

Thermisch optimierte Balkonsanierung

THERM-opti-BALKON

N. Fleischhacker

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

21/2017

Impressum:

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber:
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien
Leiter: DI Michael Paula

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

Thermisch optimierte Balkonsanierung

THERM-opti-BALKON

DI Nikolaus Fleischhacker MSc
Universität Innsbruck / Fakultät für Technische Wissenschaften

Innsbruck, Jänner 2017

Ein Projektbericht im Rahmen des Programms



im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie

Vorwort

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm Stadt der Zukunft des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie (bmvit). 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 von allen betroffenen Bereichen 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 bmvit publiziert und elektronisch über die Plattform www.HAUSderZukunft.at zugänglich gemacht. In diesem Sinne wünschen wir allen Interessierten und AnwenderInnen eine interessante Lektüre.

DI Michael Paula
Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	9
Abstract.....	11
1 Einleitung	12
1.1 Aufgabenstellung	13
1.2 Stand der Technik	17
1.2.1 Thermische Entkopplungen.....	17
1.2.2 Befestigungstechnik	20
1.3 Verwendete Methoden	26
1.3.1 Experimentelle Untersuchungen	26
1.3.2 Numerische Untersuchungen	31
1.3.3 Bemessungsansatz.....	34
2 Ergebnisse	34
2.1 Experimentelle Untersuchungen	34
2.1.1 Einzelversuche.....	34
2.1.2 Bauteilversuche.....	42
2.2 Numerische Untersuchungen	48
2.2.1 Numerische mechanische Untersuchungen	48
2.2.2 Numerische thermische Untersuchungen.....	50
2.3 Bemessungsmodell.....	50
3 Schlussfolgerungen.....	53
3.1 Erkenntnisse.....	53
3.2 Relevante Zielgruppen der Projektergebnisse	53
3.3 Verwertungs- und Verbreitungsaktivitäten.....	54
4 Ausblick und Empfehlungen	54
4.1 Weiterführende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten.....	54
4.2 Potenzial für Demonstrationsvorhaben	55
5 Verzeichnisse.....	57
5.1 Abbildungsverzeichnis	57
5.2 Literaturverzeichnis	58

Kurzfassung

Ausgangssituation/Motivation

Bei der nachträglichen Anbringung von Wärmedämmungen an den Außenwänden im Zuge der thermischen Sanierung von Bestandsgebäuden stellen frei auskragende Balkone ein besonderes Problem dar. Stand der Technik bzw. gemeinhin geübte Praxis ist es entweder

1. die Balkone vor der Anbringung der Dämmung abzureißen und hernach als selbst tragende Konstruktion (d.h. mit Stehern auf eigenen Fundamenten) neu zu errichten, was in vielen Fällen technisch nicht möglich oder ästhetisch nicht gewünscht ist, oder
2. die Bestandsbalkone zu belassen und damit grobe thermische Kompromisse einzugehen, da die Bestandsbalkone Wärmebrücken durch die neu angebrachte Dämmung darstellen, oder
3. die Balkone nach der thermischen Sanierung der Fassade einfach wegzulassen, was eine eklatante Minderung der Wohnqualität und einen mitunter massiven Wertverlust der Liegenschaft nach sich zieht.

Inhalte und Zielsetzungen

Im vorliegenden Projekt sollen Lösungen entwickelt werden, die eine thermisch bestmöglich entkoppelte Neuerrichtung von Balkonen an thermisch sanierten Fassaden ermöglichen - bei optimierter Praxistauglichkeit und optimiertem Kostenaufwand.

Methodische Vorgehensweise

Als vielversprechendsten Ansatz hierfür sehen die Projektanten ein Befestigungssystem mit Betonschrauben an. Da Betonschraubenverbindungen für auskragende Plattenbauteile - wie Balkone - bisher nicht systematisch erforscht wurden, wird technisches Neuland betreten und es sind eine Reihe grundlegender wissenschaftlicher Untersuchungen und Entwicklungsarbeiten durchzuführen.

Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Im Projekt wird das thermische Entkopplungssystem „System I“ entwickelt. Dieses erlaubt die thermisch entkoppelte Wiedererrichtung von Balkonen im Zuge der Sanierung. Es trägt dabei zu einer deutlichen Verbesserung der Wärmedämmmaßnahme bei. Für die Entwicklung dieses Systems werden für den kritischen Bereich der Lasteinleitung Grundlagen der Befestigungstechnik von Beton- und Verbundankerschrauben in einer Vielzahl von experimentellen Versuchen geschaffen und zu einem besseren Verständnis des Tragverhaltens dieser Verankerungselemente beigetragen. Im Speziellen ist das vor allem die Kraftübertragung vom Verankerungsmittel in den Ankergrund Stahlbeton unter Zugbelastung. Hierfür können Verbund-Schlupf-Gesetzmäßigkeiten abgeleitet werden, die die Entwicklung eines numerischen Simulationsmodells, von Laborversuchen auf Bauteilebene und eines Bemessungsansatzes erlauben.

Ausblick

Mit dem Projekt THERM-opti-BALKON-P2 wird das Projekt THERM-opti-BALKON konsequent weiterverfolgt. Über die Weiterentwicklung der thermischen Entkopplung zu System II und dessen Pilotanwendung können notwendige Erkenntnisse zur praktischen Ausführung erlangt werden.

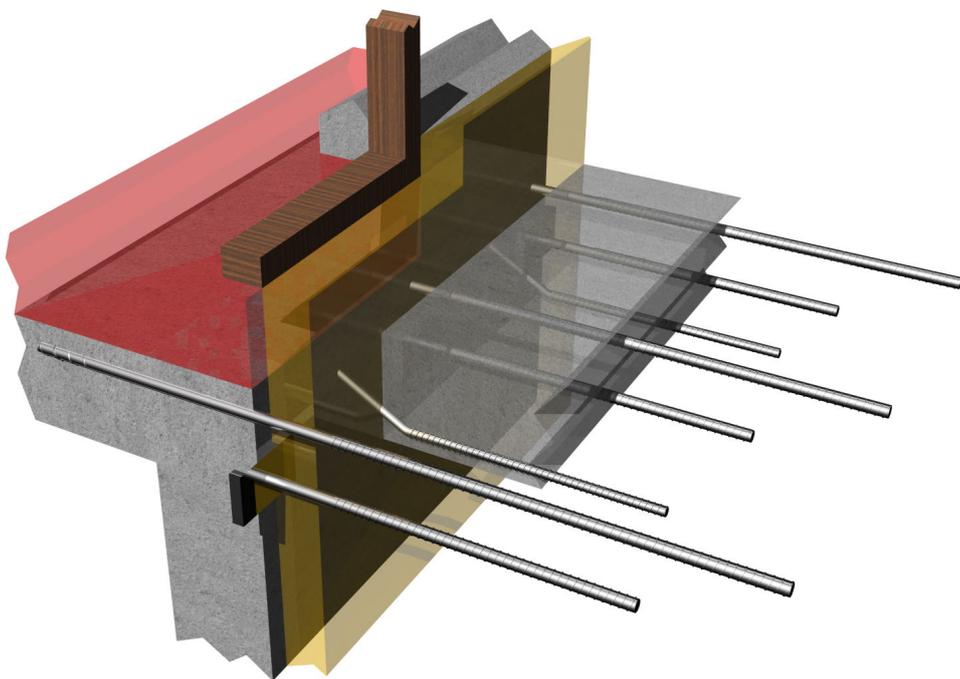


Abbildung 1: THERM-opti-BALKON – thermische Entkopplung „System I“

Abstract

Starting point/Motivation

As far as attaching a thermal insulating posteriori on exterior walls is concerned in the course of the thermal renovation of existing buildings, pre-cast cantilever balconies represent a particular problem.

According to the state-of-the-art balconies, the common custom is

1. to tear down the balconies before the attachment of the thermal insulation and to reconstruct them thereafter as a self-supporting construction with posts on distinctive foundations, which is technically not feasible in many cases or aesthetically unwelcome, or
2. to preserve the existing balconies which leads to severe thermal compromises because the balconies form heat bridges through the newly mounted insulating, or
3. to omit the balconies after the thermal restoration of the building which leads to a blatant deterioration of the indoor environment quality and to a loss in value of the real estate.

Contents and Objectives

The project at hand aims to develop solutions which facilitate the thermally decoupled rebuilding of balconies on thermally renovated building fronts, thereby focusing on optimum practicability and cost-effectiveness.

Methods

To reach these goals, the project team considers mounting systems based on concrete screws to be the most promising approach. Because concrete screw connections of overhanging plate-like building components like balconies have not been investigated systematically up to now, the project breaks technical new ground and a number of fundamental scientific investigations and development work needs to be executed.

Results

The thermal decoupling system "System I" is developed within this project. It allows a thermal decoupled reconstruction of balconies in the course of refurbishment. Therefore it contributes to a significant improvement in thermal rehabilitation. For the development of this system, basic principles of fastening technology for concrete screws have been investigated in a large number of experimental tests. In particular, this is the transfer of force from the concrete screws into the anchor base of reinforced concrete under tensile load. For this purpose, bond-stress-slip laws can be derived. These allow the development of a numerical simulation model, laboratory tests on component level and a dimensioning approach.

Prospects / Suggestions for future research

With the THERM-opti-BALKON-P2 project the THERM-opti-BALKON project is continued. The further development of the thermal decoupling to system II and its pilot application provides necessary knowledge for a new product development.

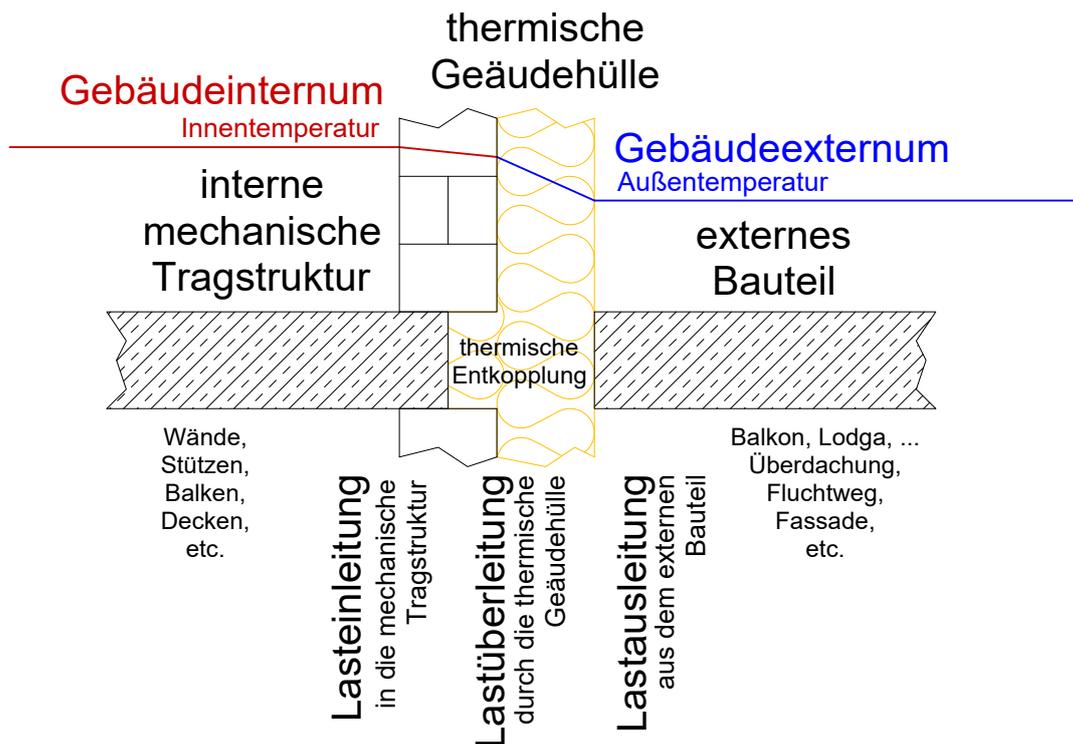


Abbildung 3: Modell des realen mechanischen und thermischen Systems

Wärmeleitfähigkeit – ausgefüllt. Hoher thermischer Widerstand kann dabei besonders bei großen Dämmstärken erreicht werden. Für eine thermische Entkopplung mit diesem Anspruch muss die bestehende Marktlösung überdacht werden.

1.1 Aufgabenstellung

Die mechanische Tragstruktur gemäß Abbildung 3 befindet sich zumeist im Gebäudeinneren. Ihre vertikalen Bauteile wie Stützen und Wände und horizontalen wie Balken und Decken sind somit auf dem Niveau der Innentemperatur. Externe Bauteile wie ein Balkon sind von Außenluft berührt und somit auf dem Niveau der Außentemperatur. Die Temperaturdifferenz von Innen- und Außen führt zu einem Wärmestrom. Diesem wirkt die thermische Entkopplung als Spezialfall der thermischen Gebäudehülle in diesem Bereich als Widerstand entgegen. Sie hat dabei die Aufgabe das externe Bauteil mit der internen Tragstruktur mechanisch tragfähig zu verbinden und den thermischen Widerstand der Gebäudehülle dabei nur so gering als möglich zu mindern.

Bei Stahlbeton Bestandsbauten in Ortbetonbauweise sind Bestandsdecke und -balkon zumeist monolithisch verbunden. Um diese thermisch voneinander zu entkoppeln ist ein Abtrag – Abschneiden mit einer Betonsäge – des Bestandsbalkons notwendig. Anschließend kann ein neuer Balkon thermisch von der Bestandsdecke entkoppelt wiedererrichtet werden. Diese Methode ist grundsätzlich auch bei Bestandsbauten mit Betondecke zur nachträglichen Errichtung eines thermisch entkoppelten Balkons anwendbar.

Das thermische Entkopplungssystem muss somit gemäß Abbildung 3 die Funktionen

- Lastausleitung – Lasten aus dem Balkon ausleiten –,
- Lastüberleitung – Lasten des Balkons durch die thermische Gebäudehülle bei minimierten Wärmeleitwert überleiten – und
- Lasteinleitung – Einleiten der Lasten des Balkons in das Deckensystem

abdecken. Um das zu ermöglichen, werden die vom Balkon resultierenden Lasten Querkraft und Moment in einem Fachwerk als Zugstab, Schubstab und Druckstrebe punktuell durch die thermische Gebäudehülle geführt. Diese Stäbe werden dabei mechanisch hoch ausgenutzt, um deren Querschnitte auf ein Minimum zu reduzieren. Eine Ausführung der Stäbe aus hochfestem Edelstahl bietet sich aufgrund der um Faktor vier geringeren Wärmeleitfähigkeit verglichen mit Normalstahl an. Der verbleibende anteilmäßig große Hohlraum zwischen den Fachwerksstäben im Bereich der thermischen Gebäudehülle kann mit Dämmstoff ausgefüllt werden.

Im Forschungsprojekt THERM-opti-BALKON wird dafür die Systemlösung „System I“ – nach einer Idee von Prof. Feix – entwickelt, die es ermöglicht, den Montageaufwand und damit einhergehend die Montagekosten zu minimieren. Dafür muss die Verankerung der Lasten mit

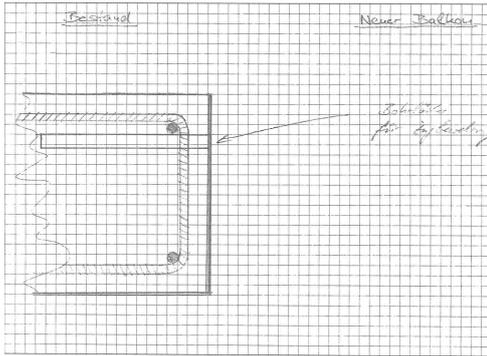
1. wenigen Bohrungen,
2. geringen Bohrlochtiefen und
3. ohne zeitaufwändigen Mörtelverguss

auskommen. Wenige Bohrungen erfordern die Übertragung großer Kräfte je Ankerpunkt. Das soll auch bei geringen Bohrlochtiefen und einhergehenden kurzen Verankerungstiefen möglich sein. Deshalb wird die Rückverankerung des Balkons mit sogenannten Beton- bzw. Verbundankerschrauben realisiert. Diese bietet die generellen Vorteile

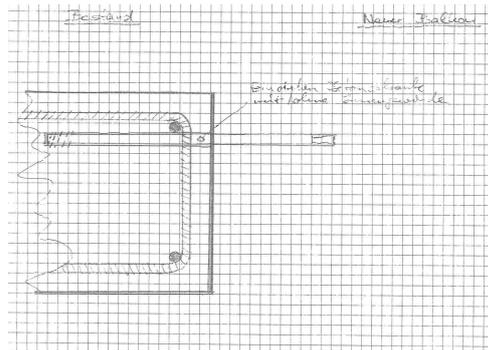
- kurzer Einbindetiefen
- bei mit hohem Tragvermögen und
- einer mechanischen Tragwirkung über Formschluss, die auch im Brandfall die geforderte Resttragfähigkeit gewährleistet.

„System I“ wird aufbauend auf dem Konzept gemäß Abbildung 4 entwickelt. Dieses sieht im ersten Arbeitsschritt die Herstellung eines Bohrlochs für die Zugeinleitung vor. In Arbeitsschritt zwei wird eine Betonschraube mit oder ohne Anschluss-Innengewinde eingedreht. An diese wird in Schritt drei die Zugsbewehrung gehängt. In Arbeitsschritt vier erfolgt eine Bohrung unter 45° zur Platten-Stirnseite zur Aufnahme der Schubkomponente. Nach dem Anschluss der Schubbewehrung in Schritt fünf und sechs erfolgt in Arbeitsschritt sieben der Einbau der Wärmedämmung und eines Druckstempels. In Arbeitsschritt acht erfolgt die Betonage des neuen Balkons.

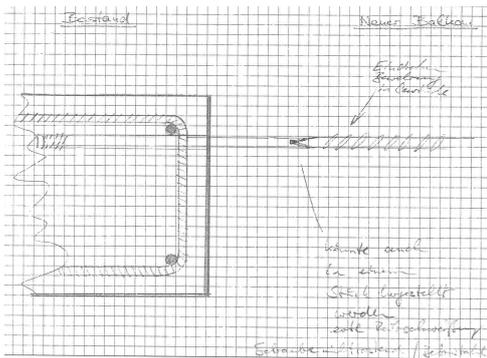
Aufbauend auf diesem Konzept (siehe Abbildung 5a) werden im weiteren Projektverlauf nach weiteren Voruntersuchungen zwei Varianten gemäß Abbildung 5b und 5c abgeleitet. Diese werden im Projektverlauf in Laborversuchen und numerischen Simulationen untersucht.



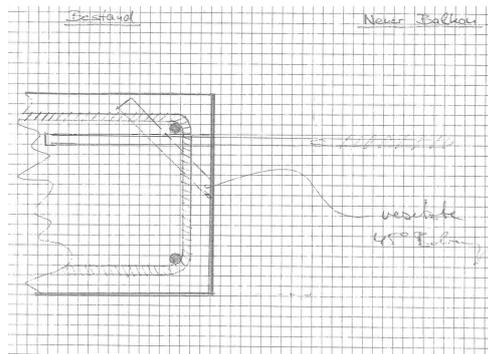
(a) Herstellung Bohrloch



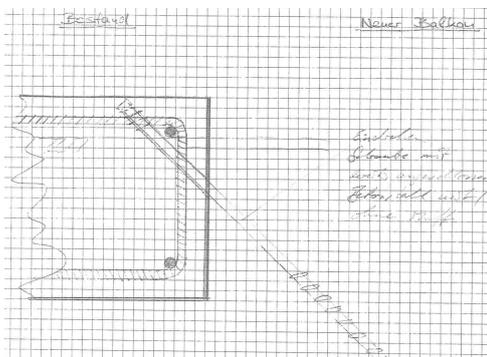
(b) Montage Betonschraube



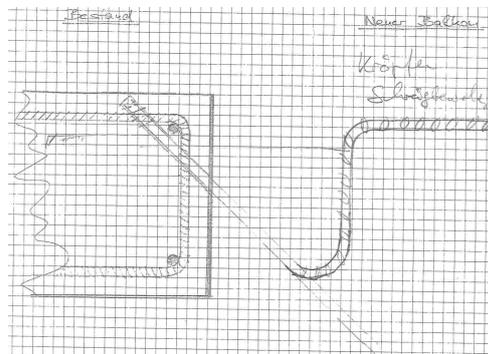
(c) Anschluss Zugbewehrung



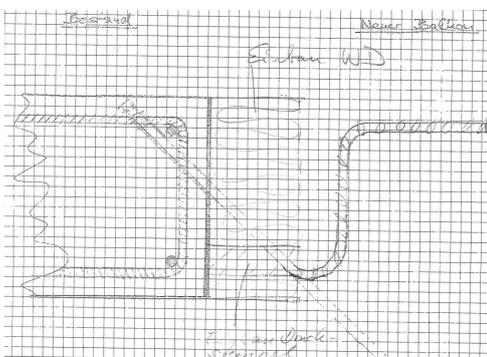
(d) Herstellung Bohrloch unter 45° zur Platten-Stirnseite



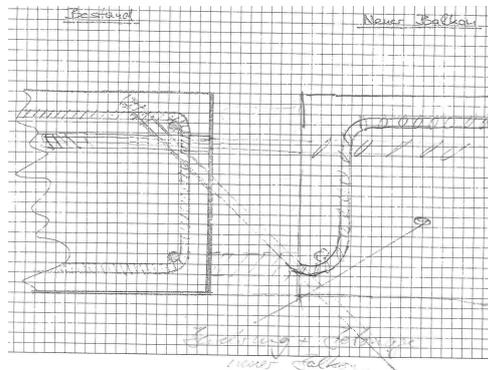
(e) Montage Schubschraube



(f) Anschluss Schubbewehrung

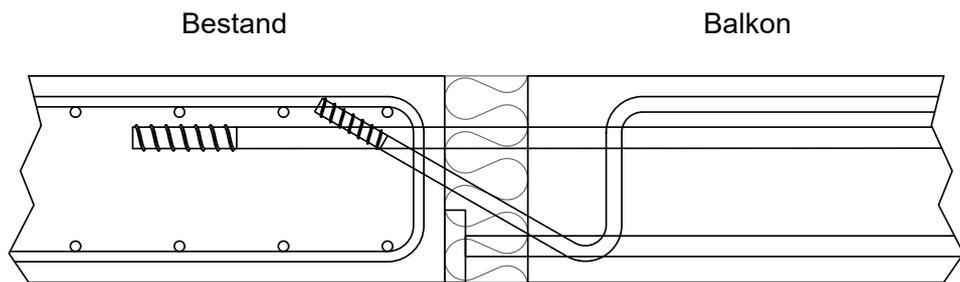


(g) Einbau Wärmedämmung und Druckelement

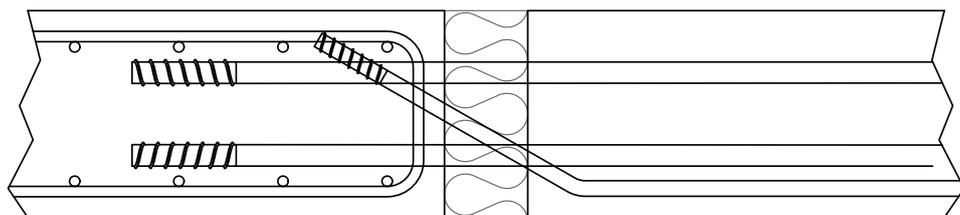


(h) Betonage neuer Balkon

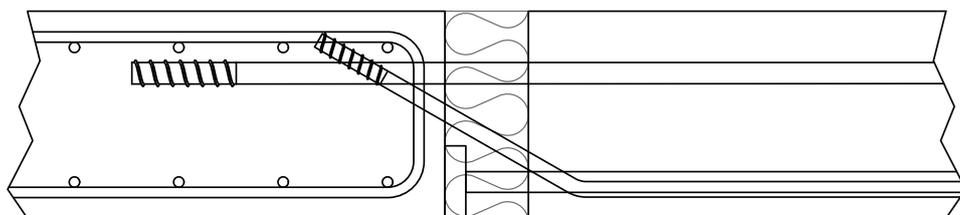
Abbildung 4: System I – eine Idee von Prof. FEIX



(a) Ursprüngliche Idee



(b) Variante a mit Druckschraube



(c) Variante b mit Druckstempel

Abbildung 5: System I

1.2 Stand der Technik

1.2.1 Thermische Entkopplungen

Erste Überlegungen zum bauphysikalischen Problem Wärmebrücke bei auskragenden Ortbetondecken stellt Eberhard Schöck bei einem Skiurlaub mit der Familie in Zermatt (Schweiz) zu Weihnachten 1979 an. Feuchte Zimmerdecken sieht er als Indiz für die schädliche Auswirkung einer Wärmebrücke durch die nach außen kragenden Betonteile an. Um diesem Problem entgegenzuwirken, entwirft er ein tragendes Wärmedämmelement, das Bauteile, die die thermische Hülle durchstoßen, thermisch entkoppelt. Die Marktreife erlangt das erste Produkt 1983. Es wird unter dem Namen „Schöck Isokorb“ in Deutschland eingeführt. (Schöck, 2016)

Die von Schöck aufgegriffene bauphysikalische Problemstellung „Wärmebrücke Balkon“ wird auch von Mitbewerbern des Marktes erkannt. Auch diese entwickeln eigene Lösungen für den Neubau zur Bewältigung des Problems. Für diese thermischen Entkopplungen per se, hat sich der Begriff Isokorb als Gattungsname etabliert. Dementsprechend sind die Produktnamen der Konkurrenz an diesen Begriff angelehnt und werden z.B. als Niro THERMOKORB, HIT ISO-Element, ISOPRO, ISITHERM, EgcoBox usw. vermarktet. (N. Fleischhacker, 2016)

Aufgrund steigender thermischer Anforderungen findet bei den Produkten aller Marktteilnehmer Optimierung statt. Die zu Beginn eingesetzten Dämmkörper mit einer Dämmstärke von zumeist 80 mm werden geometrisch optimiert. Zuletzt führen fast alle Marktteilnehmer thermische Entkopplungselemente mit einer Dämmstärke von 120 mm im Programm. Die thermische Performance der Elemente kann durch diese Maßnahme annähernd linear mit der Stärke des Dämmkörpers gesteigert werden. (N. Fleischhacker, 2016)

Für die Sanierung von Ortbeton-Balkonen ist nur die Produktlinie Schöck Isokorb RK in den Ausführungen RK25 und RK45 erhältlich.

1.2.1.1 Funktionsweise Die Funktionsweise der meisten Produkte am Markt ist ähnlich. Die thermische Entkopplung der Balkonragplatte vom Tragsystem Decke erfolgt über ein linienförmiges Element. In diesem Element werden die zu übertragenden Kräfte, Moment und Querkraft, in ein Fachwerk mit zwei Zugstreben für Zug aus dem Moment und Schub aus der Querkraft und eine Druckstrebe für Druck aus dem Moment und zusätzlichem Druckanteil aus der Querkraft punktuell über hoch ausgenutzte Querschnitte durch die thermische Gebäudehülle übertragen (siehe beispielhaft Abbildung 7b). Im Anschnittbereich zwischen Balkonplatte und thermischer Gebäudehülle kann es zu Feuchtigkeitsansammlungen kommen. Dadurch entsteht ein korrosionsförderndes Milieu. Daher sind in diesem Bereich nur Werkstoffe mit Widerstand und Zulassung gegen Korrosion einsetzbar. Aus diesem Grund und der wesentlich geringeren thermischen Leitfähigkeit von Edelstahl – der Wärmeleitkoeffizient λ ist etwa um Faktor vier geringer, verglichen mit Normalstahl – wird im Bereich der thermische Gebäudehülle zur Lastüberleitung Edelstahl für die Zug- und Druckübertragung eingesetzt. Da Edelstahl wesentlich teurer verglichen mit Normalstahl ist – Faktor vier bis acht – erfolgt die Lastein- und -ausleitung zumeist aus Kostengründen mit stumpf angeschweißter Normalstahlbewehrung. Für die Überleitung von Druck wird vermehrt faserbewehrter ultrahochfester

Beton (UHPC) eingesetzt. Dieser ist äußerst preisgünstig und kann eine bessere thermische Performance als Edelstahl aufweisen². Nachteile des UHPC sind das sehr spröde Materialverhalten – dieses nimmt mit der Festigkeit des Betons zu – und der, verglichen mit Stahl, um Faktor sechs bis sieben geringere E-Modul. Die zu übertragende Querkraft kann entgegen den gängigen Produkten auch als Druckstreben ausgeführt werden. Damit ergibt sich die Möglichkeit ein kombiniertes UHPC-Element für die Übertragung von Druck und Schub zu realisieren (siehe Abschnitt 1.2.1.3).

Zugelassen sind die thermischen Entkopplungselemente vorwiegend für ruhende Belastungen. Die Bemessung erfolgt zumeist mit Bemessungstabellen. Diese sehen als Mindestfestigkeit des Betons für Innenbauteile die Festigkeitsklasse C20/25 und für Außenbauteile die Festigkeitsklasse C25/30 vor. Die Abschätzung der Verformungen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit kann auf Basis des zugrunde gelegten Fachwerkmodells erfolgen. Generell erhöht sich im Vergleich zu einer durchgängigen Massivplatte die vertikale Verformung. Bei Anforderung an den Feuerwiderstand ist für die gesamte Konstruktion das Brandverhalten nachzuweisen. Je nach eingesetztem Dämmstoff wird dadurch unter Umständen die Anbringung von Brandschutzplatten erforderlich. (Sippel, 2012) (N. Fleischhacker, 2016)

1.2.1.2 System Schöck Als Erfinder der thermischen Entkopplung hat die Firma Schöck die längste Erfahrung mit Produkten für diesen Bereich und steht mit ihrem Produkt Schöck Isokorb als Synonym für diese Produktgattung. Zum jetzigen Zeitpunkt existieren für Beton-Beton-Verbindungen sowohl Produkte für den Neubau als auch ein Produkt für die Sanierung.

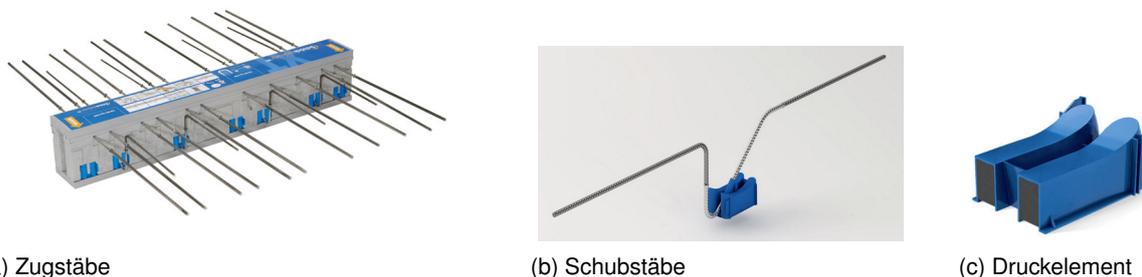
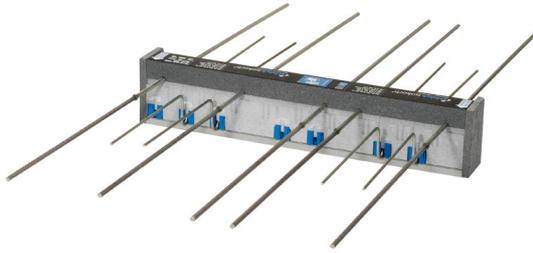


Abbildung 6: Exemplarische Darstellung Schöck Isokorb KXT mit 120 mm Dämmstärke (Schöck, 2016a)

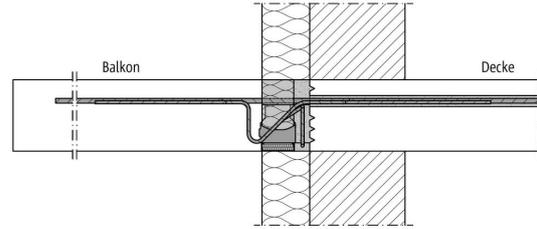
Neubau Der Schöck Isokorb KXT mit einer Dämmstärke von 120 mm ist in der vierten Generation verfügbar. Übertragung von Zug und Schub erfolgen über Edelstahl Zugstreben (siehe Abbildung 6). Druck wird über ein stahlfaserbewehrtes UHPC Druckelement übertragen. Versuchsergebnisse zum Schöck KXT50 und KXT90 als Referenz sind in Abschnitt 2.1.2.3 gegeben. (Schöck, 2016c)

Sanierung Der Schöck Isokorb RK (siehe Abbildung 7) entkoppelt thermisch auskragende Stahlbetonbalkone von Stahlbetondecken und ermöglicht Sicherheit gegen Bauschäden. Das Einsatzgebiet umfasst die Sanierung von Bestandsbauten mit Balkonen und die Neukonstruktion von

²Für die Beurteilung der thermische Performance bei Kraftübertragung kann ein Koeffizient aus Wärmeleitfähigkeit und einaxialer Zug- bzw. Druckfestigkeit und einer Gewichtung der Steifigkeit mit dem E-Modul gemäß (N. Fleischhacker, 2016) herangezogen werden.

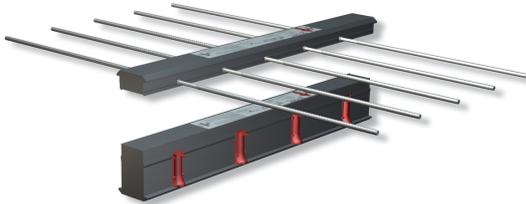


(a) Foto eines 1 m breiten Elements mit Dämmkörper, Zugstreben, schrägen Schubstreben und HTE-Drucklagern (Schöck, 2016b)



(b) Schnitt durch die Konstruktion (Schöck, 2013)

Abbildung 7: Schöck Isokorb Typ RK



(a) Exemplarische Darstellung Halfen HIT ISO-Element mit 120 mm Dämmstärke (*HIT ISO-Element* 2015)



(b) Exemplarische Darstellung AVI-Thermokorb mit 80 mm Dämmstärke und Brandschutzplatten (*NIRO-Thermokorb* 2015)

Abbildung 8: Systemlösungen von Halfen und AVI

Balkonen an den Bestand. Für letzteren Fall ist eine Anschlussbewehrung zwingend notwendig. Diese ist im Regelfall nicht vorhanden. Die Verarbeitung des Produkts sieht eine

1. Prüfung der Statik der Deckenkonstruktion,
2. die Auswahl der optimalen Balkon- und Schöck Isokorb-Lösung,
3. gegebenenfalls das Abschneiden des vorhandenen Balkons,
4. eine Oberflächenbehandlung für den Verguss,
5. die Herstellung der Löcher für den Bewehrungsanschluss,
6. das Einsetzen und Vergießen des Isokorbs und
7. die Erstellung des neuen Balkons in Ortbetonbauweise

vor.

Versuchsergebnisse zum Schöck RK25 und RK45 als Referenz sind in Abschnitt 2.1.2.3 gegeben. (Schöck, 2013) (N. Fleischhacker, 2016)

1.2.1.3 System Halfen Der Hersteller Halfen bietet seit 2014 eine thermische Entkopplung für den Neubau für Beton-Beton-Verbindungen mit einem kombinierten UHPC Druck-Schublager an (siehe Abbildung 8a). Die Stärke des Dämmkörpers beträgt dabei 120 mm. Die Übertragung von Zug erfolgt über Edelstahlstäbe mit stumpfgeschweißter Normalstahl-Anschlussbewehrung. (*HIT*

1.2.1.4 System AVI Der AVI Niro Thermokorb ist seit 2016 auch in Ausführungen mit 120 mm Dämmstärke erhältlich. Die Übertragung von Zug, Schub und Druck erfolgt über zwei Edelstahl-U-Profile und daran angeschweißte Bügel, die ein biegesteifes Rahmeneck bilden. Diese Konstruktion wird vom Hersteller Rippe genannt (siehe Abbildung 8b). Die Tragfähigkeit des Thermokorbs kann über die Anzahl der Rippen definiert werden. (NIRO-Thermokorb 2015)

1.2.2 Befestigungstechnik

Das im Projekt THERM-opti-BALKON verfolgte „System I“ setzt auf Beton- bzw. Verbundankerschrauben zur Lasteinleitung. Das sind Elemente der klassischen Befestigungstechnik. Der folgende Abschnitt erklärt die möglichen Montagearten, die zugrundeliegenden Wirkprinzipien von Verankerungsmitteln für Beton und die möglichen Versagensmechanismen der Befestigungsmittel.

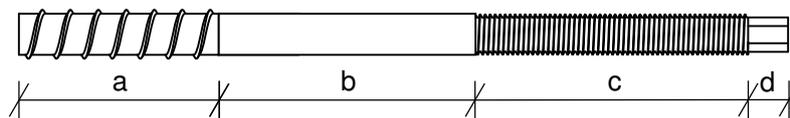


Abbildung 9: Abschnitte einer Betonschraube

1.2.2.1 Grundlegender Aufbau Ein Befestigungselement kann grob in die drei Bereiche

- (a) Verbundstück,
- (b) Schaft und
- (c) Montageeinrichtung

gegliedert werden (siehe dazu beispielhaft Abbildung 9). Das Verbundstück a am Schraubenfuß überträgt die angreifenden Zuglasten F_s über die Verbundlänge des Verankerungsmittels in den Ankergrund Beton. Am Schraubenkopf befindet sich das Anslusselement c, an das zu befestigende Bauteile angeschlossen werden und die Montageeinrichtung zum Setzen des Befestigungsmittels – zumeist ein Sechskant. Dazwischen ist der Schaft c. Je tiefer dieser in den Ankergrund reicht, desto tiefer ist das Verbundstück und somit die angreifende Kraft verankert. Seine Länge addiert mit der Verbundlänge l des Verbundstücks ergibt die Einbindetiefe t des Verankerungsmittels.

1.2.2.2 Kraftübertragung Die Kraftübertragung vom Verankerungsmittel in den Ankergrund Beton erfolgt über den durch die drei Wirkprinzipien (siehe Abbildung 10)

1. Formschluss,
2. Reibschluss und
3. Stoffschluss.

Ad (1) Die Übertragung der Kraft erfolgt beim Formschluss über eine mechanische Verzahnung, die zB. über ein Hinterschnitt erreicht wird.

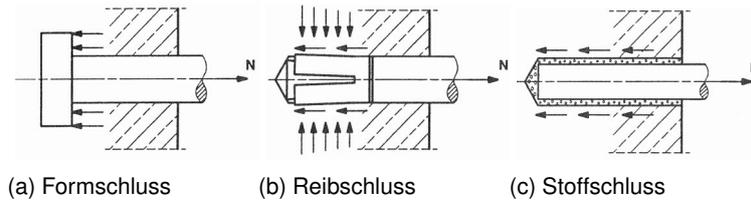


Abbildung 10: Wirkprinzipien von Verankerungsmitteln (Eligehausen und Mallée, 2000)

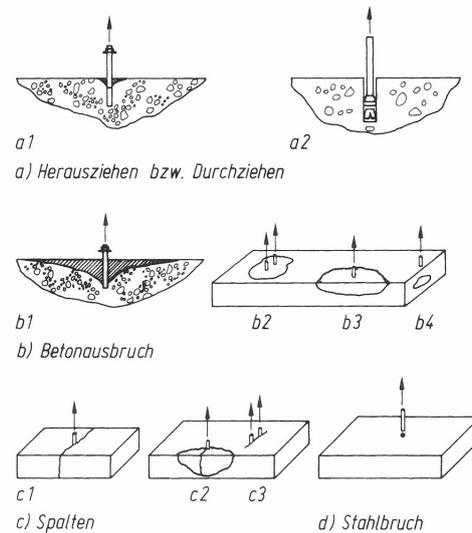


Abbildung 11: Versagensmechanismen unter Zugbeanspruchung (Eligehausen und Mallée, 2000)

Ad (2) Reibschluss wird über eine radial nach außen wirkende Spreizkraft erreicht. Diese resultiert in einer Gegenkraft der Bohrerlochwand. Bei Belastung des Befestigungselements wirkt die so erzeugte Reibkraft entgegen.

Ad (3) Beim Stoffschluss wird der Ringspalt zwischen Befestigungsmittel und Bohrerlochwand mit Verbundmörtel verfüllt. Die Kraftübertragung in den Ankergrund Beton erfolgt über Verbundwirkung.

Meist treten diese drei Wirkprinzipien in Kombination auf. Eine Unterscheidung ist oft nicht einfach, da Wechselwirkungen bestehen. Damit ist eine additive Überlagerung meist nicht möglich. (Eligehausen und Mallée, 2000)

1.2.2.3 Versagensmechanismen Das Tragverhalten von Verankerungsmitteln wird zumeist über (i) die Höchstlast, (ii) das Last-Verschiebungsverhalten und (iii) die Versagensart charakterisiert. Dabei ist die Höchstlast (i) ein wichtiger Indikator im Bereich der Tragfähigkeit (ULS – Ultimate Limit State), dessen Überschreitung zum Versagen führt. Sie bildet das Verankerungsvermögen des Befestigungsmittels ab. Mit dem Last-Verschiebungsverhalten (ii) wiederum kann die Gebrauchstauglichkeit (SLS) von Verankerungsmitteln geklärt werden. So kann eine zu große Verschiebung des Verankerungsmittels axial aus dem Bohrerloch zu weiterführenden Problemen bei den daran befestigten Bauteilen führen. Die Versagensart (iii) beschreibt, wie das Versagen bei der Höchstlast eintritt. Bei Befestigungsmitteln unter Zugbeanspruchung wird zwischen

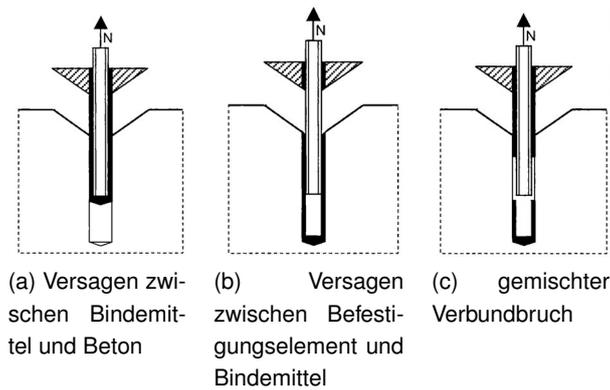


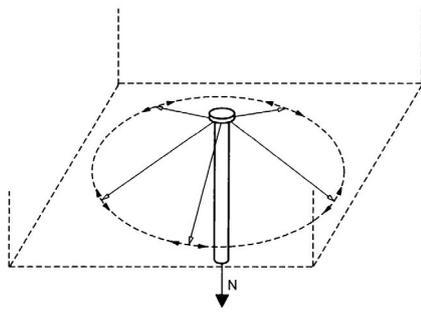
Abbildung 12: Verbundversagensarten Verbunddübeln basierend auf dem Wirkprinzip Stoffschluss (Eligehausen und Mallée, 2000)

- (a) Herausziehen,
- (b) Betonausbruch,
- (c) Spalten und
- (d) Materialversagen Verankerungsmittel (zumeist Stahlversagen)

unterschieden (siehe Abbildung 11). Je nach Beschaffenheit des Ankergrundes – Geometrie, Festigkeit usw. – und des Verankerungsmittels – Typ, (Bohrloch)-Durchmesser, Einbindetiefe bzw. Verankerungstiefe, Werkstofffestigkeit usw. – kann eine der Versagensarten eintreten. (Eligehausen und Mallée, 2000)

Ad a Herausziehen Beim Herausziehen wird das Verankerungsmittel bei Erreichen der Höchstlast aus dem Bohrloch gezogen. Bei Befestigungsmitteln, die auf dem Wirkprinzip Formschluss basieren, tritt Herausziehen bei zu geringer mechanischer Verzahnung ein. Lokale Überschreitungen der Betonzugfestigkeit führen zum Versagen der haltenden Betonkonsole bzw. -konsolen. Bei Verankerungsmitteln basierend auf Reibschluss wird bis zum Erreichen der Höchstlast diese Versagensart von der Haftreibung bestimmt und danach von der Gleitreibung. Dabei ist die Traglast von Zufälligkeiten in der Bohrlochgeometrie abhängig. Statistische Aussagen lassen sich nur durch eine große Anzahl von Versuchen treffen. Beim Wirkprinzip Stoffschluss kann es zum Versagen zwischen Befestigungsmittel und Verbundmörtel oder Verbundmörtel und Beton (siehe Abbildung 12) kommen. Auch ein beides kombiniertes Versagen ist möglich. Ab einer Verankerungstiefe von etwa fünf Verankerungsmitteldurchmessern tritt immer eine Kombination von Betonausbruch (siehe ad b) und Herausziehen auf. Im oberflächennahen Bereich entsteht dabei ein kleiner Ausbruchskegel. (Eligehausen und Mallée, 2000)

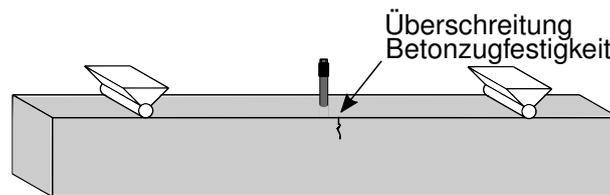
Ad b Betonausbruch In Folge einer Zugbelastung auf ein Verankerungselement bilden sich rotationssymmetrische Druckspannungen über die Mantelfläche eines Kegels aus (siehe Abbildung 13a). Das Kräftegleichgewicht wird über Ringzugspannungen erreicht (siehe ad c). Bei Überschreitung der Zugfestigkeit der orthogonal auf die Mantelfläche wirkenden Zugspannungen bricht ein Ausbruchkegel relativ spröde aus. Dabei beträgt der Winkel zwischen Grund- und Mantelfläche des Kegels zwischen 30° und 40° in Abhängigkeit der Einbindetiefe. Mit zunehmender Verankerungstiefe nimmt der Winkel zu. Die Variation über den Umfang des Kegels ist gering. (Eligehausen und



(a) Spannungszustand im Bereich eines auf Zug beanspruchten Kopfbolzens (Eligehausen und Mallée, 2000)



(b) Spalten eines Probekörpers aufgrund zu geringer Bauteildicke (Sigl, 2016)



(c) Schematische Darstellung des Biegezugversagens eines durch ein Verankerungsmittel belasteten Trägers

Abbildung 13: Versagensart Spalten

Mallée, 2000)

Ad c Spalten Spalten wird ein unangekündigtes sprödes Versagen durch einen oder mehrere Spaltrisse genannt (siehe Abbildung 13b). Es tritt auf, wenn die durch das Kräftegleichgewicht des Belastungskegels – aus ad b – resultierenden Ringzugspannungen vom Querschnitt nicht mehr aufgenommen werden können. Das tritt ein, wenn geometrische Einengung des Belastungskegels durch Verminderung der Rand- oder Achsabstände oder eine geringe Bauteildicke gegeben sind. (Eligehausen und Mallée, 2000)

Ein gutes Vorstellungsbeispiel kann ein schlanker Versuchsbalken sein, der das rotationssymmetrische Spaltversagen auf ein eindimensionales Biegeversagen reduziert (siehe Abbildung 13c).

Ad d Versagt das Befestigungsmittel selbst, spricht man vom **Materialversagen des Verankerungsmittels**. Da Befestigungsmittel überwiegend aus Stahl gefertigt werden, wird auch oft vom **Stahlversagen** gesprochen. Bei Befestigungsmitteln aus Stahl kann nach Erreichen der Fließgrenze nur mehr gering die Last gesteigert werden. Die Zunahme der Verformungen ist dabei groß. Bei Erreichen der Bruchlast reißt das Befestigungsmittel abrupt ab. (Eligehausen und Mallée, 2000)

Die beschriebenen Versagensarten stehen in der Wirkungskette Stahlversagen, Herausziehen, Spalten und zuletzt Betonausbruch. Die Reihenfolge ergibt sich aus der bestehenden Kausalkette. Kann durch ein ausreichendes Verankerungsvermögen des Verankerungsmittels Herausziehen ausgeschlossen werden, sind noch die verbleibenden drei Versagensmechanismen Betonausbruch, Spalten und Materialversagen des Verankerungsmittels möglich.

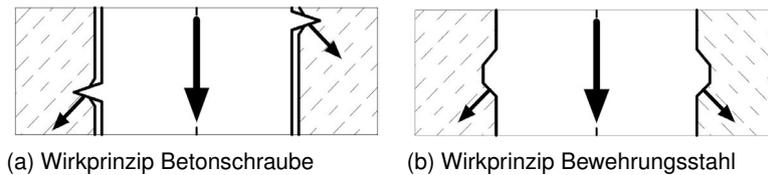


Abbildung 14: Lastübertragungsmechanismus von Betonschraube und Bewehrungsstahl im Vergleich (Eligehausen und Mallée, 2000)

1.2.2.4 Beton- und Verbundankerschrauben Betonschrauben, oft auch als Betonschraubanker, Schraubdübel oder Schraubanker bezeichnet, besitzen am Verbundstück ein besonderes Gewinde, folgend Betonschraubengewinde genannt, das an dessen Spitze mit einer gehärteten Zahnung versehen ist. Diese Zahnung schneidet in die Wandung eines Bohrlochs einen Hinterschnitt. Die Einbringung erfolgt dabei mit einem Tangentialschrauber.

Die Kraftübertragung erfolgt durch die formschlüssige Verbindung zwischen Betonschraubengewinde und eingeschnittenem Innengewinde des Ankergrundes Beton.

Der vom Hersteller der Betonschraube vorgegebene Bohrdurchmesser ist etwas größer als der Kerndurchmesser der Betonschraube. Dieser sogenannte Ringspalt zur leichteren Montage verbleibt. Er verhindert eine vollständige Einspannung der Schraube. Um eine zufriedenstellende Kraftübertragung zu ermöglichen, ist die Gewindehöhe im Vergleich zu klassischem Betonrippenstahl sehr viel größer (siehe Abbildung 14). (Eligehausen und Mallée, 2000)

Durch eine zusätzliche Klebung der Betonschraube mit Verbundmörtel und damit Schließung des Ringspalts kann das Tragvermögen von Betonschrauben maßgebend gesteigert werden (Sigl, 2016). Eingeklebte Betonschrauben werden in weiterer Folge als Verbundankerschrauben bezeichnet.

Montage Die Bohrlochmontage von nicht geklebten Betonschrauben gestaltet sich einfach. Abbildung 15 zeigt die dafür erforderlichen Arbeitsschritte. Zunächst wird das erforderliche Bohrloch hergestellt, wobei hammer- oder diamantgebohrt werden kann. Aufgrund der Wirkungsweise des Hinterschnitts ist keine raue Bohrlochoberfläche notwendig. Wird das Bohrloch hammergebohrt, verbleibt im Bohrloch i.A. viel Bohrmehl. Um das Einbringen der Betonschraube zu erleichtern, muss das Bohrloch gereinigt werden. Dazu wird das Bohrloch ausgeblasen bzw. -gesaugt, anschließend mit einer Stahldrahtbürste (siehe Abbildung 16b) gebürstet und zum Schluss nochmals ausgeblasen bzw. -gesaugt. Anschließend kann die Betonschraube mit einem Tangentialschrauber (siehe Abbildung 16a) gesetzt werden. Im Anschluss daran kann die Betonschraube sofort mechanisch beansprucht werden.

Montage Verbundankerschraube Im Falle einer Klebung der Betonschraube mit dem Verbundmörtel vom Typ Chemofast CF-T 300 V (siehe Abbildung 17) gestaltet sich das Setzen der Betonschraube ähnlich wie ohne Verbundmörtel. Abbildung 18 illustriert wiederum die erforderlichen Arbeitsschritte. Nach der Bohrlochherstellung und -säuberung wird der Verbundmörtel mit einer Handpistole eingebracht. Anschließend wird die Betonschraube mit einem Tangentialschrauber gesetzt. Dabei sollte Verbundmörtel aus dem Bohrloch austreten. Ist das nicht der Fall, wurde zu wenig Mörtel injiziert. Auch in diesem Fall kann die Verbundankerschraube direkt nach der Montage

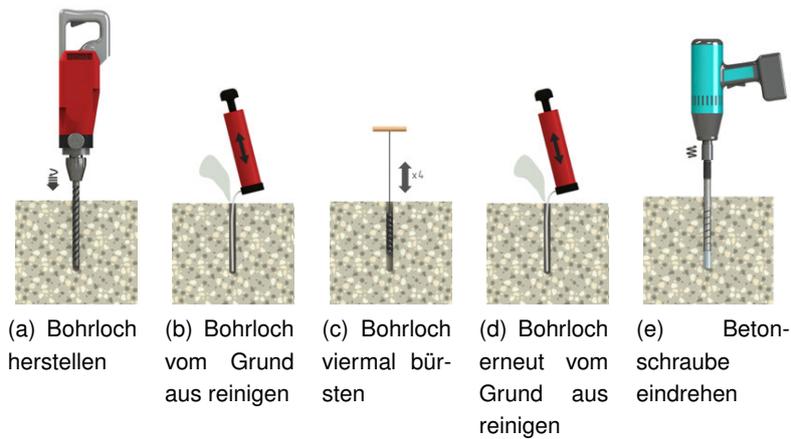


Abbildung 15: Montagehinweise TOGE Betonschrauben – basierend auf (*TOGE Dübel Produktprogramm 2015*)



(a) Makita Tangentialschlag-schrauber



(b) Stahlrundbürste HIT-RB 16 (*Hilti Dübeltechnik 2016*)

Abbildung 16: Montagewerkzeuge



(a) Koaxial Kartusche mit 410 ml und 14-Wendel-Statikmischer



(b) Kartuschenpistole

Abbildung 17: Spezial-Verbundmörtel CF-T 300 V für TOGE Betonschrauben (*TOGE Dübel Produktprogramm 2015*) (*CHEMOFAST Anchoring GmbH 2016*)

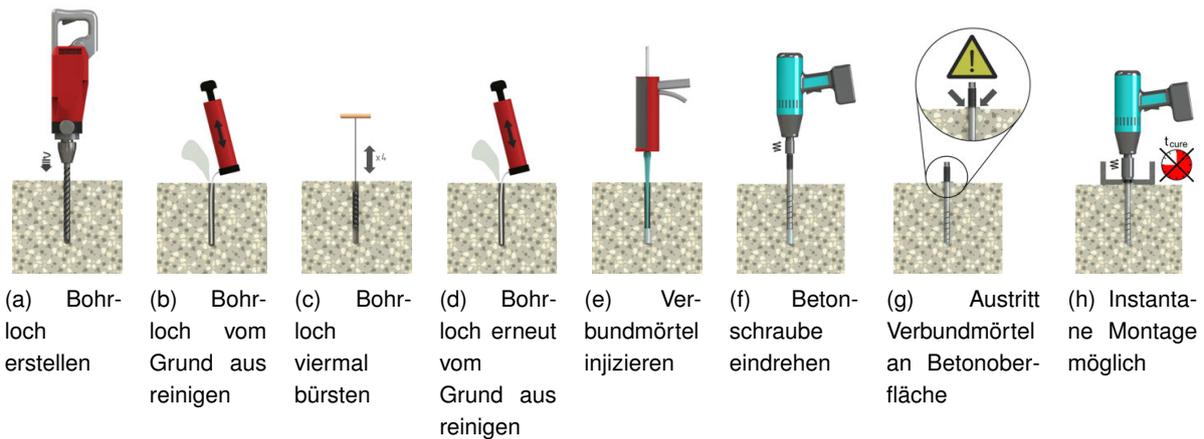


Abbildung 18: Montagehinweise TOGE Verbundankerschraube – basierend auf (TOGE Dübel Produktprogramm 2015)

mechanisch beansprucht werden. Das volle Verankerungsvermögen wird jedoch erst nach Abbinden des Verbundmörtels erreicht.

1.3 Verwendete Methoden³

1.3.1 Experimentelle Untersuchungen

Die experimentellen Untersuchungen zum mechanischen Verhalten des entwickelten nachträglichen thermisch entkoppelten Balkonanschlusses finden in den Laboren der technischen Versuchs- und Forschungsanstalt (TVFA) der Universität Innsbruck im Zeitraum 2014 bis 2015 statt. Die experimentellen Untersuchungen erfolgen dabei in Einzel- und Bauteilversuchen.

In den entwickelten Versuchsanordnungen kommen vorwiegend die Baustoffe Beton für das Deckensystem und für den neu errichteten Balkon, Stahl als Bewehrungsstahl für Decke und Balkon, Bau- bzw. Edelstahl für die thermischen Entkopplungselemente und Dämmstoff für die thermische Gebäudehülle zur Anwendung.

Dabei muss die Betonfestigkeit der Prüfkörper aus allen Betonchargen überwacht werden. In allen Chargen wird eine Normfestigkeitsklasse von C25/30 bestellt. Um Schwankungen der realen zur bestellten Normfestigkeitsklasse quantifizieren zu können, erfolgt für alle Betonchargen eine Prüfung der Norm-Würfel-Druck-Festigkeit mit normgelagerten Probekörpern nach 28 Tagen. Abbildung 19 zeigt ausgewählte Bilder zur Herstellung der Probekörper für die Festigkeitsprüfungen bzw. für die experimentellen Untersuchungen und zu Frischbetonuntersuchungen.

Die Herstellung der Betonprobekörper erfolgt in Anlehnung an folgendem Arbeitsablauf:

1. Bau und Vorbereitung der Schalung
2. Einbau von Bewehrung und Einlegeteilen
3. Betonage und Nachbehandlung

³Übernommen aus (N. Fleischhacker, in Bearbeitung) und nachbearbeitet



(a) Bewehrungskorb mit thermischer Referenz-Entkopplung



(b) Fertiggestellte Prüfkörper



(c) Herstellung der Betonprüfwürfel



(d) Betonage der Prüfkörper für Einzelversuche



(e) Ermittlung Luftbohrengehalt



(f) Füllen Behälter Ermittlung Luftbohrengehalt



(g) Betonage der Prüfkörper für Bauteilversuche



(h) Herstellung Prisma Bruchenergie



(i) Ermittlung Ausbreitmaß

Abbildung 19: Bilddokumentation der Betonagen

4. Vorbereitung der Prüfkörper für Einzel- und Bauteilversuche
5. Bestimmung der Normfestigkeiten
6. Bestimmung der Bauteilfestigkeiten bei Versuchsdurchführung

Ad 1 Am permanenten Schalboden wird auf einer ausgelegten Baufolie die Abschalung für die Versuchskörper vom Tischler nach Planvorgabe aufgebaut. Zusätzlich kommen frei stehende Schalungen für einzelne Prüfkörper zur Anwendung.

Ad 2 Die Anschlussbewehrung und Einlegeteile für das Probenhandling werden gemäß dem Versuchsprogramm verlegt. Die Lagesicherung der Einlegeteile erfolgt mit Nägeln an der Schalung. Dadurch ist unproblematisches Ausschalen gewährleistet. Die Betondeckung wird mit Drunterleisten, Ring- und Faserbetonabstandhaltern sichergestellt. Im Regelfall ist die Betondeckung c_{nom} mit 2 cm angesetzt. Das entspricht dem normativen Minimum zufolge ÖNORM B 1992-1-1 und ist für Bestandsbauten eine praktische Abschätzung.



(a) Einfahrt des Mischwagens in die Betonhalle



(b) Einbringung Beton

Abbildung 20: Betonage von Versuchsserie VS2

Ad 3 Lieferbeton wird in einem Betonmischwagen angeliefert. Dieser fährt nach erfolgter Durchmischung in die Betonhalle (siehe Abbildung 20a). Die Einbringung des Betons erfolgt über die Mischwagenrutsche. Der Einbau wird arbeitsteilig von drei Personen durchgeführt. Nach Einbau von ca. 1 m^3 Beton wird eine Betonprobe zur Ermittlung der Frischbetonkennwerte und zur Herstellung der Betonprüfwürfel und -prismen für die Festigkeitsprüfungen gezogen.

Ad 4 Die Ausschalung erfolgt frühestens nach sieben Tagen. Nach der Ausschalung werden die Probekörper im Laborinnenbereich bei Raumtemperatur gelagert. Zu diesem Zeitpunkt kann die Vorbereitung der Probekörper für die experimentellen Untersuchungen beginnen. Je nach Testkonfiguration werden dafür Bohrlöcher gebohrt, Verankerungsmittel gesetzt und Anbauteile montiert.

Eine Prüfung der Betonprobekörper der Einzel- bzw. Bauteilversuche erfolgt frühestens nach 28 Tagen.

Ad 5 Die Bestimmung der Normfestigkeiten erfolgt an normgemäßen, im Wasserbad und anschließend in der Klimakammer gelagerten Probekörpern. Über Bestimmung der mittleren Würfel-druckfestigkeit f_{cm} lässt sich auf Basis von EN 1992-1-1 die Norm-Betonfestigkeitsklasse ableiten.

Ad 6 Zur Interpretation der Versuchsergebnisse ist insbesondere die Ermittlung von Betonbauteilfestigkeiten⁴ von Interesse. Daraus können schwankende Betonfestigkeiten der Betonchargen festgestellt werden. Die erstellten Prüfwürfel und -prismen für die Bestimmung der Bauteilfestigkeiten werden nach der Ausschalung in unmittelbarer örtlicher Nähe zu den Betonprüfkörpern für die experimentellen Untersuchungen gelagert. Im Zeitraum der Labortests einer Versuchsserie werden Würfel-druckfestigkeit, Spaltzugfestigkeit, E-Modul (optional) und Bruchenergie (optional) der bauteilgelagerten Prüfkörper bestimmt.

1.3.1.1 Einzelversuche In den durchgeführten Einzelversuchen wird das Trag- bzw. Verankerungsverhalten des gewählten Rückverankerungsmittels Beton- bzw. Verbundankerschraube (eingeklebte Betonschraube) analysiert und die charakteristischen Versagensformen auf Zug gemäß Abschnitt 1.2.2 im Labor untersucht. Dazu werden Ausziehversuche des jeweiligen Verankerungsmittels in den Versuchsreihen „Einzelversuche weite Stützung mit Randeinfluss“, „Einzelversuche enge Stützung – Pull-Out-Test“ und „Einzelversuche weite Stützung ohne Randeinfluss“ durchgeführt. Je nach Versuchsanordnung werden in jeder Versuchsreihe unterschiedliche Versagensmechanismen gemäß Abschnitt 1.2.2 begünstigt.

In der Versuchsreihe „Einzelversuche weite Stützung mit Randeinfluss“ werden Beton- bzw. Verbundankerschrauben im Randbereich von Betonplatten untersucht mit dem Ziel, deren Tragfähigkeit zu ermitteln. Relevante Versagensmechanismen in diesen Versuchen sind insbesondere Stahlversagen, Versagen infolge Betonausbruch und Herausziehen.

In der Versuchsreihe „Einzelversuche enge Stützung – Pull-Out-Test“ werden die Versagensmodi Stahlversagen und Herausziehen untersucht.

Die kleine Versuchsreihe „Einzelversuche weite Stützung ohne Randeinfluss“ dient der Validierung des numerischen mechanischen Modells.

Alle Versuche werden messtechnisch erfasst. Es wird die Schraubenkraft $F_s(t)$ über die Versuchsdauer und die zugehörige Relativverschiebung von Schraube (Kopf und/oder Fuß) zur Betonoberfläche gemessen. In einer speziellen Versuchsanordnung kommen zusätzlich Dehnmessstreifen zur punktuellen Dehnungsmessung im Verbundbereich der Betonschrauben zum Einsatz.

Die durchgeführten Einzelversuche dienen in erster Linie als Planungsgrundlage für die weiterfüh-

⁴Festigkeit, die an Normprüfkörpern (Würfel und Prisma) bestimmt wird, die unter den gleichen Bedingungen wie die Probekörper für die Einzel- bzw. Bauteilversuche gelagert werden. Diese entsprechen damit möglichst der tatsächlichen Festigkeit der Probekörper für die Einzel- bzw. Bauteilversuche.



(a) Versuch am Teilsystem – nur der Bereich Anschlussdecke ist als Betonprüfkörper abgebildet



(b) Versuch am Gesamtsystem – das Gesamtsystem Anschlussdecke und Balkon sind als Betonprüfkörper abgebildet

Abbildung 21: Versuchsaufbau am Teil- und Gesamtsystem

renden komplexeren Bauteilversuche und liefern Werkstoffkennwerte für die Entwicklung eines Bemessungsmodells.

1.3.1.2 Bauteilversuche In Bauteilversuchen wird die mechanische Tragfähigkeit des entwickelten nachträglichen thermisch entkoppelten Balkonanschlusses von „System I“ untersucht. Dabei ist den Einwirkungen Moment und zugehöriger Querkraft, resultierend aus dem Eigengewicht des Balkons selbst und den Lasten auf diesem, aufgespaltet in ihre Grundkomponenten Zug, Schub und Druck, ein angemessener Bauteil-Widerstand entgegenzusetzen. Um die Bauteil-Widerstände zu ermitteln, werden verschiedene Versuchssetups entwickelt. Bei der Belastung wird zwischen Drei- und Vier-Punkt-Biegezug-Bauteilversuchen unterschieden. Bei den Drei- und Vier-Punkt-Versuchen handelt es sich um einen Versuchsaufbau mit statisch bestimmtem mechanischen System und Anschlussbewehrung in der Bestandsdecke. In der Drei-Punkt Variante liegen Balkon und Bestandsdecke – verbunden durch das entwickelte thermischen Entkopplungselement – auf zwei gelenkig gelagerten Auflagern auf und werden zentrisch im Bereich der in der praktischen Anwendung vorhandenen Auflagerwand belastet. Somit werden Zug, Schub und Druck gemeinsam übertragen. In der Vier-Punkt Variante wird das gleiche mechanische System durch ein Kräftepaar gleichen Betrags belastet. Dadurch werden nur Zug und Druck im Bereich der thermische Entkopplung übertragen. Die Querkraft ergibt sich zwischen den Einzelkräften zu 0.

In der Versuchsanordnung Teilsystem (siehe Abbildung 21) wird nur die Bestandsdecke als Probekörper ausgeführt, während beim Gesamtsystem an den Probekörper „Bestandsdecke“ ein Balkon in Ortbetonbauweise mit dem entwickelten thermischen Entkopplungselement „System I“ verankert wird (siehe Abbildung 21).

Aufbauend auf den Ergebnissen der Einzelversuche kommt vorwiegend das Betonschraubengewinde vom Typ TOGE HSM-H mit einem Nenndurchmesser von 22 mm in Ausführung mit M20 und M24 ISO-Anschlussgewinde zur Anwendung.

Die Versuchsdurchführung erfolgt zumeist zweistufig. In vorausgehenden Tastversuchen wird das entwickelte Versuchssetup getestet und Mängel festgestellt. Auf Basis der Tastversuche erfolgt die endgültige Festlegung der Versuchsparameter (wie z.B. Belastungsgeschwindigkeit usw.) für die Versuchsserien.

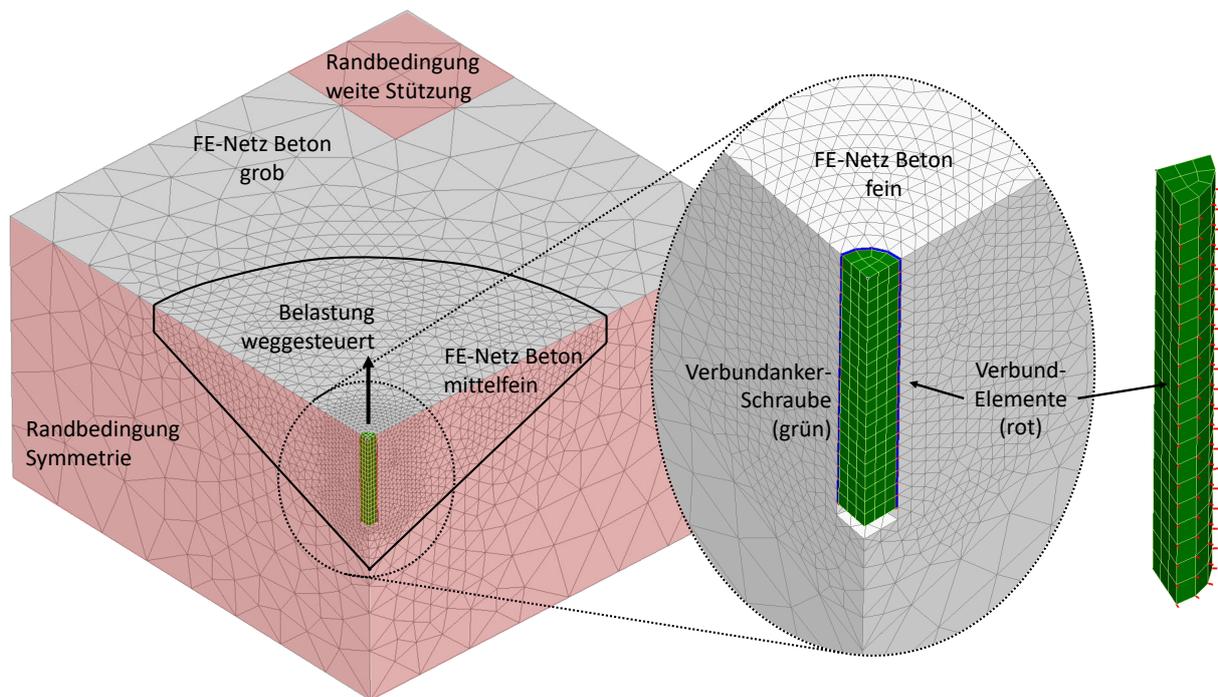


Abbildung 22: Numerisches Viertelmodell zur Nachrechnung der Versuche „weiter Stützung“

1.3.2 Numerische Untersuchungen

1.3.2.1 Numerische mechanische Untersuchungen Die numerischen mechanischen Detailuntersuchungen werden in Kooperation mit Prof. Ožbolt von der Universität Stuttgart – Institut für Werkstoffe im Bauwesen – durchgeführt. Ziel der Kooperation ist die Entwicklung eines Berechnungs-Modells für Beton- und Verbundankerschrauben. Dabei kommt das Finite-Elemente-Programm MASA (MAcroscopic Space Analysis) zum Einsatz. Dieses ist spezialisiert auf die nicht-lineare dreidimensionale Analyse von Strukturen aus quasi spröden Materialien wie Beton, Steinen, Keramiken usw. Das Hauptaugenmerk der Software liegt dabei auf der nichtlinearen Analyse von Beton- und Stahlbetonkonstruktionen. Mit der Software können dreidimensionale Analysen beliebiger Struktur wie Rahmen, Platten, Schalen usw. durchgeführt werden. Aufgrund des hohen Speicherbedarfs bietet sie sich aber besonders für Detailuntersuchungen zur Optimierung von Strukturdetails an. (Ožbolt, 2010)

Die Entwicklung des numerischen Modells basiert auf den experimentellen „Einzelversuchen mit weiter Stützung“. Der reale Versuchskörper mit einer Länge und Breite von jeweils 1000 mm und einer Höhe von 300 mm wird unter Ausnutzung der Symmetrie als Viertel modelliert. Die Flächen infolge des Symmetrieschnitts werden mit der dafür erforderlichen Verschiebungsrandbedingung versehen und in Abbildung 22 rot markiert. Das real vorhandene Dreibein gemäß Abbildung ?? wird in Näherung als Verschiebungsrandbedingung in Zugrichtung in der Ecke abstrahiert (siehe rote Markierung).

Die Diskretisierung des in grüner Farbe dargestellten Verankerungsmittels erfolgt mittels Hexaederelementen und wird fein gewählt. Der Beton wird mittels Tetraederelementen diskretisiert und das Finite-Elemente-Netz wird im Nahbereich des Verankerungsmittels und des zu erwartenden Aus-

bruchkegels mittelfein weitergeführt. In wenig beanspruchten Bereich des Betons wird ein größere Elementkantenlänge gewählt.

Die Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung soll die Interaktion der im experimentellen Versuch zur Anwendung gekommenen Verbundankerschraube TOGE HSM-H 22x320 M20 bei gegebener Betonfestigkeit abbilden. Diese wird im Modell den rot eingezeichneten eindimensionalen Bar-Elementen zwischen dem Verankerungsmittel und dem Beton hinterlegt. Der Einfluss verschiedener Verbundspannungs-Schlupf-Beziehungen wird ebenfalls untersucht. Die blau dargestellten Interface-Elemente dienen ausschließlich zur Verbesserung der numerischen Stabilität des Modells und werden mit einer sehr geringen Steifigkeit berücksichtigt.

Die Belastung wird weggesteuert bei maximalen Inkrementsgrößen von 0,01 mm aufgebracht (siehe Pfeilabbildung).

Für die Materialkennwerte des Botenmodells werden aus dem Versuchsprogramm Würfeldruck- bzw. Spaltzugfestigkeiten verwendet. Diese können in einaxiale Zug- und Druckfestigkeiten zur Eingabe in das Programm MASA umgerechnet werden. Aus Erfahrungen kann dabei die einaxiale Druckfestigkeit mit

$$f_c = 0.8 \cdot f_{c,cube} \quad (1)$$

zu 39,97 MPa ermittelt werden. Die einaxiale Zugfestigkeit wird ebenfalls aus Erfahrungen mit

$$f_{ct} = 0.9 \cdot f_{ct,sp} \quad (2)$$

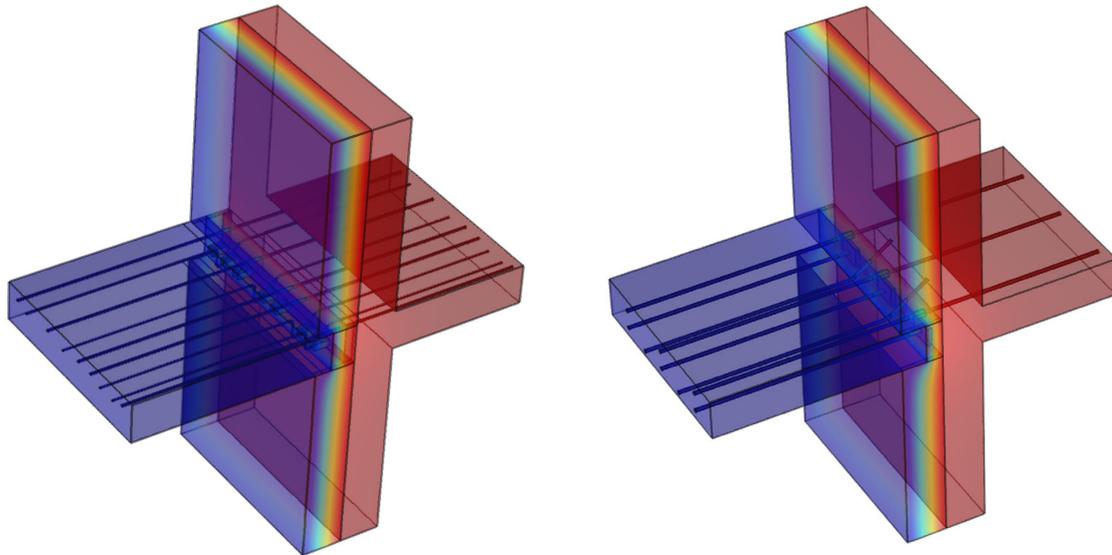
zu 3,50 MPa bestimmt. Die Bruchenergie wird als Erfahrungswert zu 0,10 N/mm und die Querdehnzahl zu 0,18 angesetzt.

1.3.2.2 Numerische thermische Untersuchungen Für die Bewertung eines thermischen Entkopplungselements ist der Wärmebrückenkoeffizient heranzuziehen. Für die Ermittlung von diesem bieten sich numerische Simulationen an. Diese liefern mit Stand der Technik sehr genaue Ergebnisse. Aufwändige thermische Laborversuche sind daher nicht notwendig. Auf diese wird deshalb verzichtet.

Im vorliegenden Fall werden die numerischen thermischen Simulationen mit dem Programm COMSOL Multiphysics in der Version 5.0 durchgeführt. Die in dieser Software implementierte numerische Näherungslösung basiert auf der Finite-Elemente-Methode.

Basis der Simulationen sind die Berechnungsmodelle gemäß Abbildung 23. Die Vorgehensweise zur Erstellung dieser ist wie folgt:

Die Simulationen erfolgen auf Basis eines 3D-Geometriemodells. Dieses wird mit der CAD Software Rhinoceros 3D erstellt. Da es sich bei Balkonen um eine längenbezogene Wärmebrücke handelt, wird zweckmäßig jeweils ein 1 m breiter Streifen modelliert.



(a) Modell Schöck Isokorb RK25

(b) Modell System I

Abbildung 23: Berechnungsmodelle

Die Wärmeleitfähigkeit des Betons wird mit $2,00 \text{ W}/(\text{m K})$ und die des Dämmstoffes mit $0,04 \text{ W}/(\text{m K})$ angenommen. Für die Bewehrung werden für Bewehrungsstahl die Werte $\lambda = 60 \text{ W}/(\text{m K})$ und für nichtrostenden Stahl $\lambda = 15 \text{ W}/(\text{m K})$ angesetzt.

An den Schnittflächen – vorne und hinten und oben und unten – besteht Symmetrie. Somit darf an diesen kein Wärmefluss stattfinden. Sie können daher adiabat angesetzt werden. Der Wärmeaustausch der sonstigen Oberflächen mit der Umgebung wird je nach Neigung der Fläche mit Wärmeübergangswiderständen abgebildet. Diese fassen die Wirkungen der Wärmeleitung aus Strahlungsaustausch, Wärmeleitung und Konvektion zusammen. Die Beschreibung erfolgt mit dem temperatur- und richtungsabhängigen Wärmeübergangskoeffizienten – dem Kehrwert des Wärmeübergangswiderstandes. Vereinfachend kann dieser für die Oberflächen der Gebäudeinnenseite mit Wohnraumtemperatur je nach Orientierung der Wandflächen

- bei vertikalen Flächen zu $U_{SI} = 7,69 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$,
- bei horizontalen nach oben zeigenden Flächen zu $U_{SI} = 10 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$
- und bei horizontalen nach unten zeigenden Flächen zu $U_{SI} = 5,88 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$

konstant angenommen werden. An den Außenoberflächen kann für alle Orientierungen der Wert $U_{SE} = 25 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ angenommen werden, da die Richtungsabhängigkeit nur mehr gering ist.

Die Erstellung des Finite-Elemente-Netzes inkl. Netzverfeinerung erfolgt automatisiert im Programm COMSOL. Zur Kontrolle der vorgeschlagenen Netzgröße wird für ausgewählte Modelle eine Netzstudie unter konsistenter Netzverfeinerung durchgeführt und das Ergebnis auf Konvergenz geprüft. Im Postprocessing wird über Integration der Wärmestromdichte q über die Außen- bzw. Innenoberfläche der Gesamtwärmestrom Q durch die thermische Entkopplung ermittelt. Dabei muss als Kontrolle gemäß dem 1. Hauptsatz der Thermodynamik $Q_{aussen} + Q_{innen} = 0$ ergeben.

1.3.3 Bemessungsansatz

Aus den durchgeführten experimentellen und numerischen Versuchen wird in Anlehnung an vorhandene Normwerke ein Bemessungsansatz entworfen.

2 Ergebnisse⁵

2.1 Experimentelle Untersuchungen

2.1.1 Einzelversuche

2.1.1.1 Einzelversuche „weite Stützung“ mit Randeinfluss In der Versuchsreihe „Einzelversuche weite Stützung mit Randeinfluss“ wird das mechanische Verhalten von Betonschrauben als einzelnes Verankerungsmittel unter Ausschluss der Effekte von Gruppenverankerungen getestet. Der Einbau der Beton- und Verbundankerschrauben erfolgt dabei randnah. Die geometrische Begrenztheit des das Verankerungsmittel umgebenden Ankergrundes Beton verändert das Tragverhalten des Tragsystems. Tendenziell wird durch die Randnähe die in den Ankergrund übertragbare Last verringert.

Eine Klebung der Betonschrauben und damit die Ausführung als Verbundankerschraube steigert durchwegs die Traglast. Für den Anschluss an vorhandene Bewehrung, ist die Entkopplung des Schraubenschaftes weiter zu untersuchen. Der Nutzen eines größeren Schraubendurchmessers wie bei der Betonschraube HSM-H 22x320 M20 überwiegt den Verlusten an innerem Hebel bei der Übertragung des Biegemoments und ist deshalb vorzuziehen. Dafür bedarf es weiterer Versuche mit TOGE HSM-H 22x320 M20 Betonschrauben.

Aus den Ergebnissen lässt sich ein Mindest-Randabstand von 60 mm für Folgeuntersuchungen ableiten. Erst ab diesem Randabstand ist eine sinnvolle und praxisnahe Anschlussbewehrung für TOGE HSM-H 22x320 M20 Betonschrauben möglich.

Für die Schubübertragung ist die Tragfähigkeit von Betonschrauben mit Bohrlochdurchmesser 16 mm vom Typ TOGE TSM B16 ausreichend, wenn ein Einschraubwinkel größer 45° gewählt wird.

2.1.1.2 Einzelversuche „enge Stützung“ – Pull-Out-Tests Durch die „enge Stützung“ einzelner Verankerungsmittel – im vorliegenden Fall vorwiegend Beton- bzw. Verbundankerschrauben – werden die Versagensmechanismen „Spalten“ und „Betonausbruch“ (siehe Abschnitt 1.2.2) unterbunden und somit die Versagensarten „Herausziehen“ oder „Stahlversagen“ erzwungen. Beim „Herausziehen“ kommt es in der Grenzfläche von Verbundstück⁶ und Ankergrund Beton zum Versagen. Die dabei auftretende Höchstlast stellt somit die maximal übertragbare Kraft eines Verbund-

⁵Übernommen aus (N. Fleischhacker, in Bearbeitung) und nachbearbeitet

⁶Das Verbundstück ist jener Abschnitt des Verankerungsmittels, der dieses mit dem Ankergrund verbindet und die Lasten vom Verankerungsmittel in den Ankergrund überleitet. Bei Betonschrauben stellt das Verbundstück somit das Betonschraubengewinde dar.

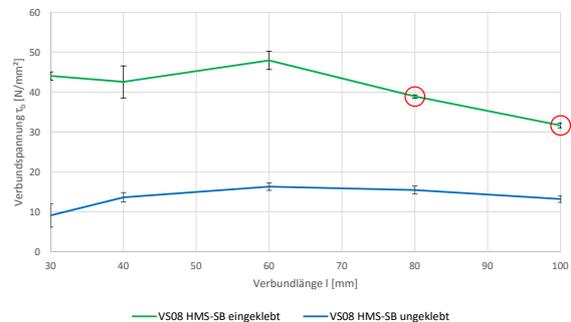
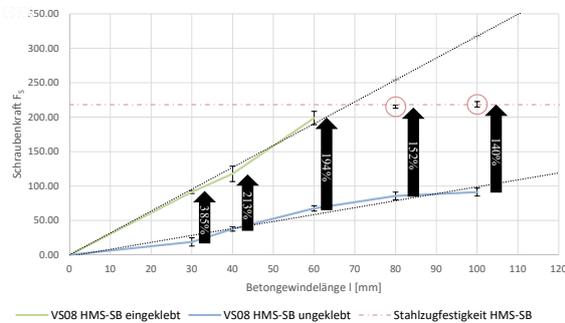
stücker in den jeweiligen Ankergrund dar. Ist die Last durch „Herausziehen“ größer als die Stahlzugfestigkeit des Verankerungsmittels, tritt ein Stahlversagen ein. Die geschilderte Versuchsanordnung wird zu englisch „Pull-Out-Test“ genannt.

Die durchgeführten Versuche sind aus zweierlei Gründen für die Entwicklung eines Rückverankerungssystems notwendig: Zum einen sieht das vorgeschlagene „System I“ Betonschrauben unter axialer Zugbelastung mit relativ großen Verankerungstiefen vor. In solchen Konfigurationen ist ein Ausziehversagen wahrscheinlich und zu untersuchen. Zum anderen ist für eine numerische Modellierung von Betonbauteilen mit Bewehrungseinlagen bzw. Verankerungsmitteln eine experimentelle Messung des Verbundspannungs-Schlupf-Verhaltens erforderlich. Um tieferes Verständnis über die Mechanismen der Krafteinleitung vom Verbundstück in den Ankergrund zu erlangen, sind Einzelversuche mit „enger Stützung“ erforderlich.

Aus Tastversuchen mit ersten Messungen der Verbund-Schlupf-Beziehungen unterschiedlicher Schraubenkonfigurationen wird in Folge eine gesamthafte Untersuchung bestehend aus drei Versuchsprogrammen zur Ermittlung

- der maximalen Verbundspannung (Sigl, 2014)
- der Verbund-Schlupf-Beziehung (Lechner u. a., 2016)
- des Verbundverlaufes über die Verbundlänge (Wattl, N. Fleischhacker und Feix, 2016), (Lechner u. a., 2016)

entwickelt und durchgeführt.



(a) Höchstwert der Schraubkraft $F_{ms,max}$ über der Verbundlänge l aufgetragen

(b) Höchstwert der Verbundspannung τ_{SB} über der Verbundlänge l aufgetragen

Abbildung 24: Versuchsserie VS08 – Höchstwert der Schraubkraft $F_{ms,max}$ bzw. der Verbundspannung τ_{SB} über der Verbundlänge l aufgetragen – Prüfkörper aus Betoncharge B5

Maximale Verbundspannung Um belastbare Referenzwerte der Höchstlast bei der Versagensart „Herausziehen“ für Betonschrauben zu erhalten, wird in den vorliegenden Versuchen auf eine Durchbohrung der Probekörper verzichtet. Damit ist eine Messung des Schlupfes nicht möglich, aber eine intakte Klebung sichergestellt.

Die zentralen Ergebnisse der Versuchsserie sind in Abbildung 24a dargestellt und interpretiert. Das obere Diagramm zeigt den Mittelwert der Versagenslast $F_{ms,max}$ des Verankerungsmittels TOGE HMS-SB 22x345 M24 mit zugehöriger erwartungstreuer Standardabweichung über die Verbundlängen-

ge l der jeweiligen Schraube aufgetragen. Dabei wird jeweils zwischen geklebten Betonschrauben (grün) und nicht geklebten Betonschrauben (blau) unterschieden. Im Falle von nicht geklebten Betonschrauben ist ersichtlich, dass eine Zunahme der Gewindelänge über 100 mm zu keiner Steigerung der Höchstlast führt. Betonschrauben mit z.B. 120 mm Gewindelängen gleicher Geometrie könnten dementsprechend nur unwesentlich höhere Lasten übertragen. Bei Klebung der Betonschrauben kann das Tragvermögen wesentlich gesteigert werden. Es sind Steigerungen um ca. Faktor 2 bis 4 je nach Gewindelänge l möglich. Ab einer Betongewindelänge bzw. Verbundlänge l von 80 mm tritt bei den vorliegenden Betonprüfkörpern der Betoncharge B5 bereits Stahlversagen ein (siehe rote Kreismarkierung in Abbildung 24a). Die restlichen drei Werte können gut durch eine durch den Nullpunkt laufende Regressionsgerade angenähert werden. Bei Erhöhung der Stahlfestigkeit der Betonschrauben wäre zufolge dieser Extrapolation eine maximale Schraubenkraft von 254 kN bei einer Betongewindelänge von 80 mm (Steigerung um 18%) bzw. 318 kN bei einer Betongewindelänge von 100 mm (Steigerung um 45%) möglich.

In Abbildung 24b werden die Schraubenkräfte in Verbundspannungen umgerechnet. Bei ungeklebten Betonschrauben (blau) wird der Maximalwert der Verbundspannung bei einer Gewindelänge von 60 mm mit 16,3 MPa erreicht. Dieser Wert kann bei den Verbundankerschrauben weit übertroffen werden. Wiederum bei einer Gewindelänge von 60 mm wird der Höchstwert von 47,9 MPa erreicht. Die errechneten Verbundspannungen für Gewindelängen von 80 mm und 100 mm werden wiederum durch das aufgetretene Stahlversagen begrenzt. Dieser Umstand zeigt auf, wie wichtig Messungen über eine abgestufte Betongewindelänge sind. Erst dadurch wird das wahre Verbundvermögen von Verbundankerschrauben ersichtlich.

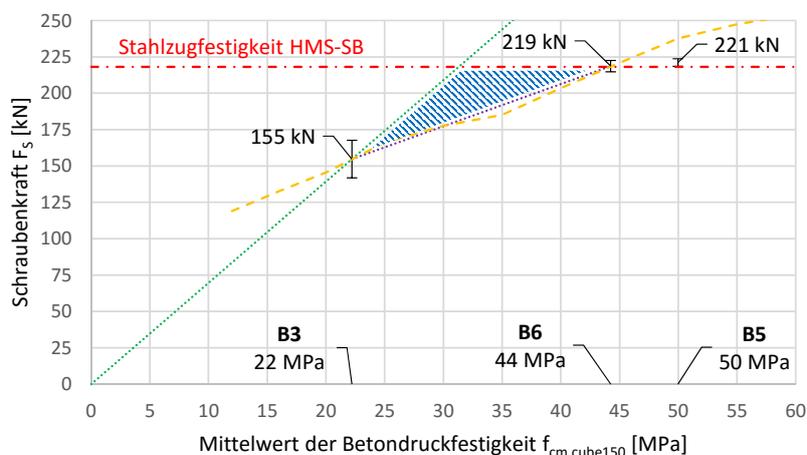


Abbildung 25: Höchstlast der Schraubenkraft $F_{S,max}$ aufgetragen über die Betonfestigkeit der Probekörper aus den Betonchargen B3, B5 und B6

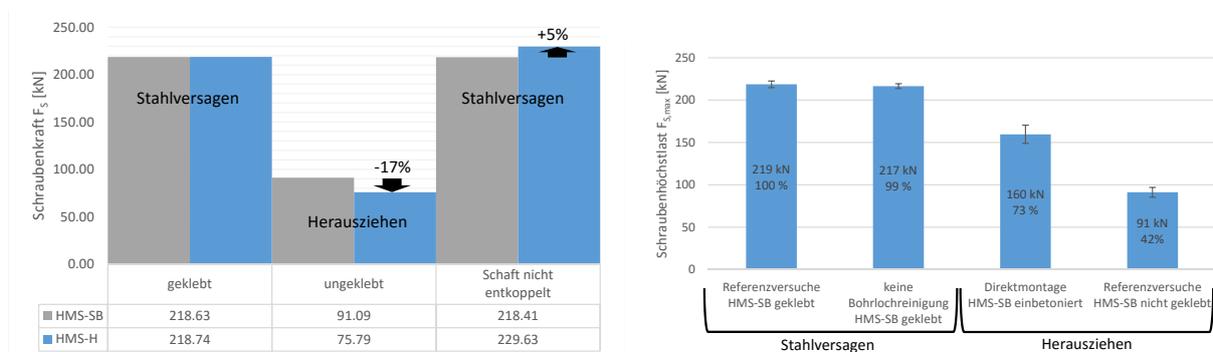
Neben der Betongewindelänge l ist die Höchstlast der Schraubenkraft $F_{S,max}$ in Abhängigkeit von der Betonfestigkeit von großem Interesse. In Versuchsserie VS08 werden dafür Versuche in Probekörpern der Betonchargen B3, B5 und B6 durchgeführt. Bei Klebung der Betonschrauben und der vollen Betongewindelänge von 100 mm kommt es in den Probekörpern der Betonchargen B6 mit einer Würfeldruckfestigkeit von $f_{cm,cube150,B6} = 44$ MPa und B5 mit einer Würfeldruckfestigkeit von $f_{cm,cube150,B5} = 50$ MPa zum Überschreiten der Stahlzugfestigkeit der geprüften Betonschraube HMS-SB. Bei der sehr niedrigen Betonfestigkeit der Charge B3 mit $f_{cm,cube150,B3} = 22$ MPa tritt der gewünschte Versagensmechanismus Herausziehen bei $F_{S,max,B3} = 155$ kN ein. Aus den drei Ver-

suchsgruppen können bereits Minimalwerte der Höchstlast der Schraubenkraft $F_{S,max}$ abgeleitet werden. Dieser Wert muss für Betone mit einer Würfeldruckfestigkeit größer Charge B3 und kleiner Charge B6 im blau strichlierten Bereich von Abbildung 25 liegen, jedoch zumindest auf der violett punktierten Linie unter Berücksichtigung der Streubreite liegen. Die strichlierte gelbe Kurve ist eine Gewichtung des Wertes $F_{S,max,B3} = 155 \text{ kN}$ der Charge B3 mittels

$$F_{S,max}(f_{c,cube150}) = \frac{F_{S,max,B3}}{f_{ctm,B3}} f_{ctm} \quad (3)$$

wobei die Betonzugfestigkeit gemäß Eurocode 2 berechnet wird zu

$$f_{ctm} = 0.3f_{ck}^{\frac{2}{3}} \quad (4)$$



(a) Vergleich der Betonschrauben HSM-SB und HSM-H

(b) Einfluss der Bohrlochreinigung und einer Direktmontage auf eine Betonschraube TOGE HSM-SB

Abbildung 26: Erreichte Maximallasten in den Einzelversuchen „enge Stützung“ – Pull-Out-Tests

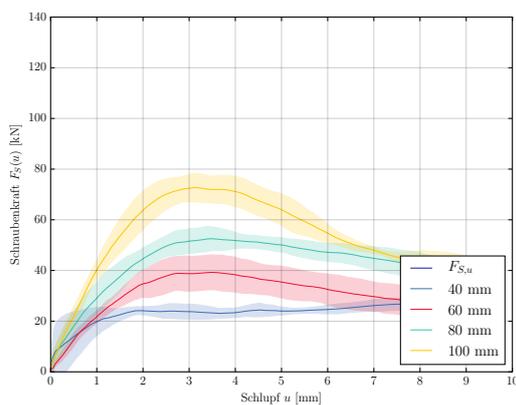
In den weiterführenden Bauteilversuchen kommen Betonschrauben vom Typ TOGE HSM-H zum Einsatz. Diese sind mit dem Typ TOGE HSM-SB eng verwandt. Diese unterscheiden sich geringfügig im Hinterschnitt. Die ermittelten Unterschiede sind in Abbildung 26a dargestellt. Die Betonschraube HSM-H erreicht aufgrund höherer Stahlfestigkeit bei geringerer Querschnittsfläche in etwa die gleiche Stahlzugfestigkeit verglichen mit der Betonschraube TOGE HSM-SB. Dementsprechend ist im Falle einer Klebung kein Unterschied in der Schraubenhöchstlast gegeben. Ohne Klebung tritt aber der Versagensmodus „Herausziehen“ ein. Folglich kann die Betonschraube TOGE HSM-H um 17% geringere Lasten übertragen. Sind die beiden Schrauben jeweils ohne Schaftentkopplung eingeklebt, kann die Schraube TOGE HSM-H um 5% höhere Lasten übertragen. Das ist auf den Schaft – ein M20 ISO-Gewinde – zurückzuführen, der gute Verbundeigenschaften aufweist.

Weitere Versuchsgruppen mit Betonschrauben vom Typ TOGE HSM-SB untersuchen den Einfluss einer nicht ausgeführten Bohrlochreinigung von Verbundankerschrauben (siehe Abbildung 26b). Da in beiden Versuchen die Versagensart „Stahlversagen“ aufgetreten ist, lässt sich leider kein Rückschluss auf den Versagensmodus Herausziehen ziehen. Auf den ersten Blick überraschend ist das Ergebnis, dass eine Direktmontage der Betonschraube zu wesentlich geringeren Höchstlasten im Vergleich zur geklebten Betonschraube und in Folge zur Versagensart „Herausziehen“ führt. Dies lässt sich erklären, wenn der tatsächliche Aufbau des Ankergrundes bestehend aus Zuschlag und

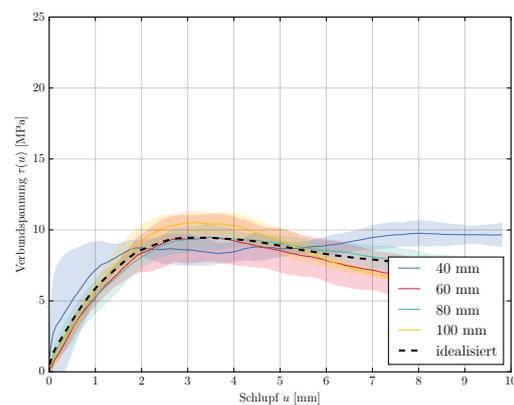
Matrix betrachtet wird. Einbetoniert hält die Betonschraube jedoch mehr als vergleichsweise ohne Klebung.

Verbund-Schlupf-Versuche Für 60 Versuche werden idealisierte Verbund-Schlupf-Beziehungen für geklebte und nicht geklebte Betonschrauben vom Typ TOGE HMS-SB 22x345 M24 für zwei Betonfestigkeiten bei Variation der Betongewindelänge zu 40 mm, 60 mm, 80 mm und 100 mm abgeleitet.

Da vor allem bei den Gewindelängen 80 mm und 100 mm und zusätzlicher Klebung eine große Gefahr auf Stahlversagen besteht, ist deren Abstufung für die Ermittlung einer Verbund-Schlupf-Beziehung unerlässlich. Zudem kann über die Zusatzinformation, dass die idealisierte Verbund-Schlupf-Beziehung von der Betongewindelänge / unabhängig sein muss, der Verlauf besser abgeschätzt werden. Die Annahme eines konstanten Verbundspannungsverlaufs ist besonders im Falle von geringen Betongewindelängen zulässig. Hingegen steigt mit geringer Gewindelänge die Streuung der Ergebnisse aufgrund makroskopischer Effekte.



(a) Schraubenkraft $F_S(u)$ über Schlupf u



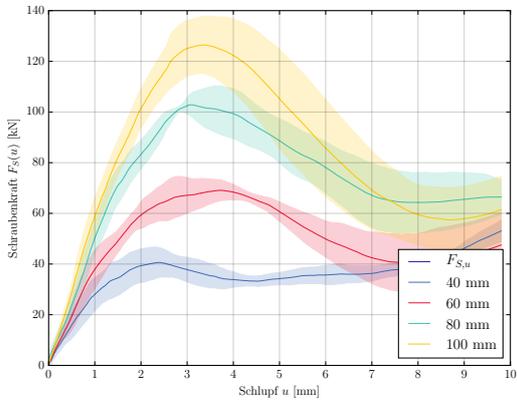
(b) Verbundspannung $\tau_{SB}(u)$ über Schlupf u

Abbildung 27: Betoncharge B3 –Ableitung einer idealisierten Verbund-Schlupf Beziehung für nicht geklebte Betonschrauben vom Typ TOGE HMS-SB 22x345 M24

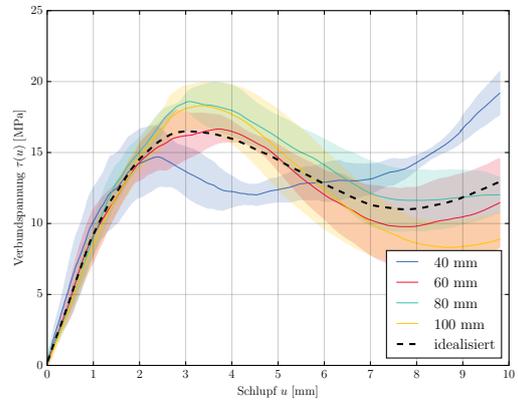
Abbildung 27 zeigt im linken Diagramm die Mittelwerts-Ergebnisse der Schraubenkraft mit Standardabweichung für die Verbund- bzw. Betongewindelängen von 40 mm, 60 mm, 80 mm und 100 mm über dem Schlupf u aufgetragen. Aus diesen wird über die Nennoberfläche O_S ⁷ des Verbundstücks unter Annahme einer über die Verbundlänge konstanten Verbundspannung auf die Verbundspannung τ umgerechnet. Unter Modellbedingungen sollten alle ermittelten Verbundspannungsverläufe deckungsgleich sein. Aufgrund der Abweichungen der Realität vom Modell ist das im Allgemeinen nicht der Fall. Es kann aber die idealisierte schwarz strichlierte Verbund-Schlupf-Beziehung im rechten Diagramm abgeleitet werden.

Gleiches kann für nicht geklebte Schrauben des gleichen Typs für Betoncharge B6 gemacht werden. Die Ergebnisse mit der idealisierten Verbund-Schlupf-Beziehung sind in Abbildung 28 dargestellt.

⁷Nenndurchmesser mal Verbundlänge

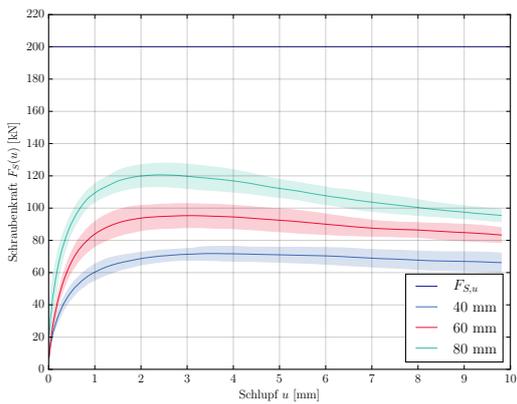


(a) Schraubenkraft $F_S(u)$ über Schlupf u

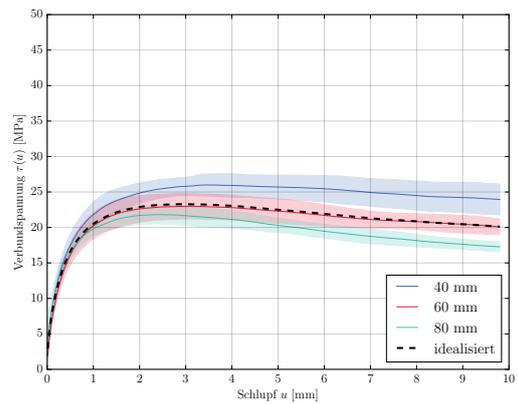


(b) Verbundspannung $\tau_{SB}(u)$ über Schlupf u

Abbildung 28: Betoncharge B6 – Ableitung einer idealisierten Verbund-Schlupf Beziehung für nicht geklebte Betonschrauben vom Typ TOGE HMS-SB 22x345 M24



(a) Schraubenkraft $F_S(u)$ über Schlupf u

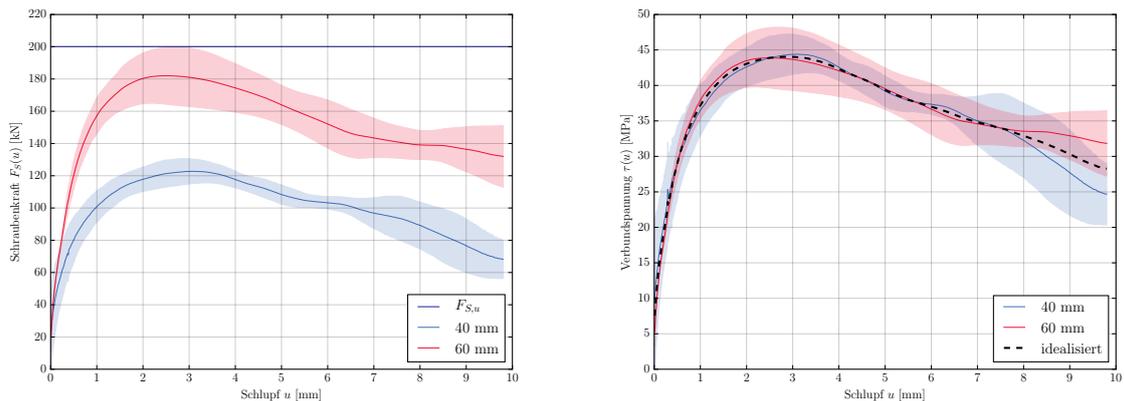


(b) Verbundspannung $\tau_{SB}(u)$ über Schlupf u

Abbildung 29: Betoncharge B3 – Ableitung einer idealisierten Verbund-Schlupf Beziehung für nicht geklebte Betonschrauben vom Typ TOGE HMS-SB 22x345 M24

Kommt zusätzlich eine Klebung zum Einsatz, sind die Ergebnisse auf Plausibilität zu prüfen, da aufgrund der Durchbohrung der Probekörper zur Schlupfmessung die einwandfreie Herstellung der Probekörper schwierig ist. Unter Zuhilfenahme von Versuchsserie VS08 können aber mögliche Ausreißer erkannt werden.

In Abbildung 29 werden die Ergebnisse für die Betongewindelänge von 100 mm nicht vollständig eingetragen. Bei diesen ist leider ein offensichtlicher Mangel in der Klebung vorhanden. Aus den drei noch vorhandenen Versuchsgruppen lässt sich aber eine Verbund-Schlupf-Beziehung ableiten.



(a) Betoncharge B6 – Schraubkraft $F_S(u)$ über Schlupf u (b) Verbundspannung $\tau_{SB}(u)$ über Schlupf u

Abbildung 30: Betoncharge B6 – Ableitung einer idealisierten Verbund-Schlupf-Beziehung für geklebte Betonschrauben vom Typ TOGE HMS-SB 22x345 M240

Ein anderes Problem offenbart sich bei Probekörpern aus Betoncharge B6 (siehe Abbildung 30). Bei der Verbundlänge von 80 mm und 100 mm sollte gemäß der Referenzversuche (siehe Abbildung 25) jeweils Stahlversagen eintreten, was bei einzelnen Versuchen der Fall ist. Bei den restlichen wird eine fehlerhafte Klebung angenommen. Somit werden für die Ermittlung der Verbundspannung nur die Betongewindelängen 40 mm und 60 mm herangezogen. Damit können aber erstmals die tatsächlichen außerordentlich hohen Verbundfestigkeiten der Verbundankerschraube experimentell ermittelt werden.

Verbundverlauf über die Verbundlänge In der Versuchsreihe „Verbundverlauf über die Verbundlänge“ wird die Gültigkeit der Annahmen einer über die Verbundlänge konstanten Verbund-

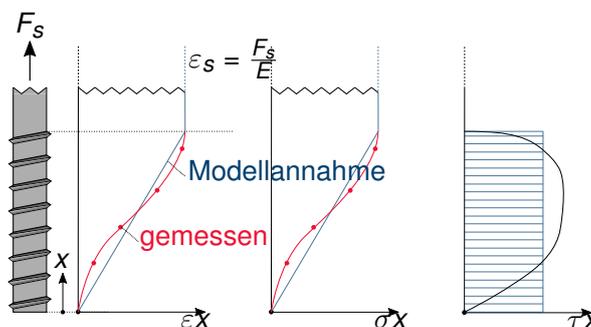


Abbildung 31: Verbundspannungsverlauf über Einbindelänge

spannung (siehe Abbildung 31) überprüft. Dabei stellt sich heraus, dass für geklebte Betonschrauben vom Typ TOGE HMS-SB 22x345 M240 diese Annahme einer über die Verbundlänge konstanten Verbundspannung zulässig ist. Bei nicht geklebten Betonschrauben vom Typ TOGE HMS-SB 22x345 M240 sind bessere Modelle möglich. Diese werden in (Waltl, N. Fleischhacker und Feix, 2016) fortführend entwickelt.

Ergebniszusammenfassung Durch eine Abstufung der Betongewinde- bzw. Verbundlänge der eingesetzten Beton- und Verbundankerschrauben ist erstmals der bemerkenswerte Höchstwert der Verbundspannung von Betonschrauben mit bis zu 47,9 MPa bei Klebung nachweisbar (siehe Abbildung 24b). Die Laststeigerung durch eine Klebung kann generell mit einem Faktor 2 bis 4 (siehe Abbildung 24a) angegeben werden.

Der Einfluss der Betonfestigkeit des Ankergrundes auf die zu erreichende Höchstlast bei der Versagensform Herausziehen (siehe Abbildung 25) kann mit den durchgeführten Versuchen eingeschränkt werden. Eine Skalierung über die Betonzugfestigkeit nach Eurocode 2 liefert plausible Werte. Diese Annahme müsste mit weiteren Versuchen nachgeprüft werden.

Entgegen der ursprünglichen Annahme gibt es messbare Unterschiede in der erreichten Höchstlast der Betonschrauben TOGE HSM-H und HSM-BS. Bei geringen Betonfestigkeiten, geringeren Verbund- bzw. Betongewindelängen oder dem Verzicht auf Klebung kann sich dieser Umstand negativ auswirken, weil nicht die Stahlfestigkeit des Schraubankers maßgebend ist (siehe Abbildung 26a).

Durch die Abstufung der Betongewindelänge können erstmals die tatsächlich auftretenden hohen Verbundspannungen auch in den abgeleiteten ideellen Verbund-Schlupf-Beziehungen sichtbar gemacht werden (siehe Abbildung 30).

Die Entwicklung einer Messschraube, welche den Dehnungsverlauf über die Verbund- bzw. die Betongewindelänge misst, ist vollkommen neuartig. Die durchgeführten Untersuchungen bestätigen für geklebte Betonschrauben die Annahme einer über die Verbundlänge konstanten Verbundspannung als ausreichend genau. Für nicht geklebte Betonschrauben kann ein komplexerer Verbundspannungsverlauf abgeleitet werden (siehe (Waltl, N. Fleischhacker und Feix, 2016)).

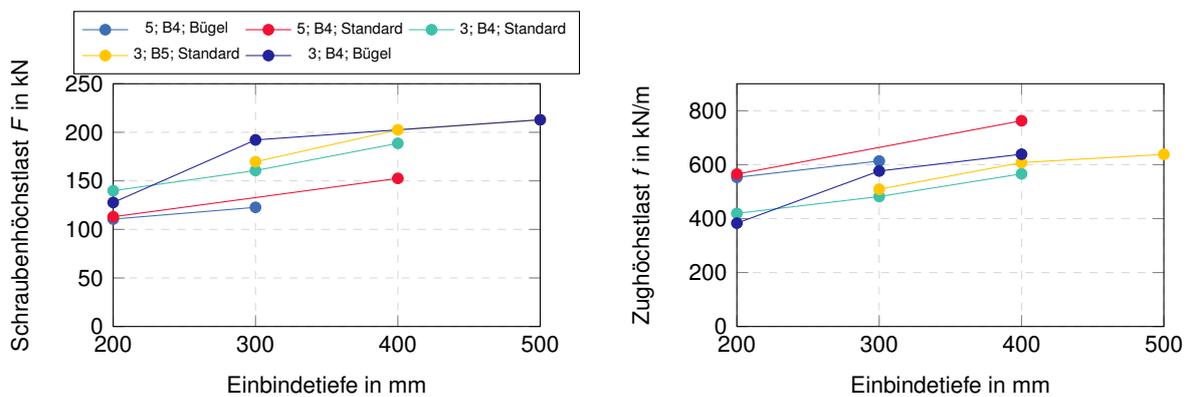
Um die Höchstlast der vorhandenen Betonschrauben weiter zu steigern, bietet sich primär eine Erhöhung der Stahlzugfestigkeit an. Auch eine Erhöhung des Schaftquerschnitts bei der Betonschraube HSM-H wäre möglich.

2.1.1.3 Einzelversuche „weite Stützung“ ohne Randeinfluss In der Versuchsanordnung Einzelversuche „weite Stützung“ ohne Randeinfluss werden einzelne Verankerungsmittel zentrisch in einer Betonplatte eingebracht. Die Ränder der Platte sind somit weitestmöglich vom Verankerungsmittel entfernt. Die aufgebrachte Zugbelastung wird über ein weit gestütztes Dreibein mit dem Ankergrund kurzgeschlossen. Somit ist der Bereich um das Verankerungsmittel herum möglichst ungestört. Dieser Aufbau ermöglicht die Versagensarten „Spalten“ und „Betonausbruch“. Die vorliegenden Versuche werden für die Kalibrierung und Validierung des numerischen Modells durchgeführt. In den Versuchen soll die Versagensart „Betonausbruch“ auftreten.

Über Vorversuche werden die Parameter um die Versagensart „Betonausbruch“ für die Betonschraube TOGE HSM-H 22x320 M20 zu erreichen, ermittelt. Dies gelingt in drei Versuchen. Diese drei Versuche stehen für die Validierung des numerischen Modells zur Verfügung. Im Rückblick auf die Ergebnisse, sollten weitere Versuche mit größeren Einbindetiefen durchgeführt werden. Um dabei ein Spalten des Betons zu verhindern, wäre bei Verwendung der geklebten Betonschraube TSM B 22x320 M20 zum einen die Umgestaltung des Dreibeins zu einem Kegel mit gleichmäßigerer Abstützung notwendig und zum anderen müssten Prüfplatten mit größerer Bauteilstärke hergestellt werden.

2.1.2 Bauteilversuche

2.1.2.1 Vier-Punkt-Biegezug-Bauteilversuche am Teilsystem mit Anschlussbewehrung In den folgenden Versuchen wird die Lasteinleitung des aus den Balkonlasten resultierenden Biegemomentes, das selbst in ein Kräftepaar in Form einer Zugkraft und einer Druckkraft aufgeteilt werden kann, untersucht. Querkraft wird über das gewählte mechanische System ausgeschlossen



(a) Schraubenhöchstlast in Abhängigkeit der Einbindetiefe

(b) Zughöchstlast pro Meter in Abhängigkeit der Einbindetiefe

Abbildung 32: Versuchsserie VS08 – Höchstwert der Schraubenhöchstlast $F_{ms,max}$ bzw. der Verbundspannung τ_{SB} über der Verbundlänge l aufgetragen – Prüfkörper aus Betoncharge B5

Die Mittelwerte mit zugehöriger Standardabweichung der Schraubenhöchstlasten über die Einbindetiefe sind in Abbildung 32a dargestellt. Aus dem Ergebnisdiagramm lassen sich im wesentlichen vier Dinge ableiten:

1. Bei 200 mm Einbindetiefe bringt eine vorhandene Bügelbewehrung keinerlei Vorteile. Eine Bügelbewehrung im Randbereich ist für eine Einbindetiefe von 300 mm nützlich. Es können ähnliche Kräfte wie bei 400 mm Einbindetiefe ohne Bügelbewehrung übertragen werden.
2. Bei drei Betonschrauben pro Meter kann jede Schraube mehr Kraft aufnehmen und es resultiert ein höherer Ausnutzungsgrad als bei fünf Schrauben pro Meter.
3. Der Einfluss der unterschiedlichen Betonfestigkeiten von den Chargen B4 und B5 ist gering.
4. Durch eine Erhöhung der Einbindetiefe auf über 400 mm, kann die Last nur geringfügig gesteigert werden.

Abbildung 32b ergibt sich aus der Umrechnung der Schraubenhöchstlasten und der Schraubenan-

zahl pro Meter in die übertragbare Zugkraft pro Meter. Aus dem Diagramm lässt sich ableiten, dass bei Verwendung von fünf Schrauben pro Meter ca. 30 % bis 40 % mehr Zugkraft gegenüber drei Schrauben pro Meter übertragen werden kann.

Basierend auf der während des Versuchsverlaufs festgelegten Referenzkonfiguration –

- geklebte Verbundankerschraube HSM-H mit Entkopplung des M20 ISO-Gewinde-Schaftes,
- Randabstand von 60 mm und
- Einbindetiefe von 400 mm –

werden Parametervariationen durchgeführt. So wird dieser Parametersatz auf einen Probekörper ohne Anschlussbewehrung angewendet. So können noch 35 % der Höchstlasten des Referenzversuchs erreicht werden.

Bei Einbau einer Druckschraube wird die Versagenslast auf 52 % gemindert. Dieser Umstand wird auf die eingesetzte Druckschraube zurückgeführt.

Wird als Drucklager ein Dämmdruckelement aus Compacfoam CF400 eingebaut, nimmt aufgrund des geringen E-Moduls von 0,277 GPa die Verformung bei gleicher Laststufe im Vergleich zum Referenzversuch enorm zu. Es kommt zum Bruch des Dämmdruckelements bei 27 % der Höchstlast des Referenzversuchs.

Der Verzicht auf eine Querbewehrung führt zu einer Minderung auf 88 % der Höchstlast gegenüber dem Referenzwert. Wird zusätzlich zur fehlenden Querbewehrung der Schraubenschaft nicht entkoppelt, mindert das die Versagenslast um weitere 5 % auf 83 %.

Der Einsatz einer Mattenbewehrung mit $\varnothing 10/15$ vom Typ ÖMAT CQS100 führt zu einem Stahlversagen ebendieser und einer Reduktion der Höchstlast auf 82 % des Referenzwertes.

Wird hingegen die Betonschraube nicht entkoppelt, steigt bei der großen Einbindetiefe von 400 mm die Traglast auf 108 % gegenüber dem Referenzversuch.

Wird für Referenzzwecke eine M20 Gewindestange ohne Entkopplung eingeklebt, stimmt die erreichte Höchstlast mit 102 % im Bereich der Schwankungsbreite mit dem Referenzversuch überein. Wird die M20 ISO-Gewindestange jedoch auf eine dem verwendeten Verbundstück HSM-H gleiche Länge von 100 mm beschränkt, können nur mehr 55 % der Referenzlast übertragen werden. Das zeigt sehr schön die hohen Verbundspannungen, die die verwendeten Betonschrauben bei Klebung übertragen können.

Ergebniszusammenfassung Im Bereich der Zugübertragung kann bei drei Schrauben pro Meter ab einer Einbindetiefe von 300 mm mit Bügelbewehrung bzw. 400 mm ohne Bügelbewehrung die maximale charakteristische Zugkraft des Schraubenschaftes M20 der Festigkeitsklasse 8.8 von 196 kN bei vollständiger Ausnutzung der Stahlzugfestigkeit ⁸ übertragen werden. Eine über diesen Wert hinausgehende Schraubentragfähigkeit ist folglich nur begrenzt für eine Bemessung nutzbar.

⁸Berechnet aus $800 \text{ MPa} \cdot 245 \text{ mm}^2 = 196 \text{ kN}$. Zusage EN 1993-1-8 ist der charakteristische Wert $0,9 \cdot 800 \text{ MPa} \cdot 245 \text{ mm}^2 = 176 \text{ kN}$

Kommen fünf Schrauben pro Meter zur Zugübertragung zum Einsatz, steigen zwar die pro Meter übertragbaren Lasten um ca. 40 % an, die pro Schraube übertragbaren Lasten in absoluter Größe sinken jedoch. Die maßgebende Versagensform ist aber trotzdem weiterhin „Herausziehen“. Es lässt sich somit ableiten, dass durch die enger gesetzte Schraubengruppe und die damit einhergehende geometrische Begrenzung durch die engerliegenden Betonschrauben die Höchstlast zufolge „Herausziehen“ sinkt.

Aus den Versuchsergebnissen kann für die Folgeuntersuchungen eine Standardkonfiguration mit drei Betonschrauben pro Meter mit einer Einbindetiefe von 400 mm bei entkoppeltem M20 ISO-Gewinde-Schaft und ohne Randverbügelung festgelegt werden. Diese Konfiguration weist eine ausreichende Tragfähigkeit auf und der notwendige Montageaufwand ist geringer.

2.1.2.2 Drei-Punkt-Biegezug-Bauteilversuche am Teilsystem mit und ohne Anschlussbewehrung Aufbauend auf den Vier-Punkt-Biegezug-Bauteilversuchen wird im Rahmen der vorliegenden Drei-Punkt-Biegezug-Bauteilversuche das Lasteinleitungssystem mit Zug-, Druck- und Schubkomponente untersucht.

Es werden sowohl Versuche an unbewehrten Probekörpern, als auch an bewehrten Probekörpern mit und ohne Randverbügelung durchgeführt.



(a) BV46 mit Einbindetiefe $h = 200$ mm



(b) BV37 mit Einbindetiefe $h = 300$ mm



(c) BV47 mit Einbindetiefe $h = 400$ mm



(d) BV38 mit Einbindetiefe $h = 500$ mm

Abbildung 33: Fotodokumentation Versagen der Probekörper ohne Anschlussbewehrung mit Schubschraube aus Versuchsserie VS07

Bei den nicht bewehrten Probekörpern tritt sowohl bei der Variante mit Schubschrauben (siehe Abbildung 33) als auch mit Schubknagge (siehe Abbildung 34) jeweils Betonversagen am Bauteil ein. Das beim Versagen maximale mittlere Moment m_m mit zugehöriger mittlerer Querkraft q_m am Ein-Meter-Streifen wird in Abhängigkeit von der Einbindetiefe h in Abbildung 35a dargestellt. Wird



(a) BV43 mit Einbindetiefe $h = 200$ mm



(b) BV40 mit Einbindetiefe $h = 300$ mm

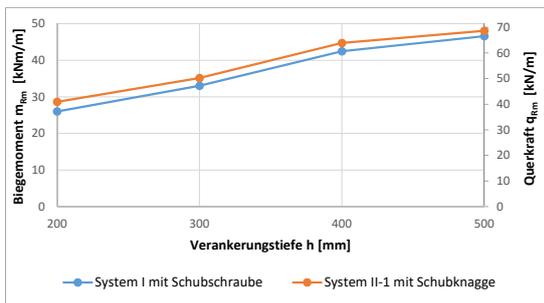


(c) BV44 mit Einbindetiefe $h = 400$ mm

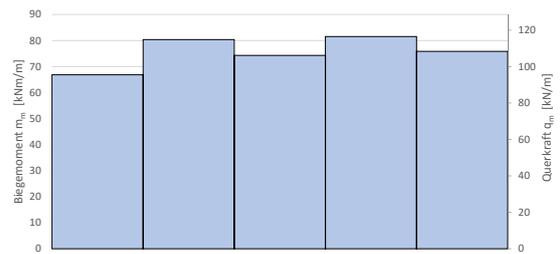


(d) BV41 mit Einbindetiefe $h = 500$ mm

Abbildung 34: Fotodokumentation Versagen der Probekörper ohne Anschlussbewehrung mit Schubknagge aus Versuchsserie VS07



(a) Probekörper ohne Anschlussbewehrung – Bauteilversuch BV46, BV37, BV47, BV38 mit Schusschraube aus System I und Bauteilversuch BV43, BV40, BV44, BV41 mit Schubknagge aus System I-1



	System I		System II-1	System II-2	
ID	BV36	BV49	BV39	BV48	BV35
Bewehrung	A1	A1-R	A1	A1	A1-R
m_m [kNm/m]	67	80	74	82	76
q_m [kN/m]	96	115	106	117	108

(b) Vergleich der Systemvarianten mit (A1-R) und ohne (A1) Randverbügelung

Abbildung 35: Ergebnisse

aus dem statisch bestimmten System des Trägers auf zwei Stützen mit mittig angreifender Einzellast das Moment im Querschnitt des Betonschraubenfußes bestimmt, so stellt sich dort ein Rissmoment von $m_{cr} = 23,3 \text{ kNm/m}$ ein. Im Versuch tritt bei den drei Bauteilversuchen mit Schubschrauben das Versagen bei $18,6 \text{ kNm/m}$, $18,9 \text{ kNm/m}$ und $18,2 \text{ kNm/m}$ ein. Der Mittelwert ergibt sich somit zu $18,6 \text{ kNm/m}$ und einer sehr geringen Standardabweichung von $0,3 \text{ kNm/m}$. Damit liegt dieser Mittelwert gut 20 % unter dem berechneten m_{cr} . Nur beim Bauteilversuch mit einer Einbindetiefe von $h = 500 \text{ mm}$ ergibt sich lediglich ein Moment von $h = 13,3 \text{ kNm/m}$. Dieser Umstand lässt in diesem Fall auf einen anderen eingetretenen Versagensmodus schließen. Das in Abbildung 33d abgebildete Versagen deutet auf einen Schubriss hin.

Im Falle der Schubknagge ergibt sich ein analoges Bild. Die Versuche mit 200 mm bis 400 mm Einbindetiefe weisen ein mittleres Versagemoment am Fuß der Betonschrauben von 20 kNm/m mit einer Streuung von $0,7 \text{ kNm/m}$ auf. Dieses Ergebnis stimmt somit im Bereich der Streufaktoren mit dem obigen überein. Besonders interessant ist das bei einer Einbindetiefe von $h = 500 \text{ mm}$ auftretende Versagen (siehe Abbildung 34d). Das Versagensbild verstärkt die Annahme eines kombinierten Versagensmodus.

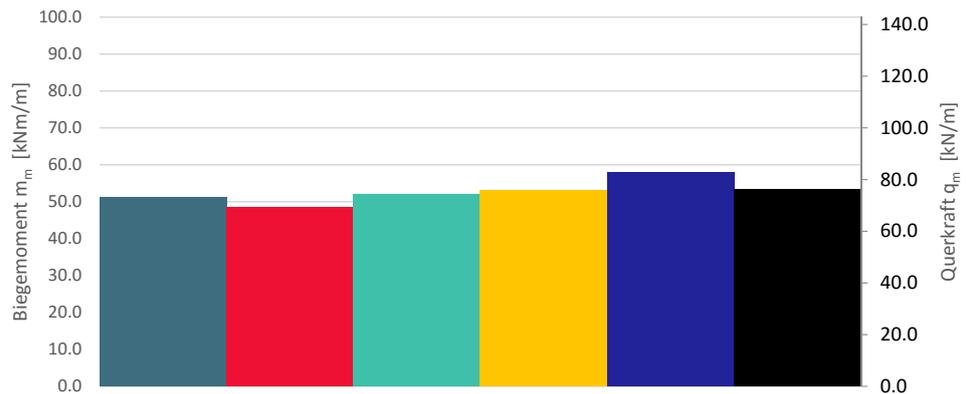
Im Falle einer vorhandenen Anschlussbewehrung wird das Versagen nicht mehr durch die idealisierte Bestandsdecke limitiert. Viel mehr versagen die installierten Varianten der Lasteinleitung. Die in den Versuchen erreichten Höchstlasten umgerechnet in ein längenbezogenes Moment m_m mit zugehöriger Querkraft q_m sind in Abbildung 35b gegenübergestellt.

Ergebniszusammenfassung Aus den Versuchen mit unbewehrten Proben lässt sich ableiten, dass auch bei keiner vorhandenen Biegebewehrung unter Ausnutzung der Beton-Zugtragfähigkeit leichte Balkone bei adäquater Sicherheit angeschlossen werden könnten. Bei vorhandener Anschlussbewehrung steigen die übertragbaren Lasten im Versuch.

2.1.2.3 Drei-Punkt-Biegezug-Bauteilversuche am Gesamtsystem mit Anschlussbewehrung Als weiteren Entwicklungsschritt zum nachträglichen thermisch entkoppelten Balkonananschluss wird das Gesamtsystem anhand von Drei-Punkt-Biegezug-Bauteilversuchen mit Anschlussbewehrung getestet. So wird neben der bereits ausgiebig getesteten Lasteinleitung mit Zug, Schub und Druckübertragung erstmals auch das Lastüberleitungs- und das Lastausleitungssystem untersucht. Für einen Vergleich des entwickelten Systems I werden Referenzversuche mit am Markt erhältlichen Produkten der Firmen AVI, Halfen und Schöck durchgeführt.

Die Versuchsergebnisse werden jeweils für das „System I“ und die Marktlösungen getrennt dargestellt.

Abbildung 36 stellt die Ergebnisse der Varianten a und b von „System I“ gemäß Abbildung 5 gegenüber. Darin ist ersichtlich, dass die Varianten mit Druckschraube tendenziell eine geringere Höchstlast mit $58,0 \text{ kNm/m}$ und $53,3 \text{ kNm/m}$ gegenüber der Variante b mit eingebauter Druckplatte aufweisen. Im Vergleich von Bauteilversuchen mit Bügelbewehrung und ohne Bügelbewehrung ist die Variante mit Bügelbewehrung leicht im Vorteil. Eine tiefere Verankerung der Druckschraube wirkt sich günstig auf die Traglast aus. Das Höchstlastniveau ist bei allen Versuchen durchgängig mit einem Mittelwert des maximal erreichten Moments von $52,7 \text{ kNm/m}$ und einer zugehörigen Querkraft



ID	BV100	BV101	BV102	BV103	BV104	BV105		
m_m	51.3	48.5	52.1	53.2	58.0	53.3	[kNm/m]	
q_m	73.3	69.3	74.4	76.0	82.8	76.2	[kN/m]	
Stärke Dämmkörper	80						[mm]	
Betoncharge B	Decke B5 und Balkon B7							
Bewehrung	A1-R	A1				A1-R		
Zug	Verankerungsmittel	TSM B 22x630 M20						
	Bohrlöcher & Zugglieder	3					[Stk.]	
	Verankerungstiefe T	400						
	Bohrlochdurchmesser D	22					[mm]	
	Betondeckung c	49						
Schub	Verankerungsmittel	TSM B 16						
	Bohrlöcher & Zugglieder	2					[Stk.]	
	Verankerungstiefe T	125					[mm]	
	Bohrlochdurchmesser D	16						
Druck	Bohrlöcher & Druckglieder	3				Stahdruckplatte System I	[Stk.]	
	Verankerungsmittel	TSM B 22x630 M20						
	Verankerungstiefe T	200	300	400			[mm]	
	Betondeckung c	60						

Abbildung 36: Versuchsergebnisse System I in Variante a und b

von 75,3 kN/m gegeben.

Die Testergebnisse der untersuchten Marktlösungen werden in Abbildung 37 gegenübergestellt. Von besonderem Interesse für den Vergleich mit „System I“ sind die Schöck Produkte in der Ausführung RK. Der Schöck Isokorb RK25 erreicht in Bauteilversuch BV109 ein Versagemoment von 53,5 kNm/m mit einer zugehörigen Querkraft von 76,4 kN/m, was dem erreichten Höchstlastniveau von „System I“ entspricht. Im Vergleich sind für „System I“ in Variante a 8 und für „System I“ in Variante b 5 Bohrlöcher zu setzen. Zusätzlich entfällt der Mörtelverguss. Der Schöck Isokorb RK45 mit 14 Bohrungen und 15 HTE-Modulen zur Druckübertragung erreicht ein Höchstlastmoment von 102,7 kNm/m mit einer zugehörigen Querkraft von 146,8 kN/m.

Die mittlere Höchstlast des Schöck Isokorb KXT 50 mit einem mittleren Moment von 83,9 kNm/m und einer zugehörigen mittleren Querkraft von 119,8 kN/m streut nur gering mit einer Standardabweichung von 0,63 kNm/m bzw. 0,90 kN/m.

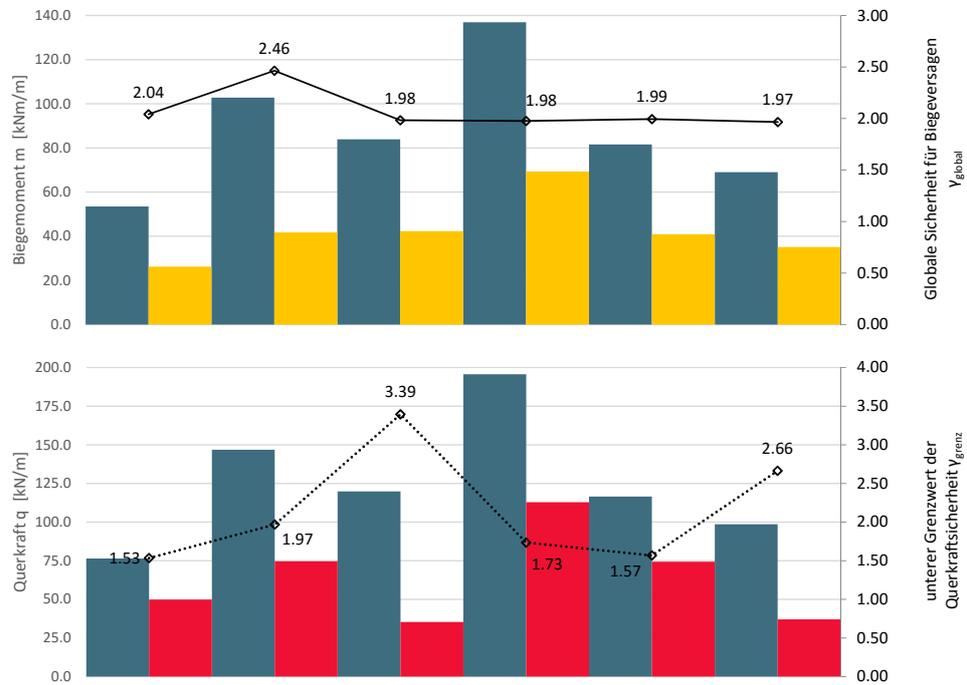
Der Halfen HIT Korb erreicht das gleiche Lastniveau wie der Schöck Isokorb KXT50. Der getestete Halfen THERMOKORB mit 4 Rippen erreicht eine geringere Traglast, wobei bei diesem System auch die Bemessungslast laut Hersteller geringer ist.

Bei den untersuchten Marktlösungen kann der erreichte Höchstlastwert von Moment und Querkraft dem jeweiligen Bemessungsmoment bzw. der -querkraft gegenübergestellt werden. Da bei allen Varianten von Schöck – Versagen der HTE-Druckmodule – und beim Halfen Korb – Fließen der Zugstäbe – Biegeversagen aufgetreten ist, stellt das in den Versuchen erreichte Höchstlastmoment $m_{Versuch,max}$ auch den Bemessungswiderstand des Moments m_{Rm} auf Mittelwertbasis dar. Im Falle des AVI Thermokorbes trat ein Versagen des biegesteifen Rahmenecks ein. Wird aus m_{Rm} auf Mittelwertbasis der Versuchsergebnisse und dem Bemessungsmoment m_{Rd} aus den Herstellerangaben ein Koeffizient γ_{global} gebildet, ergibt sich mit Ausnahme des Schöck Isokorbs RK45 ein Wert von 2. Dieses Ergebnis zeigt, dass die vorliegenden Isokorb-Systeme ein globales Sicherheitsniveau gegenüber Biegeversagen von 2 verlangen. Analog kann auch ein Koeffizient für die Querkraft gebildet werden. Dieser stellt lediglich einen Grenzwert dar, der mit Querkraftversagen überschritten wird und bildet somit zumindest eine untere Grenze. Es ist ersichtlich, dass die Quertragfähigkeiten q_{Rd} bei allen Versuchen um zumindest über 50 % überschritten wird. Im Falle einer sehr geringen Bemessungsquerkrafttragfähigkeit des KXT50 wird im Versuch eine um Faktor 3,39 größere Querkraft erreicht und somit liefert dieses Produkt große Reserven. Dieser Erkenntnisgewinn aus den am Markt vorhandenen Produkten sind für die Entwicklung eines Bemessungskonzeptes für das THERm-opti-BALKON System von Wichtigkeit.

2.2 Numerische Untersuchungen

2.2.1 Numerische mechanische Untersuchungen

Abbildung 38 stellt die Ergebnisse der numerischen Simulation der experimentellen Untersuchungen mit weiter Stützung ohne Randeinfluss den gemessenen Versuchsergebnissen in einem Kraft-Weg-Diagramm gegenüber. Mit dem entwickelten numerischen Modell kann sowohl die Verschiebung als



Einsatz		Sanierung		Neubau				
Bezeichnung		RK25	RK45	KXT50	KXT90	HIT-SP MV		THERMOKORB
ID		BV109	BV110	BV111 BV112 BV113	BV114	BV115	BV116	
Versuchsmoment m_m		53.5	102.7	83.9	136.9	81.6	69.0	[kNm/m]
Bemessungsmoment m_{Rd}		26.2	41.7	42.3	69.3	40.9	35.1	
Biegesicherheit Y_{global}		2.04	2.46	1.98	1.98	1.99	1.97	
Versuchsquerkraft q_m		76.4	146.8	119.8	195.6	116.5	98.6	[kN/m]
Bemessungsquerrakt q_{Rd}		49.8	74.6	35.3	112.8	74.3	37.0	
Grenzwert Querkraftsicherheit Y_{grenz}		1.53	1.97	3.39	1.73	1.57	2.66	
Stärke Dämmkörper		80		120			80	[mm]
Betoncharge B		Decke B5 und Balkon B7		B7				
Bewehrung		A1						
Zug	Verankerungsmittel	Ø14		Ø8	Ø12		5 Stk. Druckschub- lager CSB	
	Bohrlöcher & Zugglieder	5	8	16	12	7		[Stk.]
	Verankerungstiefe T	872		-				[mm]
	Bohrlochdurchmesser D	16		-				
	Betondeckung c	47		35				
Schub	Verankerungsmittel	Ø8			Ø8			
	Bohrlöcher & Zugglieder	4	6	5	9		[Stk.]	
	Verankerungstiefe T	456		-			[mm]	
	Bohrlochdurchmesser D	12		10				
Druck	Bohrlöcher & Druckglieder	7	15	10	18		[Stk.]	
	Verankerungsmittel	HTE-Modul						
	Verankerungstiefe T	mit						
Betondeckung c		20			15		[mm]	

4 Rippen aus Edelstahl U-Profilen die jeweils ein biegesteifes Rahmeneck bilden

Abbildung 37: Versuchsergebnisse Marktlösungen

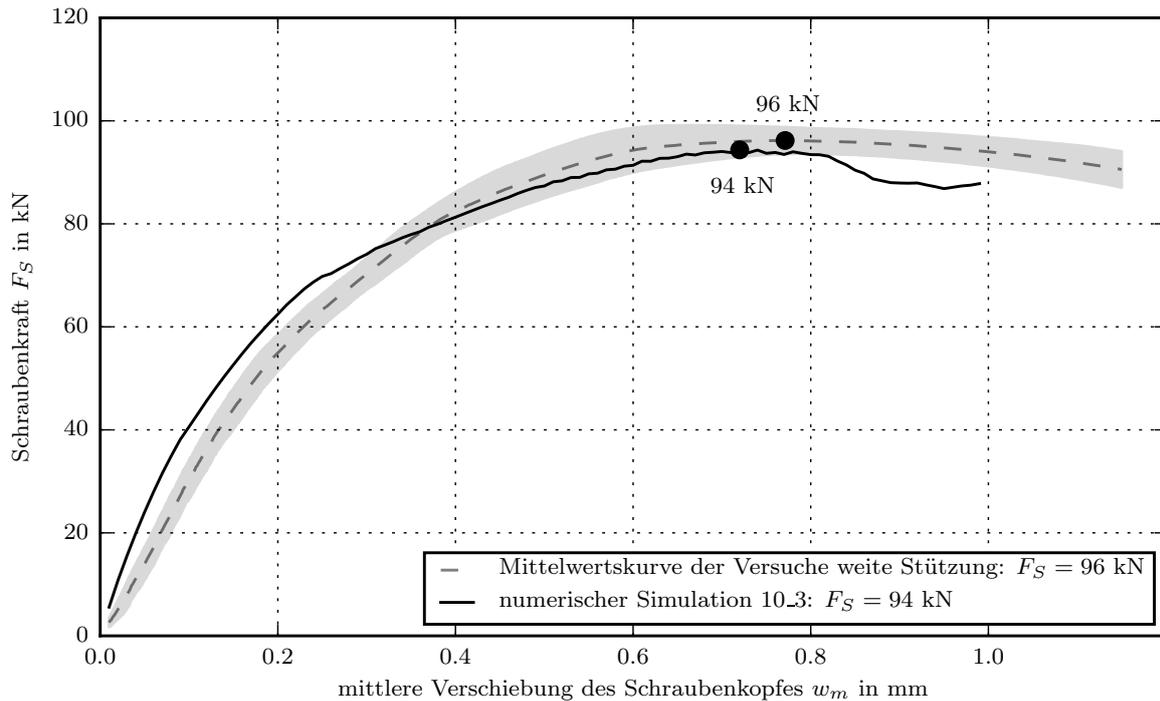


Abbildung 38: Ergebnisvergleich der experimentellen Untersuchungen mit weiter Stützung ohne Randeinfluss mit der numerischen Simulation in einem Kraft-Weg-Diagramm

auch die Höchstlast der Versuche ausreichend genau prognostiziert werden und bildet die Basis für weiterführende numerische Untersuchungen.

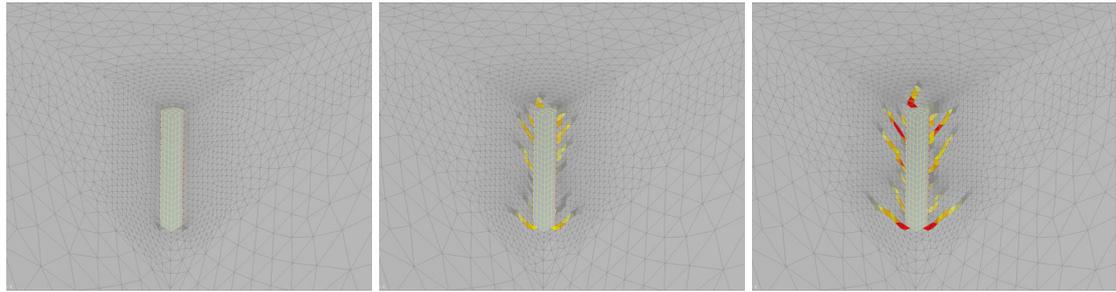
Die für diesen Versuch erhaltenen Verzerrungen bei diskreten Belastungsschritten sind in Abbildung 39 dargestellt. Darin ist die Tendenz zur Bildung eines Ausbruchskegels bei zunehmender Belastung erkennbar.

2.2.2 Numerische thermische Untersuchungen

Abbildung 40 trägt den Wärmebrückenverlustkoeffizient Ψ des Schöck Isokorbes in Ausführung RK25 und RK45 sowie von „System I“ und die Variante Sanierung ohne thermische Enkopplung über der Wanddämmstärke auf. Die thermische Performance von „System I“ liegt dabei zwischen dem Schöck Isokorbes RK25 und RK45. „System I“ kann aber demgegenüber mit einem wesentlich geringeren Montageaufwand punkten. Um höheren thermischen Anforderungen gerecht zu werden, wird „System II“ im Folgeprojekt THERM-opti-BALKON-P2 entwickelt.

2.3 Bemessungsmodell

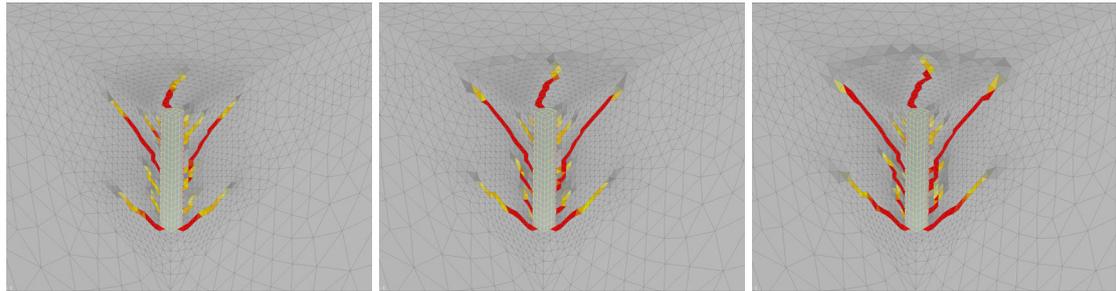
Anforderungen an ein Tragwerk sind nach Eurocode EN 1990 geregelt. Ein Tragwerk muss so geplant sein, dass die Tragwerkszustände Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit gewährleistet werden. Zudem muss das Tragwerk Robustheit aufweisen, sodass Ereignisse wie



(a) 0,08 mm

(b) 0,15 mm

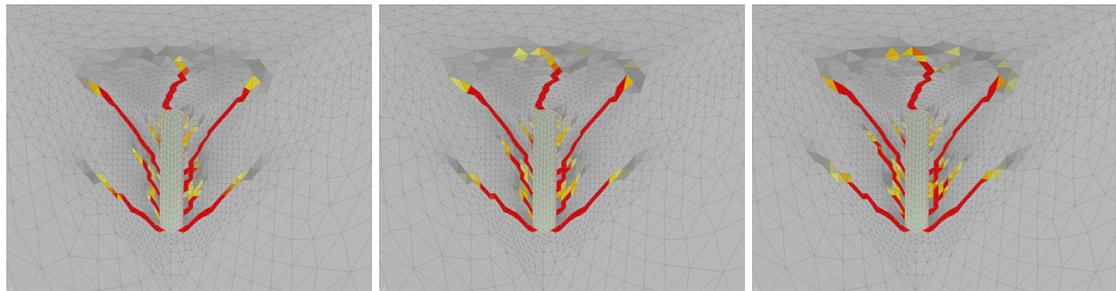
(c) 0,22 mm



(d) 0,29 mm

(e) 0,36 mm

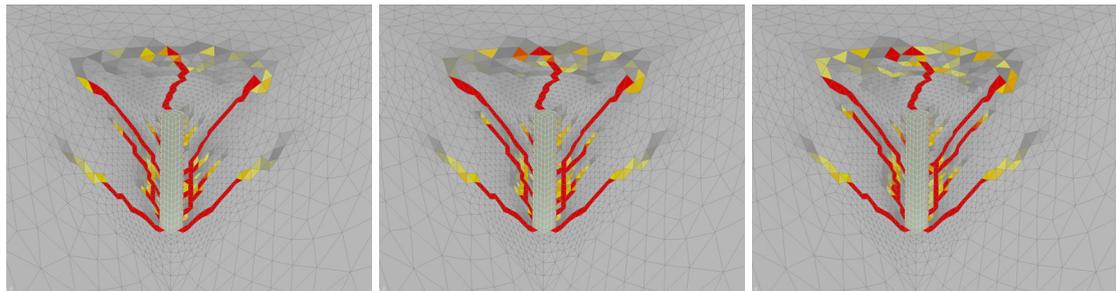
(f) 0,43 mm



(g) 0,50 mm

(h) 0,57 mm

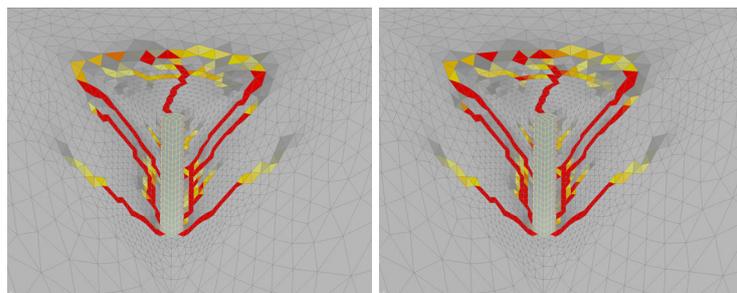
(i) 0,64 mm



(j) 0,71 mm

(k) 0,78 mm

(l) 0,85 mm



(m) 0,92 mm

(n) 0,99 mm

Abbildung 39: Darstellung der größten Hauptnormalverzerrung – in roten Bereichen wird die Rissdehnung des Betons überschritten

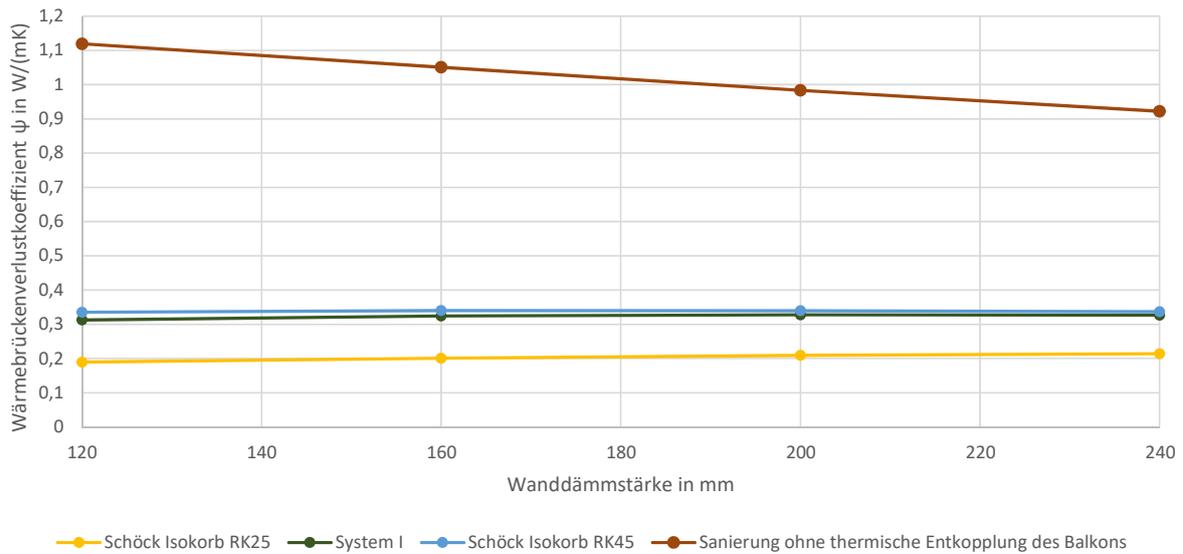


Abbildung 40: Numerische mechanische Untersuchungen – Übersicht der unterschiedlichen Systemlösungen

Brand, Explosion, Anprall oder menschliches Versagen keine Schadensfolgen nach sich zieht, die in keinem Verhältnis zur Schadensursache stehen.

Dafür wird für Einwirkungen E und Tragwerkswiderstände R für alle Tragwerkszustände ein Zuverlässigkeitsniveau nach Eurocode EN 1990 festgelegt. Der Nachweis für die Tragwerkszustände wird dabei im Grenzzustand geführt. Dieser beschreibt die Grenze, an der die Anforderungen genau nicht mehr erfüllt werden. Im vorliegenden Fall sind das der „Grenzzustand der Tragfähigkeit“ (GZT bzw. ULS) und der „Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit“ (GZG bzw. SLS). (Feix und Walkner, 2012)

Für das Bemessungsmodell des THERM-opti-BALKON Systems werden zwei Verfahren entwickelt:

2.3.0.1 Einzelnachweisverfahren Aus den Versuchsergebnissen gemäß Abbildung 37 wird ein Sicherheitsbeiwert der Widerstandsseite für Versagen auf Biegung von $\gamma_{Biegung} = 2,0$ ermittelt. Mit diesem Sicherheitsbeiwert kann aus dem charakteristischen Wert des Widerstandes R_k auf den Designwert R_d durch

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_{Biegung}} \quad (5)$$

geschlossen werden.

2.3.0.2 Genaues Verfahren Um die Tragfähigkeit im Grenzzustand der Tragfähigkeit GZT bzw. zu englisch Ultimate Limit State ULS des entworfenen thermischen Entkopplungssystems zu gewährleisten, muss jedes Element in der Wirkkette für sich genommen den erfordernten Widerstand R gegen die vorhandene Einwirkung E aufweisen. Grundsätzlich wird zwischen globalen G und lokalen Nachweisen L unterschieden. Globale Nachweise ist dabei die Nachweisführung im Bereich

des Balkons *G1* und der Bestandsdecke *G2* auf Querschnittsebene. Kleinteilige lokale Nachweise *L* sind im Bereich der thermischen Entkopplung bei

- Lastausleitung *L1*,
- Lastüberleitung *L2* und
- Lasteinleitung *L3*

zu führen. Für Bereiche, die normativ nicht ausreichend erfasst sind, werden ingenieurmäßige Ansätze getroffen. Das gesamte Nachweisverfahren findet sich in (N. Fleischhacker, in Bearbeitung).

3 Schlussfolgerungen

3.1 Erkenntnisse

Im Zuge des Forschungsprojektes THERM-opti-BALKON wird das thermische Entkopplungssystem „System I“ entwickelt. Für die Entwicklung dieses Systems werden für den Bereich der Lasteinleitung die Grundlagen der Befestigungstechnik von Beton- und Verbundankerschrauben in einer Vielzahl von experimentellen Versuchen weiträumig erforscht und zu einem besseren Verständnis des Tragverhaltens dieser Verankerungselemente beigetragen. Im Speziellen ist das vor allem die Kraftübertragung vom Verankerungsmittel in den Ankergrund Beton unter Zugbelastung. Hierfür können Verbund-Schlupf-Gesetzmäßigkeiten abgeleitet werden, die die Entwicklung eines numerischen Simulationsmodells, von Laborversuchen auf Bauteilebene und eines Bemessungsansatzes erlauben. Somit konnte für die Weiterentwicklung von Betonschrauben wichtiges Grundlagenwissen erforscht und bereitgestellt werden.

Laborversuche auf Bauteilebene weisen die mechanische Tragfähigkeit von „System I“ nach. Sie ermöglichen die Entwicklung eines Bemessungsansatzes. Numerische thermische Simulationen ermöglichen einen Abgleich der Lösung mit den thermischen Anforderungen.

Die umfassenden Ergebnisse aus allen Teilbereichen einer thermischen Entkopplung machen die Entwicklung des hochoptimierten „System II“ für das Projekt THERM-opti-BALKON-P2 möglich.

3.2 Relevante Zielgruppen der Projektergebnisse

Die Projektergebnisse sind von Interesse für Hersteller von thermischen Entkopplungsprodukten, die ihr Produktangebot um Systemlösungen für die Sanierung erweitern möchten. Dies kann nur in Verbindung mit leistungsfähigen Befestigungsmitteln wie der Beton- bzw. Verbundankerschraube passieren. Baufirmen, die sich auf die Sanierung von Bauwerken spezialisiert haben, ermöglichen die vorliegenden Projektergebnisse den Einblick in die Funktionsweise von thermischen Entkopplungen für den Sanierungsfall. Die Ergebnisse können weiters als Grundlage für Planer dienen, die die dargestellte Systemlösungen anwenden möchten.

3.3 Verwertungs- und Verbreitungsaktivitäten

Die wissenschaftlich erlangten Erkenntnisse aus dem Projekt THERM-opti-BALKON werden in

1. Masterarbeiten,
2. einer Dissertation und
3. Publikationen

verwertet.

Ad 1 Im Zuge des Projektes THERM-opti-BALKON werden zwei Masterarbeiten von Raphael SIGL zur Erlangung des akademischen Grades Dipl.-Ing für das Studium „Bau- und Umweltwissenschaften“ mit dem Titel „Tragverhalten von Betonschrauben mit großer Verankerungstiefe unter Randeinfluss“ (Sigl, 2014) und zur Erlangung des akademischen Grades MSc für das Studium „Domotronik“ mit dem Titel „Thermische Balkonsanierung – Versuche zum Tragvermögen ausgewählter Anschlusselemente“ (Sigl, 2016) durchgeführt. Diese sind öffentlich im „ULB Bibliothekszentrum West“ zugänglich.

Ad 2 Die im Projekt THERM-opti-BALKON und THERM-opti-BALKON-P2 durchgeführten wissenschaftlichen Untersuchungen bilden die Grundlage der laufenden Dissertation „Ein neues Verfahren zur nachträglichen thermisch entkoppelten Montage von Stahlbetonbalkonen“ von Nikolaus Fleischhacker (N. Fleischhacker, in Bearbeitung). Diese umfasst alle durchgeführten Laborversuche der beiden Projekte und geht auch auf die Pilotanwendung des Projektes THERM-opti-BALKON-P2 ein. Darüber hinaus wird das entwickelte Bemessungsmodell vorgestellt und das numerische Modell abgebildet. Zudem werden die Grundlagen der thermischen Entkopplung erklärt und analysiert. Es kann als umfassendes Werk, das die wissenschaftlichen Ergebnisse der beiden Projekte vollinhaltlich abdeckt, angesehen werden.

Ad 3 Gerade im Bereich der Grundlagen zu Beton- und Verbundankerschrauben großer Durchmesser können neue Erkenntnisse durch das Projekt THERM-opti-BALKON erlangt werden. Diese werden in den Publikationen „Zur Dehnungsmessung im Kraftübertragungsbereich von Betonschraubankern“ (Walzl, N. Fleischhacker und Feix, 2016) und „Zum Verbundverhalten von Betonschraubdübeln mit großem Durchmesser“ (Lechner u. a., 2016) veröffentlicht. Weitere Publikationen sind geplant.

4 Ausblick und Empfehlungen

4.1 Weiterführende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten

Mit dem Projekt THERM-opti-BALKON-P2 wird das Projekt THERM-opti-BALKON konsequent weiterverfolgt. Über die Weiterentwicklung der thermischen Entkopplung zu „System II“ und dessen

Pilotanwendung können notwendige Erkenntnisse zur praktischen Ausführung erlangt werden. Weitere Informationen zum Projekt können dem Projektantrag (N. Fleischhacker, 2015a) und dem Zwischenbericht (N. Fleischhacker, 2015b) entnommen werden.

4.2 Potenzial für Demonstrationsvorhaben

Aufbauend auf den erlangten Erkenntnissen aus dem Projekt THERM-opti-BALKON wird für das Forschungsprojekt THERM-opti-BALKON-P2 „System II“ entwickelt. Dieses wird in Bauteilversuchen und numerischen Simulationen untersucht. Durch diesen weiteren Iterationsschritt kann – im Vergleich zu „System I“ – der Montageaufwand nochmals erheblich gesenkt werden und die thermische Performance des thermischen Entkopplungssystems durch größere mögliche Dämmstärken erheblich zu einem absoluten Spitzenwert von $0,1 \text{ W}/(\text{mK})$ gesenkt werden.

Zuletzt kann „System II“ als aktueller Stand der Forschung in einer Pilotanwendung als Versuchsobjekt umgesetzt werden (siehe Abbildung 41).

Mit Abschluss des Projekt THERM-opti-BALKON-P2 werden die Grundlagen inklusive Dauerhaftigkeit der Konstruktion zur Entwicklung eines praxistauglichen und kostengünstigen thermischen Entkopplungssystems gelegt sein. Dies kann dann Basis für ein größeres Demonstrationsvorhaben sein.



(a) Bild auf die Fassade mit neu errichtetem Balkon



(b) Ausblick vom Balkon

Abbildung 41: Arbeitsstand In-Situ-Versuchsanlage aus dem Projekt THERM-opti-BALKON-P2 mit System II

5 Verzeichnisse

5.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: THERM-opti-BALKON – thermische Entkopplung „System I“	10
Abbildung 2: Endenergieeinsatz 1962 bis 2015 und Ressourceneinsatzszenario zur Erreichung der Energie- und Klimaziele des Landes Tirol. (Tirol, 2017)	12
Abbildung 3: Modell des realen mechanischen und thermischen Systems	13
Abbildung 4: System I – eine Idee von Prof. FEIX	15
Abbildung 5: System I	16
Abbildung 6: Exemplarische Darstellung Schöck Isokorb KXT mit 120 mm Dämmstärke (Schöck, 2016a)	18
Abbildung 7: Schöck Isokorb Typ RK	19
Abbildung 8: Systemlösungen von Halfen und AVI	19
Abbildung 9: Abschnitte einer Betonschraube	20
Abbildung 10: Wirkprinzipien von Verankerungsmitteln (Eligehausen und Mallée, 2000)	21
Abbildung 11: Versagensmechanismen unter Zugbeanspruchung (Eligehausen und Mallée, 2000)	21
Abbildung 12: Verbundversagensarten Verbunddübeln basierend auf dem Wirkprinzip Stoffschluss (Eligehausen und Mallée, 2000).....	22
Abbildung 13: Versagensart Spalten	23
Abbildung 14: Lastübertragungsmechanismus von Betonschraube und Bewehrungsstahl im Vergleich (Eligehausen und Mallée, 2000)	24
Abbildung 15: Montagehinweise TOGE Betonschrauben – basierend auf (<i>TOGE Dübel Produktprogramm</i> 2015)	25
Abbildung 16: Montagewerkzeuge	25
Abbildung 17: Spezial-Verbundmörtel CF-T 300 V für TOGE Betonschrauben (<i>TOGE Dübel Produktprogramm</i> 2015) (<i>CHEMOFAST Anchoring GmbH</i> 2016)	25
Abbildung 18: Montagehinweise TOGE Verbundankerschraube – basierend auf (<i>TOGE Dübel Produktprogramm</i> 2015)	26
Abbildung 19: Bilddokumentation der Betonagen	27
Abbildung 20: Betonage von Versuchsserie VS2	28
Abbildung 21: Versuchsaufbau am Teil- und Gesamtsystem	30
Abbildung 22: Numerisches Viertelmodell zur Nachrechnung der Versuche „weitere Stützung“	31
Abbildung 23: Berechnungsmodelle	33
Abbildung 24: Versuchsserie VS08 – Höchstwert der Schraubenkraft $F_{ms,max}$ bzw. der Verbundspannung τ_{SB} über der Verbundlänge l aufgetragen – Prüfkörper aus Betoncharge B5	35
Abbildung 25: Höchstlast der Schraubenkraft $F_{S,max}$ aufgetragen über die Betonfestigkeit der Probekörper aus den Betonchargen B3, B5 und B6	36
Abbildung 26: Erreichte Maximallasten in den Einzelversuchen „enge Stützung“ – Pull-Out-Tests	37
Abbildung 27: Betoncharge B3 –Ableitung einer idealisierten Verbund-Schlupf Beziehung für nicht geklebte Betonschrauben vom Typ TOGE HMS-SB 22x345 M24	38
Abbildung 28: Betoncharge B6 – Ableitung einer idealisierten Verbund-Schlupf Beziehung für nicht geklebte Betonschrauben vom Typ TOGE HMS-SB 22x345 M24	39
Abbildung 29: Betoncharge B3 – Ableitung einer idealisierten Verbund-Schlupf Beziehung für nicht geklebte Betonschrauben vom Typ TOGE HMS-SB 22x345 M24	39

Abbildung 30: Betoncharge B6 – Ableitung einer idealisierten Verbund-Schlupf-Beziehung für geklebte Betonschrauben vom Typ TOGE HMS-SB 22x345 M240	40
Abbildung 31: Verbundspannungsverlauf über Einbindelänge	40
Abbildung 32: Versuchsserie VS08 – Höchstwert der Schraubenkraft $F_{ms,max}$ bzw. der Verbundspannung τ_{SB} über der Verbundlänge l aufgetragen – Prüfkörper aus Betoncharge B5	42
Abbildung 33: Fotodokumentation Versagen der Probekörper ohne Anschlussbewehrung mit Schubschraube aus Versuchsserie VS07	44
Abbildung 34: Fotodokumentation Versagen der Probekörper ohne Anschlussbewehrung mit Schubknagge aus Versuchsserie VS07.....	45
Abbildung 35: Ergebnisse	45
Abbildung 36: Versuchsergebnisse System I in Variante a und b	47
Abbildung 37: Versuchsergebnisse Marktlösungen.....	49
Abbildung 38: Ergebnisvergleich der experimentellen Untersuchungen mit weiter Stützung ohne Randeinfluss mit der numerischen Simulation in einem Kraft-Weg-Diagramm	50
Abbildung 39: Darstellung der größten Hauptnormalverzerrung – in roten Bereichen wird die Rissdehnung des Betons überschritten	51
Abbildung 40: Numerische mechanische Untersuchungen – Übersicht der unterschiedlichen Systemlösungen	52
Abbildung 41: Arbeitsstand In-Situ-Versuchsanlage aus dem Projekt THERM-opti-BALKON-P2 mit System II	56

5.2 Literaturverzeichnis

- CHEMOFAST Anchoring GmbH (2016). URL: <http://www.chemofast.de/>.
- Eligehausen Rolf und Mallée Rainer (2000): *Befestigungstechnik im Beton- und Mauerwerksbau*. Ernst & Sohn Verlag, Berlin, S. 380.
- Energiapolitik der Europäischen Union (2016). URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Energiapolitik_der_Europ%C3%A4ischen_Union (abgerufen am 07. 11. 2015).
- Feix J. und Walkner Rupert (2012): *Beton - Grundlagen der Bemessung nach EC2*. Studia Universitätsverlag, Innsbruck.
- Fleischhacker Ernst (2016): *Tiroler Energiemonitoring*. URL: http://www.ressourcenmanager.at/index.php/Energiemonitoring_Tirol (abgerufen am 07. 11. 2015).
- Fleischhacker Nikolaus (in Bearbeitung): *Ein neues Verfahren zur nachträglichen thermisch entkoppelten Montage von Stahlbetonbalkonen*. Dissertation.
- Fleischhacker Nikolaus (2015a): *Thermisch optimierte Balkonsanierung Phase 2: In-Situ-Versuchsanlage*.
- Fleischhacker Nikolaus (2015b): *THERM-opti-BALKON-P2 – Zwischenbericht*.
- Fleischhacker Nikolaus (2016): *Potential nichtmetallischer Bewehrung zur Verringerung konstruktiver Wärmebrücken am Beispiel Balkonkragplatte*. Masterarbeit.
- Hilti Dübeltechnik (2016). URL: https://www.hilti.at/#/stage2/cls_anchor_systems_foldout (abgerufen am 10. 08. 2016).
- HIT ISO-Element (2015). URL: <http://www.halfen.com/> (abgerufen am 29. 10. 2016).
- Lechner Johannes, Fleischhacker Nikolaus, Walzl Christoph und Feix Jürgen (2016): "Verbund-Schlupf-Untersuchungen von Beton- und Verbundankerschrauben".

- NIRO-Thermokorb (2015). URL: <http://www.avi.at/> (abgerufen am 29. 10. 2015).
- Ožbolt Joško (2010): *Finite element code MASA*. Universität Stuttgart.
- Schöck (2013): *Technische Information Schöck Isokorb R*.
- Schöck (2016a): *Beton/Beton-Konstruktionen. Schöck Isokorb 120 mm*. URL: https://www.schoeck.at/de_at/produktloesungen/beton-beton-120-mm-107 (abgerufen am 16. 09. 2016).
- Schöck (2016b): *Schöck Isokorb R für Beton/Beton-Konstruktionen*. URL: https://www.schoeck.at/de_at/produktloesungen/beton-beton-213?tab=rk#rk (abgerufen am 16. 09. 2016).
- Schöck (2016c): *Wärmedämmung – Die tragenden Wärmedämmelemente von Schöck minimieren Wärmebrücken auf höchstem Niveau*. URL: https://www.schoeck.at/de_at/produktloesungen/waermedaemmung-2 (abgerufen am 16. 09. 2016).
- Sigl Raffael (2014): *Tragverhalten von Betonschrauben mit großer Verankerungstiefe unter Randeinfluss*. Diplomarbeit.
- Sigl Raffael (2016): *Thermische Balkonsanierung – Versuche zum Tragvermögen ausgewählter Anschlusselemente*. Masterarbeit.
- Sippel Thomas M. (2012): *Beton-Kalender 2012: Verankerungs- und Bewehrungstechnik*. Ernst und Sohn.
- Tirol Land (2017): *Energiestrategie*. URL: <https://www.tirol.gv.at/umwelt/energie/energiestrategie/> (abgerufen am 06. 01. 2017).
- TOGE Dübel Produktprogramm (2015).
- Waltl Christoph, Fleischhacker Nikolaus und Feix J. (2016): "Zur Dehnungsmessung im Kraftübertragungsbereich von Betonschraubankern". In: *Beton- und Stahlbetonbau*.