor, dass die Flächen abgeschliffen werden müssen, um die Toleranzen einzuhalten. In der Praxis werden Planziegel, die in ihrem Herstellungsprozess bereits einen Planschliff erhalten haben, für die Druckprüfung nicht nochmals abgeschliffen.

Abbildung 11: Raster für die Ebenheitsbestimmung der Ziegel



In der hier beschriebenen Studie wurden von zwei unterschiedlichen Hochloch-Planziegeltypen je 7 Mauersteine untersucht. Ein Teil der Steine wurde im Labor plangeschliffen, um den Unterschied in der gemessenen Druckfestigkeit zwischen werksgeschliffenen und laborgeschliffenen Proben zu bestimmen. Die Qualität der Ziegelproben wurde charakterisiert, indem die Planparallelität, die Ebenheit der Lasteinleitungsflächen und die Anzahl der Längsrisse dokumentiert wurde. Die Abweichungen der Ebenheit wurde an den in Abbildung 11 dargestellten Linien mittels Haarlineal und Fühllehre ermittelt. Die Verwendung von Fühllehren erlaubt nur eine Auflösung von 0,05mm. Die Ergebnisse eines Steins in Abbildung 19 sind als Mittelwert aus 8 Messungen (jede Rasterlinie entspricht einer Messung) zu verstehen. Alle Abweichungen, die kleiner als 0,05mm sind gehen somit mit 0,0 in die Auswertung ein. Dieser Umstand darf bei der Interpretation von Abbildung 19 nicht außer Acht gelassen werden.

Für die Auswertung hinsichtlich der Druckfestigkeit wurde die tatsächliche Druckfläche (Nettofläche) mit Hilfe von Unterwasserwägungen ermittelt. Die Abhängigkeiten zwischen der gemessenen Druckfestigkeit und den Einflussparametern (i) Rissanzahl, (ii) Ebenheit, und (iii) Planparallelität werden durch graphische Auswertung dargestellt (siehe Abbildung 18 und 19 in Kapitel 5.2.2)

4.5.2. Druckversuche an TRALAM-Ziegeln

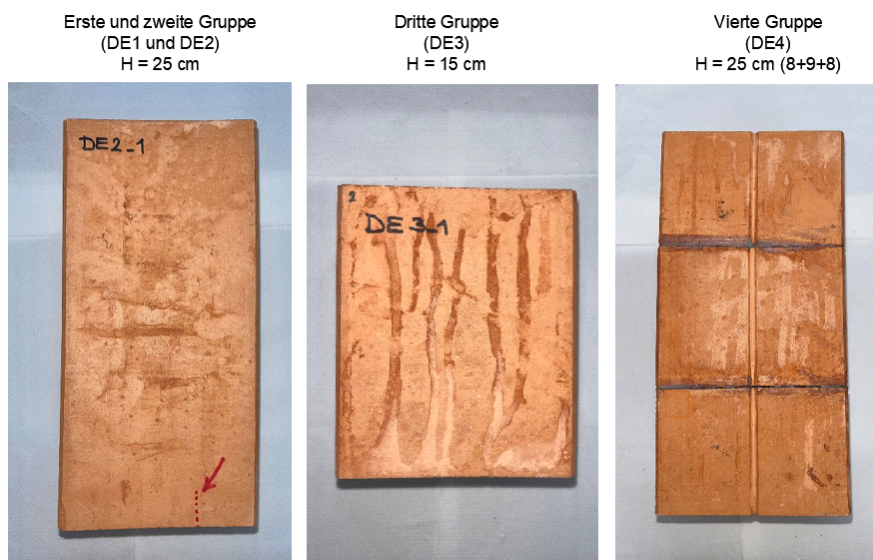
Um die Druckfestigkeit und das E-Modul des TRALAM-Ziegels zu ermitteln, wurden Versuche mit vier verschiedenen Arten von Versuchskörpern (siehe Abbildung 12) durchgeführt. Die Lasteinleitungsflächen aller Proben wurden plangeschliffen.

- Die erste Gruppe (DE1) bestand aus drei Ziegelproben, die keine Anzeichen von Querrissen an der Oberfläche des Ziegels zeigten, jedoch Risse im Inneren aufwiesen. Die Proben hatten die originale Ziegelhöhe von 25 cm und dienten als Vorversuche, um den Einfluss der Querrisse besser einschätzen zu können.
- Die zweite Gruppe (DE2) bestand aus drei 25 cm hohen Proben, die so wenig Risse wie möglich im Inneren aufwiesen. Die Rissprüfung erfolgte mit einer Taschenlampe und einem Stück Stahldraht. Die Positionen von gefundenen Rissen wurden dokumentiert.
- Die dritte Gruppe (DE3) bestand aus fünf 15 cm hohen Probekörpern. Die Höhe wurde reduziert, da dies die einzige Möglichkeit war, Proben ohne Querrisse zu erhalten. Durch

Umrechnung der Ergebnisse in die sogenannte normierte Steindruckfestigkeit werden die Ergebnisse unterschiedlich hoher Proben untereinander vergleichbar gemacht.

- Die vierte Gruppe (DE4) bestand aus drei 25 cm hohen Proben, wobei die Proben aus drei geschnittenen, rissefreien Ziegelstücken hergestellt wurden. Die zwei äußeren Teile waren jeweils 8 cm hoch und der mittlere Teil 9 cm. Mit diesen Versuchen sollen die in der Norm angegebenen Umrechnungsfaktoren zwischen der geprüften Festigkeit und der normierten Festigkeit überprüft werden.

Abbildung 12: Die getesteten Gruppen der Prüfkörper



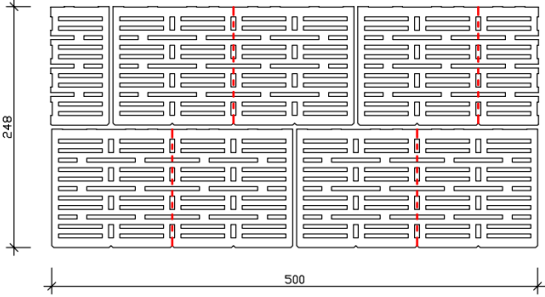
Schlussendlich werden die Prüfwerte aller 13 Versuche in die normierte Steinfestigkeit umgerechnet. Die Ergebnisse der Gruppe DE1 liegen aufgrund der Querrisse erwartungsgemäß um ca. 30% unter den restlichen Ergebnissen. Sie werden nicht für die Beurteilung der Ziegelqualität herangezogen.

4.5.3. Druckversuch am TRALAM-Mauerwerk

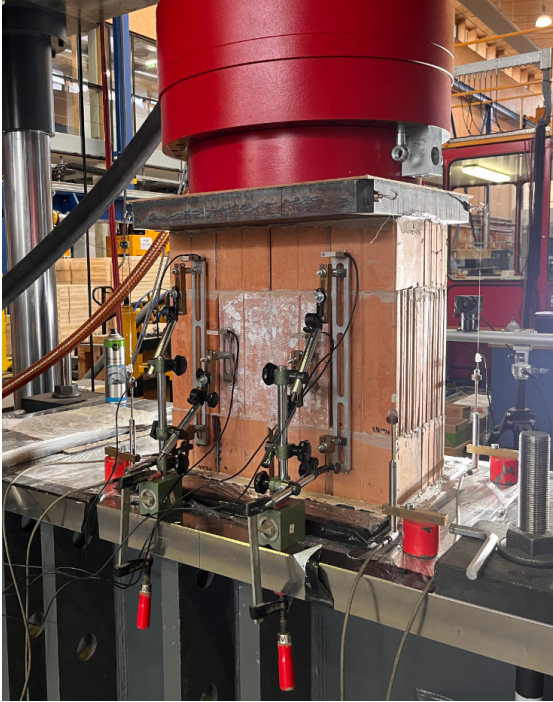
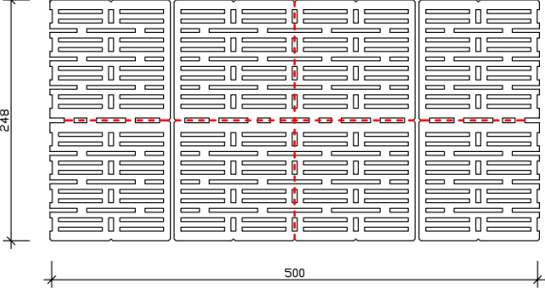
Trotz der Tatsache, dass es nur einen Viertelstein gab, der gar keinen Querriss hatte, wurde versucht, wichtige Aussagen zum Tragverhalten des Mauerwerks zu bekommen. Der festigkeitsmindernde Einfluss der Querrisse war ja bereits aus den Steindruckversuchen bekannt. Der Versuchskörper wurde so konzipiert, dass ein verklebter Ganzstein (mit möglichst wenigen Querrissen) im Zentrum des Mauerwerkspfeilers situiert ist (siehe Abbildung 13). Über und unter dem zentralen Stein wurde jeweils eine Ziegelschar mit halber Ziegel-Höhe angeordnet. So konnten diese beiden Scharen weitestgehend frei von Querrissen gestaltet werden. Wichtig war, dass in diesem Versuch die Übertragung der vertikalen Druckkräfte von einem Stein über die Lagerfuge in den im Verband darunterliegenden Stein real getestet wird. Der Versuchskörper hatte letztendlich eine Dicke von ca. 25cm und eine Breite und Höhe von je 50cm. In Abbildung 13 sind die Klebefugen zwischen den Viertelsteinen rot strichliert dargestellt. Als Mörtel wurde handelsüblicher Dünnbettmörtel der Klasse M10 verwendet. Die Anordnung und Durchführung des Versuchs wurde an die ÖNORM EN 1052-1 angelehnt.

Abbildung 13: links: Aufbauschema des Testpfeilers; rechts: Testpfeiler

Erste und dritte Schar



Zweite Schar



5 Ergebnisse

5.1. Herstellbarkeit von TRALAM-Ziegeln

Entsprechend dem übergeordneten Ziel werden in diesem Kapitel die wichtigsten Ergebnisse der Herstellungstests angeführt. Diese sollen verdeutlichen, dass dieses Ziel klar erreicht wurde.

Der Knackpunkt in Sachen Produktion des Mundstücks war die Verschraubung der nur 4 mm dicken Kerne mit den Kernhaltebügel. Die Befürchtung, dass sich durch die schlanke Bauweise im Extrusionsprozess die Bügel verbiegen und somit die Kerne zu stark verschieben, hat sich in den Tests nicht bewahrheitet, obwohl die Tonmasse im Extruder keineswegs optimal verdichtet war. Trotz der Probleme im Bereich der Vakuumkammer des Laborextruders und der damit einhergehenden Inhomogenität der Tonmasse wurden im Querschnitt äußerst formstabile Presslinge erzeugt (siehe Abbildung 14). Die Verkrümmung der Presslinge in Längsrichtung ist auf die asymmetrische Querschnittsform des Viertelsteins zurückzuführen und ist somit bei Herstellung des Ganzsteins nicht zu erwarten.

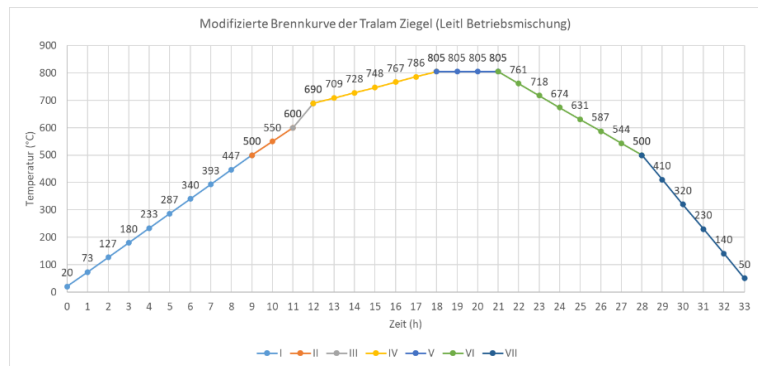
Abbildung 14: links: einzelner Ziegelpressling; rechts: Pressling direkt nach dem Schneiden



Der schonende Trocknungsprozess hat seinen Zweck erfüllt, sodass Trocknungsschwindrisse nur vereinzelt aufgetreten sind. Die Gesamtdauer des Trocknungsprozesses betrug 18 Stunden.

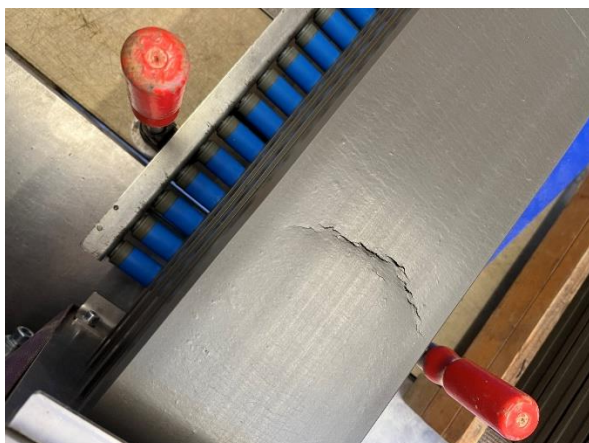
Ein einwandfreier Brand der Ziegel, der sich in hohen Druckfestigkeiten und dem Fernbleiben schwarzer Kerne widerspiegelte, wurde mit der in Abbildung 15 angegebenen Brennkurve erreicht.

Abbildung 15: links: Ziegel vor dem Trocknen; rechts: Brennkurve der Tonmischung



Wie bereits in 4.5.2 erwähnt, hatten einige Viertelsteine nach dem Brennen an der Oberfläche Querrisse (siehe Abbildung 16). Genauere Untersuchungen zeigten aber, dass bei allen bis auf einen Viertelstein im inneren zumindest ein Querriss vorhanden ist. Aufgrund der Lage der Risse ist auszuschließen, dass es sich um schwindinduzierte Risse handelt. Damit sind Risse gemeint, die zwar erst beim Brennen entstehen, sich die dafür notwendigen Eigenspannungen aber bereits beim Trocknen fast zur Gänze aufgebaut haben. Die Beschaffenheit der Rissoberflächen einiger der Risse legt nahe, dass die Risse eine Spätfolge von strukturellen Störstellen in der Tonmasse, die im Formgebungsprozess entstanden sind, sind. Die Beobachtung von entsprechenden Linien an der Oberfläche der Presslinge würde diese Erklärung stützen. Ein extremer Einzelfall, der dann aber nicht gebrannt wurde, ist in Abbildung 16 zu sehen. Ein weiteres theoretisch mögliches Erklärungsmodell kann im Abkühlungsprozess gefunden werden. Da die Risse am häufigsten im Inneren in den dünnen Lamellen auftreten, könnte das schnellere Auskühlen der dünnen Lamellen gegenüber den dicken Außenstegen das Reißen verursachen. Für eine endgültige Klärung bedarf es gezielter Untersuchungen einzelner Steine in allen Phasen der Herstellung.

Abbildung 16: links: Pressling mit Querriss direkt nach dem Pressen; rechts: Ziegel mit Querriss nach dem Brennen

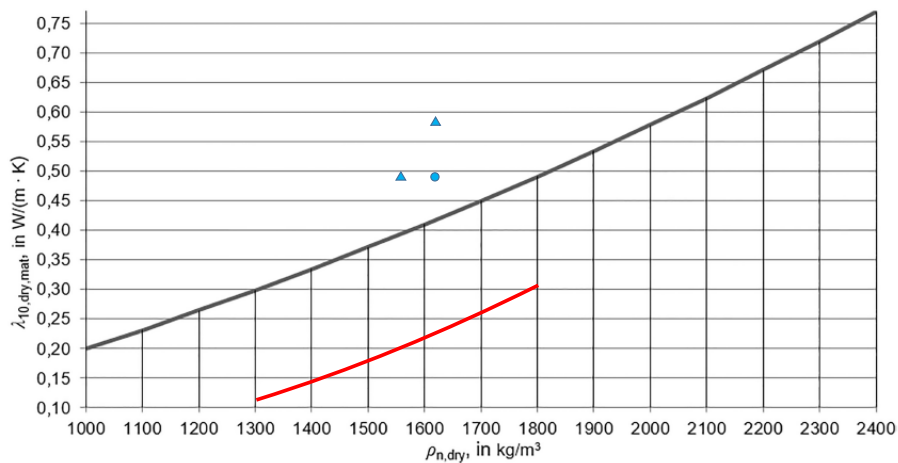


5.2. Ergebnisse und Erkenntnisse im Bereich der wissenschaftlichen Grundlagen des Mauerwerksbaus

5.2.1. Wärmeleitung – Mess- und Rechenmethoden

Die durchgeführten Messungen der Wärmeleitfähigkeit des Scherbens zeigen, dass die Messergebnisse stark davon abhängen, mit welcher Methode gemessen wird. Bei der Verwendung des Hot-Disk-Verfahrens ergibt sich im Mittel über alle Proben ein Wert von $\lambda_{mat,dry} = 0,58 \text{ W/mK}$ während das ISOMET-Verfahren Werte zwischen 0,48 und 0,51 W/mK liefert. Das eingesetzte indirekte Verfahren bestehend aus der Messung der Wärmeleitfähigkeit des ganzen Ziegels und anschließender Rückrechnung der Scherbenleitfähigkeit ergibt $\lambda_{mat,dry} = 0,48 \text{ W/mK}$. Dieses Verfahren ist an die ÖN EN 1745 bzw. ÖN B3200 angelehnt und wird in der Praxis verwendet, um aus Wärmedurchgangsmessungen an Wänden die Scherbenleitfähigkeit zu ermitteln. Ergebnisse für unterschiedlich schwere Scherben eines Ziegelherstellers werden dann üblicherweise graphisch über der Scherbenrohddichte dargestellt und als Werkskurve bezeichnet. In Abbildung 17 sind alle Ergebnisse zusammengefasst. Grundlage der Abbildung in anthrazit ist der in der ÖN B3200 angegebene Zusammenhang zwischen Scherbenrohddichte und Wärmeleitfähigkeit. Die blauen Dreiecke entsprechen den Mittelwerten von Hot-Disk-Messungen während der blaue Punkt den Mittelwert der ISOMET-Messung repräsentiert. Aus dem indirekten Verfahren ergeben sich Werte im Bereich der rot eingezeichneten Kurve (Werkskurven, die nicht im Rahmen dieses Projekts ermittelt wurden).

Abbildung 17: Zusammenhang der Scherbenleitfähigkeit und der Scherbenrohddichte



Es ist zu erkennen, dass im Bereich der für das Projekt relevanten Scherbenrohddichte von rund 1600 kg/m^3 die Angaben und Messungen zur Wärmeleitfähigkeit des Materials zwischen 0,22 und $0,58 \text{ W/mK}$ je nach Bestimmungsmethode schwanken. Es gibt also Unterschiede bis zum 2,6-Fachen.

Die theoretische Prognose hinsichtlich des Wärmedämmverhaltens der TRALAM-Technologie von Petermann basiert auf den geringen Wärmeleitfähigkeiten der roten Kurve. Nun muss festgestellt werden, dass sich diese Prognose experimentell nicht bestätigen lässt. Petermann ermittelte einen Wärmedurchgangskoeffizienten für 50cm dickes TRALAM Mauerwerk von $U = 0,22 \text{ W/m}^2\text{K}$. Unter Verwendung derselben Berechnungsmethode und Randbedingungen ergibt sich mit der nun

gemessenen Scherbenleitfähigkeit von $\lambda_{mat,dry} = 0,48 \text{ W/mK}$ ein U-Wert von $U = 0,33 \text{ W/m}^2\text{K}$. Der Wärmedurchgangskoeffizient ist somit um rund 50% höher als angestrebt.

5.2.2. Prüfung der Druckfestigkeit

Die Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfungen (siehe Abbildung 18 und 19) zeigen, dass es weder eine Korrelation zwischen den vorhandenen Längsrissen und der Druckfestigkeit noch zwischen der Planparallelität und der Druckfestigkeit gibt. Die Ebenheit der Lagerflächen hat jedoch einen sehr großen Einfluss auf die Druckfestigkeit der Ziegel. Die zusätzlich abgeschliffenen Steine weisen eine um 28% höhere Steindruckfestigkeit auf als jene Steine, die ohne Extra-Planschliff geprüft wurden. Aufgrund dieser Erkenntnisse wurde das Abschleifen der Lasteinleitungsflächen als obligatorischer Schritt in die Vorbereitung der Probekörper für alle weiteren Druckfestigkeitsprüfungen in diesem Projekt aufgenommen.

Abbildung 18: Zusammenhang zwischen der Druckfestigkeit und der Planparallelität der geprüften Steine

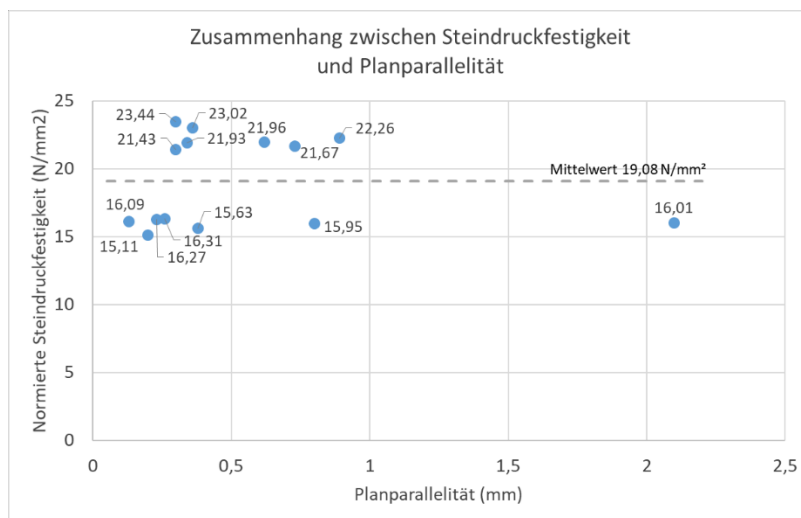
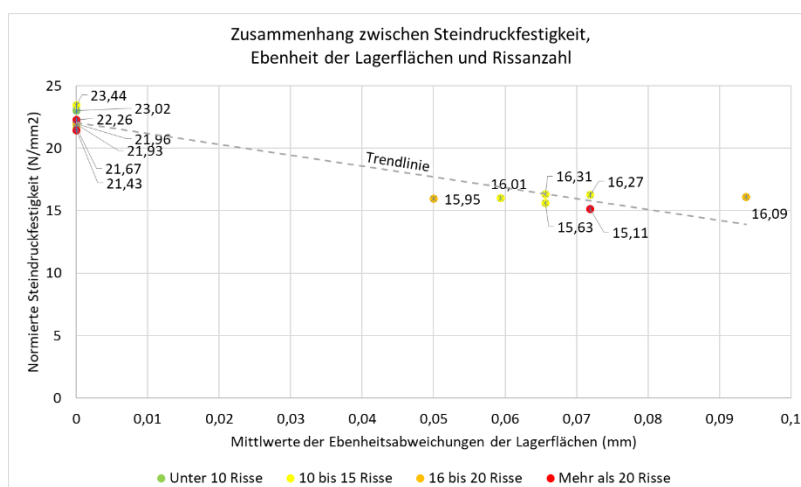


Abbildung 19: Zusammenhang zwischen der Druckfestigkeit und der Ebenheit der Lagerflächen bzw. der Rissanzahl der geprüften Steine

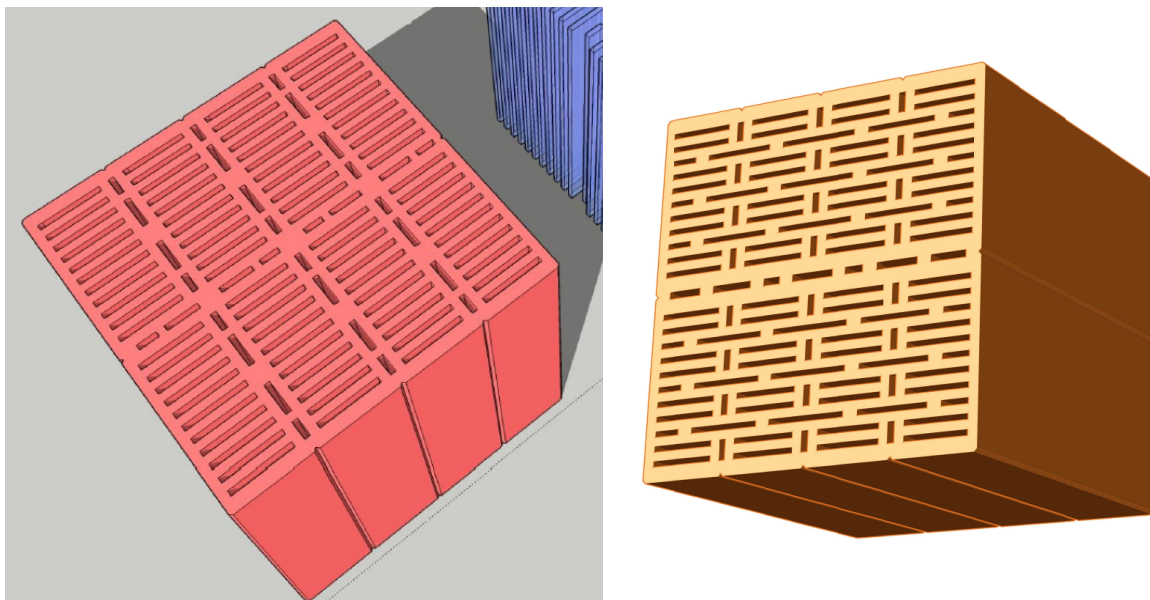


5.3. Fortschritte in der TRALAM-Technologie

5.3.1. Lochbild

Die Lochbildoptimierung in der ersten Phase des Projekts (siehe Abbildung 20) führt zu einer Verbesserung des berechneten Wärmedurchgangskoeffizienten von ca. 5%. Die neue Anordnung der Luftkammern stellt sicher, dass die dicken Stege, die die meiste Last übertragen, in jeder möglichen Stellung im Verband wieder sehr genau auf dicken Stegen des darunterliegenden Ziegels zu stehen kommen. Das wiederum garantiert, dass das Lochbild keine Einbußen der Mauerwerksfestigkeit gegenüber der Steifigkeit verursacht. Des Weiteren haben die Trennspalte nun eine Dicke von 5mm, um das Schneiden mit üblichen Ziegelsägen einfach zu gestalten. Das Flächenverhältnis zwischen Scherbe und Luft bleibt annähernd unverändert, um nichts an Druckfestigkeit gegenüber dem Ausgangszustand zu verlieren.

Abbildung 20: Ziegeldesign vor (links) und nach der Optimierung (rechts)



5.3.2. Festigkeit der Ziegel

Aus den theoretischen Ergebnissen von Petermann [8] ergab sich ein zu erwartender charakteristischer Wert der normierten Steindruckfestigkeit von $21,1 \text{ N/mm}^2$. In Tabelle 1 sind die Mittelwerte der normierten Steindruckfestigkeit der einzelnen Versuchsgruppen angegeben. Für die TRALAM-Technologie sind nur die Steingruppen DE 2 bis DE 4 repräsentativ. Für diese ergibt sich bei statistischer Auswertung ein 5%-Quantilwert von $27,3 \text{ N/mm}^2$. Die Druckfestigkeit der Prototypen-Ziegel ist somit um 30% höher als erwartet bzw. angestrebt. Dies kann zwei Gründe haben:

(i) Die uns zur Verfügung gestellte Tonmischung stimmt nicht mit der geplanten überein. Dies ist nicht überprüfbar, jedoch deutet die Diskrepanz zwischen der im Projekt gemessenen Trockenrohichte des Scherbens von 1620 kg/m^3 und der geplanten Trockenrohichte von 1565 kg/m^3 darauf hin. Eine Auswertung des Zusammenhangs zwischen der Trockenrohichte und der Steindruckfestigkeit mehrerer Ziegel-Produkte des Tonmasselieferanten erlaubt eine

Abschätzung dieses Einflusses. Über diesen Weg könnten ca. 18% höhere Druckfestigkeiten begründet werden.

(ii) Die Referenzfestigkeit von $21,1 \text{ N/mm}^2$ basiert auf Herstellerangaben, die wiederum in einer Versuchsreihe bestimmt wurden. Prüfergebnisse hängen aber, wie bereits gezeigt, stark von der Ebenheit der Lasteinleitungsflächen ab (siehe auch 5.2.2). Für den Fall, dass die Ebenheit bei diesen Prüfungen an der untersten Grenze der zulässigen lag, können sich alleine daraus Unterschiede von bis zu 30% ergeben.

Im Zuge der Druckversuche wurde das Elastizitätsmodul des Ziegels gemessen. Das ist das Verhältnis zwischen der Druckkraft bezogen auf die Bruttofläche und der Stauchung des Ziegels. Bei Ziegeln ohne Risse liegt dieser bei ca. 10.000 N/mm^2 . Das Elastizitätsmodul des Scherbens liegt entsprechend des Verhältnisses Netto- zu Bruttofläche bei ca. 14.000 N/mm^2 .

Tabelle 1: Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung

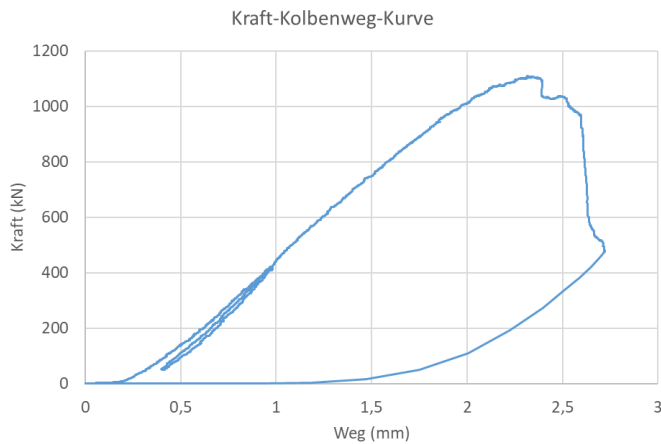
Versuchsgruppe	Anmerkung	Anzahl der Versuche	Elastizitätsmodul des Ziegels [N/mm ²]	Mittelwert der normierten Druckfestigkeit [N/mm ²]
DE 1	Vorversuche mit zufällig entnommen Steinen mit Querrissen (h=25)	3		21,0
DE 2	Ausgewählte Steine mit möglichst wenigen Querrissen (h=25cm)	3	8.700	33,7
DE 3	keine Risse (h=15cm)	4	9.700	30,0
DE 4	keine Risse (aus 3 Teilen geklebt, h=25cm)	2	10.150	32,0

5.3.3. Tragfähigkeit im Mauerwerksverband

Der Mauerwerkspfeiler versagte im Druckversuch durch äußerst gleichmäßig über den Versuchskörper verteilte Schädigung (siehe Abbildung 21). Dies zeigt, dass sich alle Bereiche des Pfeilers in ähnlicher Größenordnung am Lastabtrag beteiligt haben. Berechnet man die im besten Fall zu erwartende Mauerwerksfestigkeit für diesen Pfeiler auf Basis des maximal gemessenen Einzelwerts der Steindruckfestigkeit von $f_{b,i} = 37,8 \text{ N/mm}^2$ und der gemessenen Mörtelfestigkeit von $f_{m,i} = 10,8 \text{ N/mm}^2$ nach ÖNORM EN B 1996-1-1 für Mauersteine der Gruppe II, so ergibt sich ein Wert von $f_{\text{Mauerwerk}} = 8,9 \text{ N/mm}^2$. Dieser Wert wurde im Versuch mit $f_{\text{Mauerwerk,Versuch}} = 9,1 \text{ N/mm}^2$ erreicht. Dieses Ergebnis zeigt eindrucksvoll, dass das Lochbild auch aus statisch

konstruktiver Sicht sehr gut entwickelt ist. Es sei hier nochmals erwähnt, dass die unerwartet hohe Mauerwerksfestigkeit an einem Pfeiler, dessen Hauptschar (in der Mitte) aus quergelassenen Ziegeln besteht, gemessen wurde.

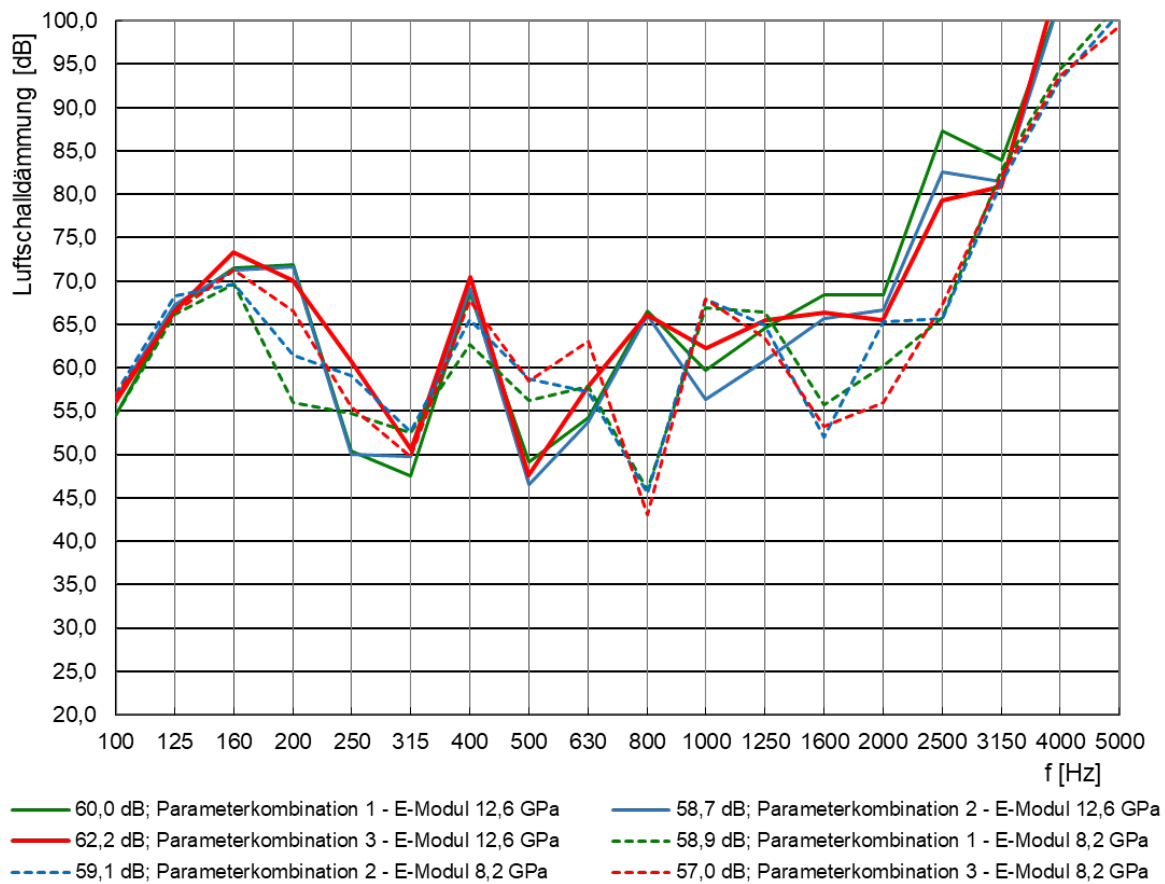
Abbildung 21: links: Versuchsergebnis des Testpfeilers; rechts: Bruchbild des Testpfeilers



5.3.4. Luftschallschutz

Die Ergebnisse der Simulation zur Ermittlung der Luftschalldämmung sind in Abbildung 22 dargestellt. In der Simulation wurde das dynamische E-Modul auf Basis der Ergebnisse der experimentellen Modalanalyse variiert (12.600 MPa bzw. 8.200 MPa) und verschiedenen Kombinationen aus Netzfeinheit und Parametern des einwirkenden Schalls getestet. Im Bauwesen wird die Luftschalldämmung üblicherweise als eine Zahl (Einzahlangabe) angegeben. Diese ergibt sich hier je nach Simulationsparameter zwischen 57 und 62 dB. Das TRALAM-Mauerwerk weist somit eine wesentlich bessere Luftschalldämmung auf als Außenwände mit aktuell marktüblichen 50cm breiten Planziegeln (43-48 dB).

Abbildung 22: Luftschalldämmung im Frequenzbereich 100-5000 Hz



5.4. Beitrag zur „Stadt der Zukunft“

Die Projektergebnisse repräsentieren einen wichtigen Entwicklungsschritt einer Technologie auf dem Weg zu klimaneutralen Städten und Regionen, wie dies im Punkt 2.1 der 8. Ausschreibung „Stadt der Zukunft“ ausgeschrieben wurde.

Die in diesem Projekt bearbeitete und weiterentwickelte TRALAM-Technologie trägt zur Umsetzung hoher Gebäudequalität und Energieeffizienz im urbanen Raum bei. TRALAM ist eine Low-Tech-Lösung, mit dessen Hilfe ressourcenschonende, langlebige Gebäude und Quartiere realisiert werden können. Dabei wird die Speicherfunktion des Ziegels in Kombination mit dem Verzicht auf klassische Dämmstoffe als passiver Schutz gegen sommerliche Überhitzung sowohl im Gebäude als auch außerhalb des Gebäudes genutzt.

6 Schlussfolgerungen

Die Reduktion der Luftspaltdicke von Hochlochziegeln auf 4mm stellt keine produktionstechnische Hürde dar. Somit kann und soll das Ziel vom Bau von 8-geschossigen urbanen Gebäuden ohne Außendämmung weiter verfolgt werden. Die Projektergebnisse zeigen weiters, dass der derzeitige Entwicklungsstand der TRALAM-Technologie bemerkenswerte Reserven in statisch-konstruktiver und schallschutztechnischer Hinsicht aufweist, wohingegen die wärmedämmenden Eigenschaften des Ziegels noch verbessert werden müssen. In diesem Zusammenhang darf aber nicht vergessen werden, dass die Projektergebnisse auf Basis einer bei weitem noch nicht idealen Tonmischung gewonnen wurden. Außerdem muss die Größenordnung der noch erforderlichen Verbesserung der wärmedämmenden Eigenschaften immer gemeinsam mit der Gesamtenergiebilanz der Außenwand betrachtet werden. Die durch die direkte solare Einstrahlung noch mögliche weitere Reduktion der Wärmetransmission über die opaken Flächen wurde in dem hier präsentierten Sondierungsprojekt noch nicht analysiert, und wäre in Abhängigkeit der Randbedingungen wie Ausrichtung und Farbgebung der Oberfläche noch zusätzlich zu bewerten. Gleiches gilt für die Wirkung der Außenwand in Bezug auf die Erwärmung der Außenoberfläche bei solarer Einstrahlung im Sommer. Die hier zu erwartenden geringeren Oberflächentemperaturen im Vergleich zu Fassaden mit WDVS könnten insbesondere in dichtem verbautem Gebieten für einen gedämpften Temperaturverlauf in Straßenzügen beitragen. Bei geeignetem Außenputz könnten dazu noch Verdunstungseffekte wirksam werden, wenn Schlagregen von der Oberfläche aufgenommen werden kann, und in weiterer Folge bei solarer Einstrahlung dann wieder verdunstet und derart einen Kühlungseffekt bewirkt, der zu einer Verbesserung des Sommerklimas in Städten beiträgt.

Die erarbeiteten Ergebnisse werden als Grundlage für die Beantragung des Folgeprojekts verwendet. Neben der experimentellen Untersuchung des wärmeenergetischen Verhaltens eines Testhauses wird die finale Optimierung der wärmedämmenden Eigenschaften des Ziegels auf Basis der umfangreichen, gewonnenen Erkenntnisse eine große Rolle spielen.

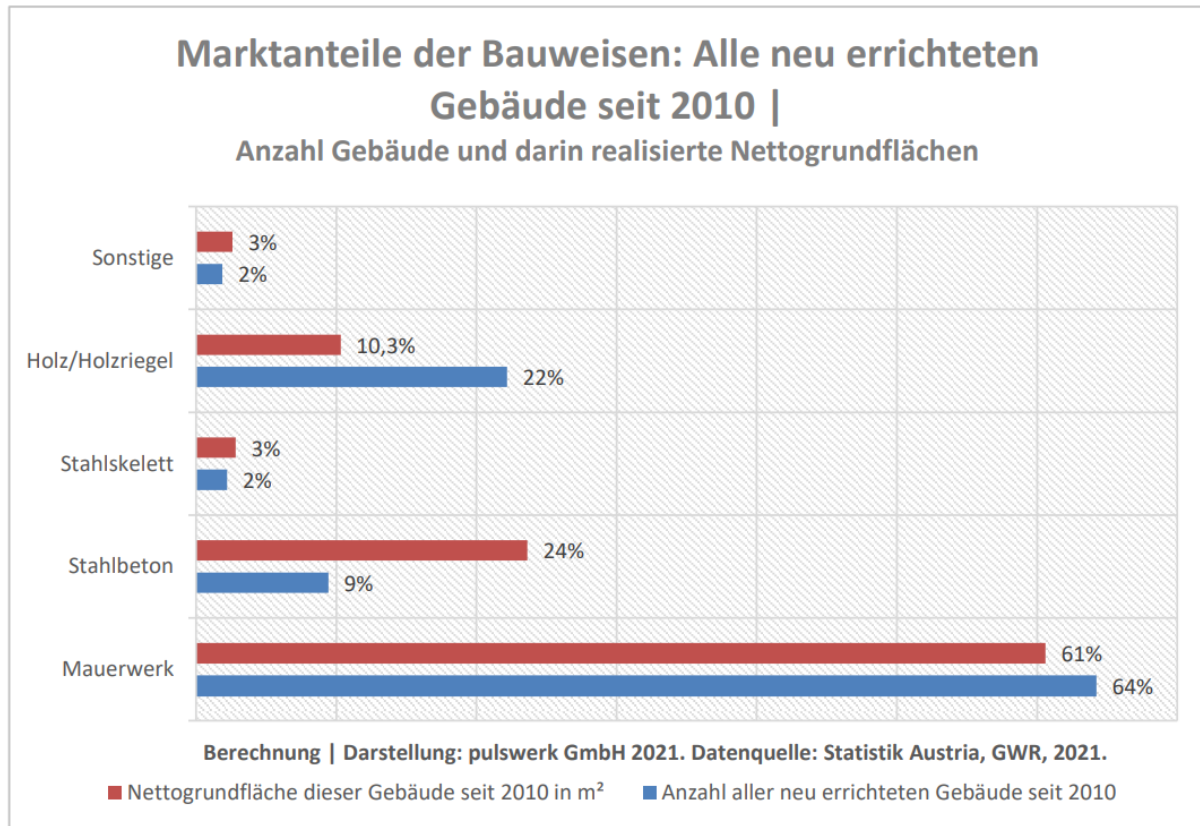
Für die Ziegelindustrie hat der Nachweis der Herstellbarkeit besondere Bedeutung. Mit dieser Erkenntnis können F&E-Ressourcen mit deutlich gesenktem Risiko für das gegenständliche Thema eingesetzt werden. Die Erkenntnisse zur Druckfestigkeitsprüfung legen nahe, dass sich auch in einigen am Markt befindlichen Ziegelprodukten ungenutzte Druckfestigkeitsreserven befinden, die es zu nutzen gilt.

Die ausführenden Baufirmen suchen stets nach nachhaltigen Lösungen für den urbanen Wohn- und Bürobau und würden eine marktreife TRALAM-Technologie sehr begrüßen. Das ergaben Vorgespräche mit der Baumeisterinnung. Aus diesem Grund werden die Projektergebnisse nicht nur in der Ziegelbranche verbreitet, sondern auch der Baumeisterinnung zur Verfügung gestellt.

Es ist davon auszugehen, dass es gelingen wird, die wärmedämmenden Eigenschaften im nächsten Schritt noch entsprechend zu verbessern und somit einen großen Markt bedienen zu können. Mit den von Lechner angegebenen Daten zum Marktanteil des Mauerwerks (siehe Abbildung 23 [12]) lässt sich die Quantität des Nutzens verdeutlichen, wenn man annimmt, dass die Verhältnisse zwischen den Baustoffen sich von tragenden Wänden zu Außenwänden nicht signifikant verschieben. Demnach könnte mehr als die Hälfte aller Außenwände von den in diesem Projekt erzielten

qualitativen Verbesserungen profitieren. Aufgrund der fortschreitenden Urbanisierung wird der mehrgeschossige Wohnbau zunehmen, und der Mauerwerksanteil noch weiter zunehmen.

Abbildung 23: Marktanteile der Bauweisen [12]



7 Ausblick und Empfehlungen

Die weiterführenden Forschungsarbeiten müssen zuerst darauf fokussieren, den Wärmedurchgang zu reduzieren. Es gibt drei Schrauben an denen zu drehen ist: (i) Änderungen in der Tonmischung (Reduktion der Rohdichte und der Wärmeleitfähigkeit); (ii) Nutzen der festgestellten Festigkeitsreserven: die Festigkeit kann auch mit weniger Tonanteil erreicht werden, was mit einer wärmetechnischen Verbesserung des Ziegels einhergeht; (iii) Wenn vom aktuell sehr feinen Rastermaß des Ziegelverbands abgegangen wird, eröffnet sich ein großes wärmetechnisches Potenzial aufgrund gelockerter Randbedingungen für das Lochbild.

Im Zusammenhang mit den großen Unsicherheiten der Scherbenwärmeleitfähigkeit je nach Mess- oder Berechnungsmethode ist eine grundlegende, universitäre Studie durchzuführen, in der die in der Praxis und Wissenschaft relevanten und praktizierten Methoden auf ihre physikalische Richtigkeit überprüft werden. Dabei wäre eine Zusammenarbeit der Universitäten und akkreditierten Prüfstellen dringendst zu empfehlen.

Während der Durchführung des Folgeprojekts, in dem die Gesamtjahresenergiebilanz in einem „Prüfhaus“ an der TU-Graz als Hauptergebnis erarbeitet werden wird, sollte der nächste Schritt, nämlich ein Demonstrationsprojekt bereits vorbereitet werden. Die Umsetzung eines Demonstrationsprojekts braucht den Zusammenschluss vieler Sparten in Planung, Ausführung und Monitoring bzw. Evaluierung. An der TU-Graz wurde im Juni 2022 für solche Zwecke das „Graz Center of Sustainable Construction (GCSC)“ gegründet. Das Projektteam ist Mitglied des GCSC. Es wird empfohlen, das Demonstrationsprojekt in diesem Rahmen in Angriff zu nehmen.

8 Verzeichnisse

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ziegelstein „Vital Solex Plan“ von Leitl [2]	11
Abbildung 2: links: Low-Tech-Bürogebäude 2226 in Lustenau (Bildquelle [4]); rechts: 8-geschoßiges Wohnquartier in Regensburg (Bildquelle [5])	12
Abbildung 3: Ansicht und Schnitt eines 8-geschoßigen Wohngebäudes aus TRALAM-Mauerwerk.....	13
Abbildung 4: Pfefferkornversuch – links: Versuchsaufbau; rechts: Auswertung.....	14
Abbildung 5: Lochbild des TRALAM-Ziegels vor (links) und nach der Optimierung(rechts)	15
Abbildung 6: links: Mundstück; rechts: Anordnung der Pressvorrichtung	16
Abbildung 7: links: Ziegel vor dem Brennen; Mitte: Ziegel mit schwarzem Kern; rechts: Ziegel nach dem angepasstem Brennprozess	16
Abbildung 8: links: Zusammengeklebter Ganzstein inkl. Messpfade; rechts: zweite Eigenfrequenz des Ziegels.....	17
Abbildung 9: links: Messaufbau des Hot-Disk-Verfahrens; rechts ISOMET Messung.....	18
Abbildung 10: Versuchsaufbau der Hot-Box-Messung	19
Abbildung 11: Raster für die Ebenheitsbestimmung der Ziegel.....	20
Abbildung 12: Die getesteten Gruppen der Prüfkörper.....	21
Abbildung 13: links: Aufbauschema des Testpfeilers; rechts: Testpfeiler	22
Abbildung 14: links: einzelner Ziegelpressling; rechts: Pressling direkt nach dem Schneiden	23
Abbildung 15: links: Ziegel vor dem Trocknen; rechts: Brennkurve der Tonmischung.....	24
Abbildung 16: links: Pressling mit Querriss direkt nach dem Pressen; rechts: Ziegel mit Querriss nach dem Brennen.....	24
Abbildung 17: Zusammenhang der Scherbenleitfähigkeit und der Scherbenrohichte.....	25
Abbildung 18: Zusammenhang zwischen der Druckfestigkeit und der Planparallelität der Steine (Leitl Ökotherm 50)	26
Abbildung 19: Zusammenhang zwischen der Druckfestigkeit und der Ebenheit der Lagerflächen bzw. der Rissanzahl der Steine (Leitl Ökotherm 50).....	26
Abbildung 20: Ziegeldesign vor (links) und nach der Optimierung (rechts).....	27
Abbildung 21: links: Versuchsergebnis des Testpfeilers; rechts: Bruchbild des Testpfeilers.....	29
Abbildung 22: Luftschalldämmung im Frequenzbereich 100-5000 Hz	30

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung..... 28

Literaturverzeichnis

- [1] Bumann G.: Studie über den Einfluss der solaren Erträge über die Außenwände auf den Energiehaushalt eines Wohngebäudes. DIMaGB, Berlin 2009
- [2] https://www.leitl.at/fileadmin/Downloads/Datenblaetter/Wand/4-3-1_Ziegel_LSG_Datenblatt_PLAN_50-20-24_9_Vital_Solex_01.pdf (abgerufen am 27. Jänner 2023; 12:46)
- [3] Graubner, C., Rast, R.: Mauerwerksbau aktuell, Bauwerk Beuth, 2016
- [4] Objekt.Report - Bürohaus 2226 Lustenau, www.wienerberger.at, 2013
- [5] <https://docplayer.org/24559440-Architektur-mit-poroton-2014.html> (abgerufen am 30. Jänner 2023; 09:02)
- [6] Pech, A.; Gangoly, H.; Holzer, P., Maydl P.: Ziegel im Hochbau – Theorie und Praxis, Sonderband Baukonstruktionen, 2. Auflage, Birkhäuser, Basel, 2018
- [7] https://www.wienerberger.at/produkte/wand/produktkatalog/porotherm-44-w_i-plan.html (abgerufen am 30. Jänner 2023; 10:13)
- [8] Loibner, M.: Auch Ziegel wollen hoch hinaus, DiePresse.com/Immobilien, 1./2. Juni 2019
- [9] Petermann, A.: Inovatives Ziegelmauerwerk für 8-geschossige Gebäude –statische und bauphysikalische Untersuchungen-, Masterarbeit, TU Graz 2020
- [10] Fact sheet INNOVATIVE BRICK 2, <https://projekte.ffg.at/projekt/2926683> (abgerufen am 31. Jänner 2023; 15:02)
- [11] Buchner T. et.al.: A multitechnique, quantitative characterization oft o pore space of fired bricks made of five clayey raw materials used in European brick industry, Applied Clay Science 200, Elseviere 2020
- [12] Lechner R. (19.01.2022). Bautechnologien für den Klimaschutz [Vortrag]. https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/sdz_pdf/events/20220124_sdz-tws/3_Lechner_Bautechnologien_fuer_den_Klimaschutz.pdf?m=1643016892& (abgerufen am 01. Februar 2023; 10:35)

Abkürzungsverzeichnis

WDVS

Wärmedämmverbundsystem

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

Radetzkystraße 2, 1030 Wien

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