



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

VIENNA
UNIVERSITY OF
TECHNOLOGY

DIPLOMARBEIT

Master's Thesis

Mauerwerksverstärkung durch Vorspannung

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-Ingenieurs unter
der Leitung von

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Andreas Kolbitsch

und als verantwortlich mitwirkenden Assistenten

Univ. Ass. Dipl.-Ing. Dr. techn. Sinan Korjenic

am

**Institut für Hochbau und Technologie
Zentrum für Hochbaukonstruktionen und Bauwerkserhaltung**

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Simone Jarnig

0125308

Arnethgasse 39 / 6

A – 1160 Wien

Wien, Jänner 2008

.....
(Simone Jarnig)

Vorwort

Diese Diplomarbeit wurde am Institut für Hochbau und Technologie – Zentrum für Hochbaukonstruktionen und Bauwerkserhaltung – der Technischen Universität Wien durchgeführt.

Hiermit möchte ich dem Leiter des Instituts Herrn Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Andreas Kolbitsch sowie Herrn Dipl.-Ing. Dr. techn. Sinan Korjenic für die sehr gute Betreuung meiner Diplomarbeit danken.

Die im Rahmen der Diplomarbeit durchgeführten Versuche wurden erst durch Mitarbeiter der Firma Porr AG, unter der Leitung von Herrn Ing. Hartl möglich. Deshalb möchte ich auch diesen Mitarbeitern für die tatkräftige Unterstützung bei den Versuchen danken.

Die nächsten Zeilen möchte ich den Menschen widmen, ohne die ein Studium nicht möglich gewesen wäre. An erster Stelle sei meiner Familie gedankt, allen voran meinen Eltern, die mich in meinem Leben in jeglicher Weise unterstützen. Auch meinem langjährigen Freund gilt spezieller Dank für seine sehr wertvolle und wichtige Unterstützung. Weiters möchte ich mich bei meinen Freunden und Studienkollegen für alle Erlebnisse und Erfahrungen, die ich mit Ihnen teilen durfte, bedanken.

Kurzzusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Vorspannung von Mauerwerk, wobei der Schwerpunkt bei der Vorspannung als Verstärkungsmaßnahme von historischem Mauerwerk liegt.

In der Altbausanierung werden grundsätzlich drei ingenieurmäßige Sicherungstechniken für Mauerwerk verwendet. Je nach Schwere der Schädigung des Mauerwerks wird entweder injiziert, vernadelt oder vorgespannt, wobei die Vorspannung, als Sicherungsmaßnahme von altem Mauerwerk, überwiegend bei schwerwiegender Schädigung eingesetzt wird. Ein wesentliches Merkmal von Mauerwerk ist die geringe Zugfestigkeit im Vergleich zur Druckfestigkeit. Aufgrund dieser Tatsache wird durch die Vorspannung von Mauerwerk versucht, gezielt Druckkräfte in das nicht zugfeste Material einzuleiten, um vorhandene Risse zu verschließen und neue Risse zu vermeiden. Weiters kann mit der Vorspannung von Mauerwerk gezielt der Kraftfluss im Mauerwerk verändert werden, was jedoch einen tiefen Eingriff in die Tragstruktur darstellt.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Versuche an der TU- Wien durchgeführt, welche sich mit dem Faserverbundwerkstoff Aramid, als Spannglied, beschäftigten. Aramid verfügt gegenüber herkömmlichem Spannstahl über grundlegende Vorteile wie z.B. die hohe Steifigkeit im Verhältnis zum geringen Gewicht oder die sehr gute Korrosionsbeständigkeit.

Bei der Forschungsarbeit wurde an einem Mauerwerk mittels Ausziehversuch die Vorspannung durch Verbundkraftübertragung getestet. Die Spannkraft bei der Verbundkraftübertragung wird durch Reibungs-, Haftungs- und Scherverbund ins Mauerwerk übertragen. Durch die Verbundkraftübertragung kommt es zum Wegfall der großen Verankerungsbereiche, was einen wesentlichen Vorteil für die Denkmalpflege darstellt.

Abstract

This paper deals with the prestressing of masonry buildings, with the focus on prestressing for reinforcement activities at historical masonry.

Basically there can be used three protection techniques for masonry in the retrofit, which are injection, anchoring or prestressing. The choice for one technique depends on the heaviness of the damage, where prestressing of masonry is basically used for grave damages. A significant characteristic of masonry is the lower tensile strength in comparison to the comprehensive strength. Due to this fact, the prestressing of masonry tries to make a specific leading-in of compressive forces into the not guaranteeing tensile strength material. With this method existing cracks can be sealed and an accruing of new cracks can be prevented. Another effect of prestressing is to change the flow of forces in the masonry, which is a big intervention in the structure.

The research work consists of different tests on the Technical University of Vienna. These tests were made with the material Aramid that has for example the advantage of a high stiffness in relation to the low weight or the excellent corrosion resistance.

With the help of a pull-out experiment prestressing with aramid rods was tested. In this method the tension force is transferred into the masonry by friction, adhesion and shear action.

According to the composite load transmission no large anchorage areas are needed, which is a great advantage for the preservation of historical monuments.

Inhalt

1. Einleitung.....	1
1.1. Aufgabenstellung und Zielsetzungen	1
1.2. Aufbau und Gliederung der Diplomarbeit.....	1
2. Grundlagen zur Wirkungsweise einer Vorspannung.....	3
2.1. Allgemeines.....	3
2.2. Wirkung einer Vorspannung	3
2.2.1. Spannbeton.....	3
2.2.2. Mauerwerk.....	5
3. Instandsetzung / Vorspannung von historischem Mauerwerk (Bestandsmauerwerk).....	6
3.1. Allgemeines.....	6
3.2. Werkstoffe.....	7
3.2.1. Mauerwerk – Bestandsmauerwerk	7
3.2.1.1. Allgemeines	7
3.2.1.2. Bestandserkundungen	8
3.2.1.3. Zustandsanalysen [34].....	9
3.2.1.4. Materialeigenschaften der Komponenten.....	10
3.2.1.5. Einwirkungen auf Mauerwerkskonstruktionen	11
3.2.1.6. Beanspruchbarkeit von Mauerwerk - Versagenskriterien	13
3.2.1.7. E – Modul von Mauerwerk	19
3.2.1.8. Risse im Mauerwerk – Entstehung und Ursachen	20
3.2.2. Spannglieder.....	21
3.2.2.1. Allgemeines	21
3.2.2.2. Faserverbundwerkstoffe – mit besonderer Berücksichtigung von Aramid.....	21
3.3. Vorspannung von historischem Mauerwerk.....	27
3.3.1. Allgemeines.....	27
3.3.2. Vorspannmethoden.....	27
3.3.2.1. Grad der Vorspannung	27
3.3.2.2. Art der Verbundwirkung	28
3.3.3. Spanngliedführung	28
3.3.3.1. Anordnung der Spannglieder in der Wandebene:	28
3.3.3.2. Anordnung der Spannglieder in der Querschnittsebene.....	29
3.3.4. Wichtige Aspekte bei der Herstellung einer Vorspannung	30
3.3.4.1. Bauaufnahme	30
3.3.4.2. Herstellung der Bohrlöcher.....	32
3.3.4.3. Einbringen / Spannen der Spannglieder.....	32
3.3.4.4. Korrosionsschutz bei Spanngliedern aus Spannstahl.....	33
3.3.5. Spanngliedverankerung.....	34
3.3.5.1. Allgemeines	34
3.3.5.2. Endverankerung durch Verbund	36
4. Modellbildungen und Berechnungen bei vorgespanntem Mauerwerk	37
4.1. Allgemeines.....	37
4.2. Krafteinleitung – Druckausbreitung im Mauerwerk.....	37
4.2.1. Allgemeines.....	37
4.2.2. Teilflächenpressung rechtwinklig zur Lagerfuge (nach Haller [9])	37
4.2.3. Teilflächenpressung parallel zur Lagerfuge (nach Haller [9])	37
4.2.4. Druckausbreitung im Mauerwerk.....	38
4.2.5. Spaltzugkräfte und Randzugkräfte	40
4.2.6. Mindestauflast	41
4.3. Verbund als Kraftübertragung.....	42
4.3.1. Allgemeines.....	42

4.3.2.	Zwei Methoden der Krafteinleitung bei Vorspannung durch Verbund.....	43
4.3.3.	Verbundversagen.....	45
4.4.	Spannkraftänderungen.....	46
5.	Versuchsdokumentation.....	47
5.1.	Allgemeines.....	47
5.2.	Messtechnik.....	48
5.2.1.	Begriffe in der Messtechnik.....	48
5.2.2.	Messgeräte.....	48
5.2.2.1.	Dehnungsmessstreifen DMS:.....	49
5.2.2.2.	Dokumentation des Probeversuchs / DMS – Applikation.....	55
5.2.2.3.	Kraftaufnehmer.....	59
5.3.	Zugversuche an Aramidstäben.....	60
5.3.1.	Allgemeines.....	60
5.3.2.	Aramidstäbe.....	60
5.3.3.	Versuchsablauf – Versuchsaufbau.....	60
5.3.4.	Auswertung der Zugversuche.....	63
5.3.4.1.	Zugversuch Nr. 1.....	66
5.3.4.2.	Zugversuch Nr. 2.....	67
5.3.4.3.	Zugversuch Nr. 3.....	69
5.4.	Ausziehversuche an einem gründerzeitlichen Bestandsmauerwerk im Keller der TU- Wien.....	72
5.4.1.	Allgemeines.....	72
5.4.2.	Vorbereitungen für den Ausziehversuch.....	72
5.4.3.	Der Ausziehversuch.....	77
5.4.4.	Auswertung der Versuchsreihe „2“.....	83
5.4.4.1.	Ausziehversuch Probe Nr. 1.....	85
5.4.4.2.	Ausziehversuch Probe Nr. 2.....	87
5.4.4.3.	Ausziehversuch Probe Nr. 3.....	89
5.5.	Gesamtinterpretation der durchgeführten Forschungsarbeit.....	91
5.5.1.	Zugversuche.....	91
5.5.2.	Ausziehversuche.....	91
5.5.3.	Erkenntnisse und Empfehlungen für zukünftige Anwendungen.....	92
6.	Zusammenfassung und Ausblick.....	93
7.	Literaturverzeichnis.....	96
8.	Abbildungsverzeichnis.....	98
9.	Tabellenverzeichnis.....	101

1. Einleitung

Die Vorspanntechnologie im Bereich des Spannbetonbaus brachte sehr gute Entwicklungen und positive Eigenschaften für die Verwendung von Spannbeton als Baumaterial. So konnte durch den Einsatz von Spanngliedern die Tragfähigkeit erhöht werden, sowie die Gebrauchstauglichkeit der Spannbetonbauten wesentlich verbessert werden. Diese positiven Effekte beim Einsatz der Vorspannung versuchte man dann auch für das Mauerwerk zu nützen. So wird die Technologie des Spannbetonbaus jedoch mit Einschränkungen bei der Vorspannung von Mauerwerk genützt.

Bei der Vorspannung von Mauerwerk kann generell in zwei Bereiche unterschieden werden:

- Vorspannung als Verstärkungsmaßnahme
- Vorspannung bei neu hergestellten Mauerwerk

Als Verstärkungsmaßnahme wird die Vorspannung bei Mauerwerk im überwiegenden Teil bei altem historischem Mauerwerk, wie z.B. Kirchen, Klöster etc. eingesetzt. Bei diesem Mauerwerk werden durch die Vorspannung gezielt Druckkräfte in das nicht zugfeste Material eingeleitet. Des Weiteren kann mit der Vorspannung auch eine Veränderung des Kraftflusses im Mauerwerk erzielt werden. Die Vorspannung von historischem Mauerwerk sowie durchgeführte Beispiele werden in der Literatur vor allem von Haller [9], Nietzold [25], Pieper [27] und Wenzel [34] behandelt.

Die Vorspannung von neu errichteten Mauerwerk nimmt, aufgrund des Erdbebennachweises (EC 8) an Bedeutung zu. Um horizontale Lasten im Mauerwerk sicher ableiten zu können, kann die Vorspannung von Mauerwerk einen wesentlich Beitrag leisten.

1.1. Aufgabenstellung und Zielsetzungen

Die konkrete Aufgabenstellung dieser Arbeit war die Untersuchung der Vorspannung von Mauerwerk als Verstärkungsmaßnahme in der Altbausanierung.

Die vorliegende Arbeit soll Einblick über die Vorspannungstechnologie von Mauerwerk geben. Zusätzlich zum allgemeinen Teil wurde auch Forschungsarbeit, mit der Unterstützung der Firma Porr Projekt und Hochbau AG, an der TU- Wien durchgeführt. Da es sehr wenige dokumentierte Arbeiten zur Vorspannung von Mauerwerk mittels Aramid gibt, wurden Versuche mit Spanngliedern aus Aramid durchgeführt. Der neuartige Faserverbundwerkstoff Aramid bietet einige wesentliche Vorteile gegenüber dem am häufigsten verwendeten Spanngliedmaterial „Spannstahl“.

Zu den zwei grundlegenden Vorteilen zählen:

- die hohe Steifigkeit im Verhältnis zum Gewicht
- die Korrosionsbeständigkeit

1.2. Aufbau und Gliederung der Diplomarbeit

Die nachfolgenden Punkte geben einen kurzen Überblick über die Gliederung der Diplomarbeit geben.

Kapitel 2: Grundlagen zur Wirkungsweise einer Vorspannung

Hier werden wichtige Begriffe zur Vorspanntechnologie erläutert. Diese stammen im Wesentlichen aus dem Spannbetonbau und werden auf das Mauerwerk übertragen.

Kapitel 3: Instandsetzung / Vorspannung von historischem Mauerwerk (Bestandsmauerwerk)

In diesem Teil der Arbeit werden zu Beginn die drei Arten (Injizieren, Vernadeln, Vorspannen) zur Sicherung von Bestandsmauerwerk gegenübergestellt. Anschließend werden die wichtigsten Eigenschaften des Bestandsmauerwerks sowie der Spanngliedmaterialien angeführt. Wobei hier speziell auf die Eigenschaften des Faserverbundwerkstoffes „Aramid“ eingegangen wird. Den dritten und abschließenden Teil dieses Kapitels bildet die Dokumentation der Vorspannung von historischem Mauerwerk. Dabei werden grundlegende Gliederungen bei Vorspannung von Mauerwerk dargestellt, sowie wichtige Aspekte bei der Herstellung behandelt.

Kapitel 4: Modellbildungen und Berechnungen bei vorgespanntem Mauerwerk

Dieses Kapitel gibt Einblick in verschiedene Modellbildungen bei der Vorspannung von Mauerwerk. Hauptbereich bildet hier die Krafteinleitung durch Verbundübertragung in das Mauerwerk.

Kapitel 5: Versuchsdokumentation

Dieser Bereich beinhaltet die Dokumentation, der an der TU- Wien durchgeführten Forschungsarbeit, welche in folgende Punkte gegliedert werden kann:

- Allgemeiner Teil über die Messtechnik
- Zugversuche an einzelnen Aramidstäben
- Ausziehversuch der injizierten Aramidspannglieder an einem Mauerwerk im Keller der TU-Wien

Den abschließenden Teil der Forschungsdokumentation bildet die Auswertung und Interpretation der Versuchsergebnisse.

Kapitel 6: Zusammenfassung und Ausblick

In der Zusammenfassung werden die wichtigsten Punkte der Arbeit nochmals aufgegriffen und die wesentlichsten Punkte dokumentiert. Der Ausblick gibt mögliche Anregungen für weitere Arbeiten auf diesem Fachgebiet.

2. Grundlagen zur Wirkungsweise einer Vorspannung

2.1. Allgemeines

Der Schwerpunkt dieser Arbeit bildet die Vorspannung von historischem Mauerwerk mit Spezialisierung auf die Vorspannung durch Verbund mittels Aramidstäben.

Im ersten Teil der Arbeit wird ganz kurz die allgemeine Terminologie in der Vorspanntechnologie und die grundsätzliche Wirkungsweise einer Vorspannung erläutert. Im Wesentlichen werden zuerst die Grundzüge der Vorspanntechnologie, allgemein für den Spannbeton erläutert, welche dann in den nachfolgenden Kapiteln auf das Mauerwerk präzisiert werden.

2.2. Wirkung einer Vorspannung

2.2.1. Spannbeton

„Der Grundgedanke der Vorspannung ist, den aus äußeren Einwirkungen entstehenden Spannungen, einen durch die Vorspannung verursachten, entgegen wirkenden Spannungszustand zu überlagern.“ [18]

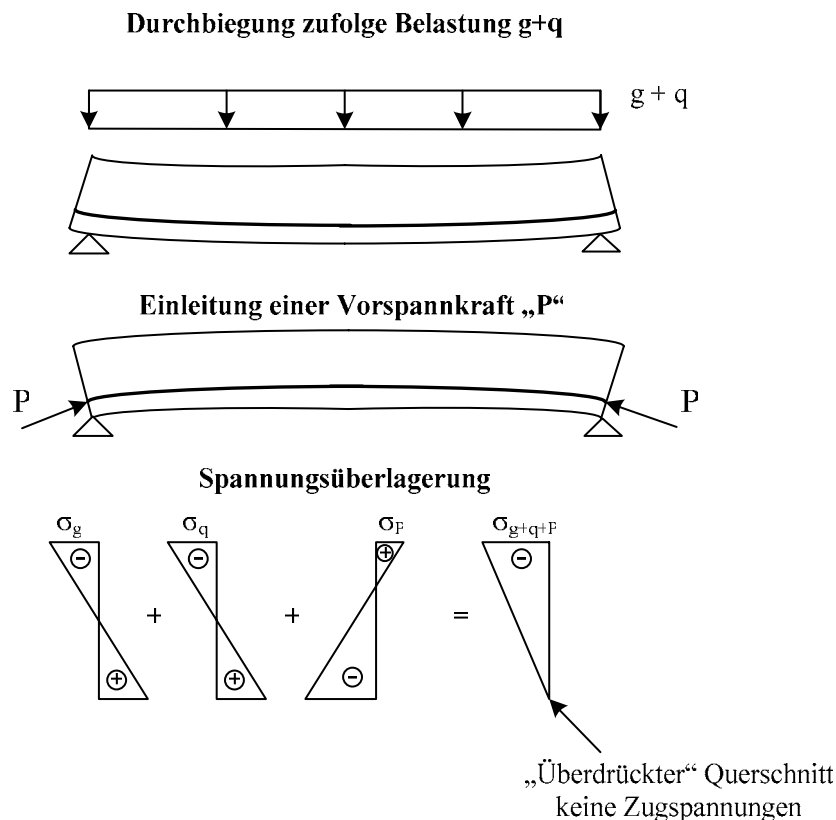


Abb. 2.1: Wirkungsweise einer Vorspannung (nach [18])

Abb. 2.1 zeigt die Wirkung einer Vorspannung schematisch an einem statisch bestimmt gelagerten Einfeldträger. Der Balken besitzt im unteren Querschnittsbereich ein gerades Spannglied. Wird dieser Balken vorgespannt, so wirken die Verankerungskräfte auf den Balken. Dadurch entsteht ein Spannungszustand mit Druckspannungen am unteren Rand und Zugspannungen am oberen Querschnittsrand.

In Abb. 2.1 führt die Überlagerung der Spannungen in Feldmitte aus Eigengewicht g und äußerer Belastung q , mit der Spannung aus der Vorspannkraft zu einem komplett überdrückten Querschnitt. Je nach Größe der Vorspannkraft gibt es an der Balkenunterseite entweder nur Druckspannungen oder auch geringe Zugspannungen.

Dies führt laut [19] auf die nachfolgenden Begriffe:

Unterscheidung nach den Grad der Vorspannung:

- Volle Vorspannung: Es treten im Beton keine Zugspannungen auf
- Teilweise Vorspannung: Im Beton treten Zugspannungen auf; im Gebrauchszustand wird mit Rissbildung gerechnet.

Weitere Unterscheidungsmöglichkeiten im Spannbetonbau sind laut [3] und [19] folgende:

Nach der Art der Verbundwirkung:

- Vorspannung mit sofortigem Verbund
- Vorspannung mit nachträglichem Verbund
- Vorspannung ohne Verbund

Nach der Lage des Spanngliedes:

- Interne Vorspannung
- Externe Vorspannung

Nach dem Zeitpunkt des Aufbringens der Vorspannung:

- Spannen vor dem Erhärten des Betons
- Spannen nach dem Erhärten des Betons

Im Spannbetonbau entstehen durch die Vorspannung vor allem Vorteile für die Gebrauchstauglichkeit, wie Durchbiegungsminimierung oder Rissvermeidung. [18]

Diese Unterscheidungsmerkmale gibt es im Wesentlichen auch beim Mauerwerk, welche im Kapitel 3.3 näher behandelt werden.

2.2.2. Mauerwerk

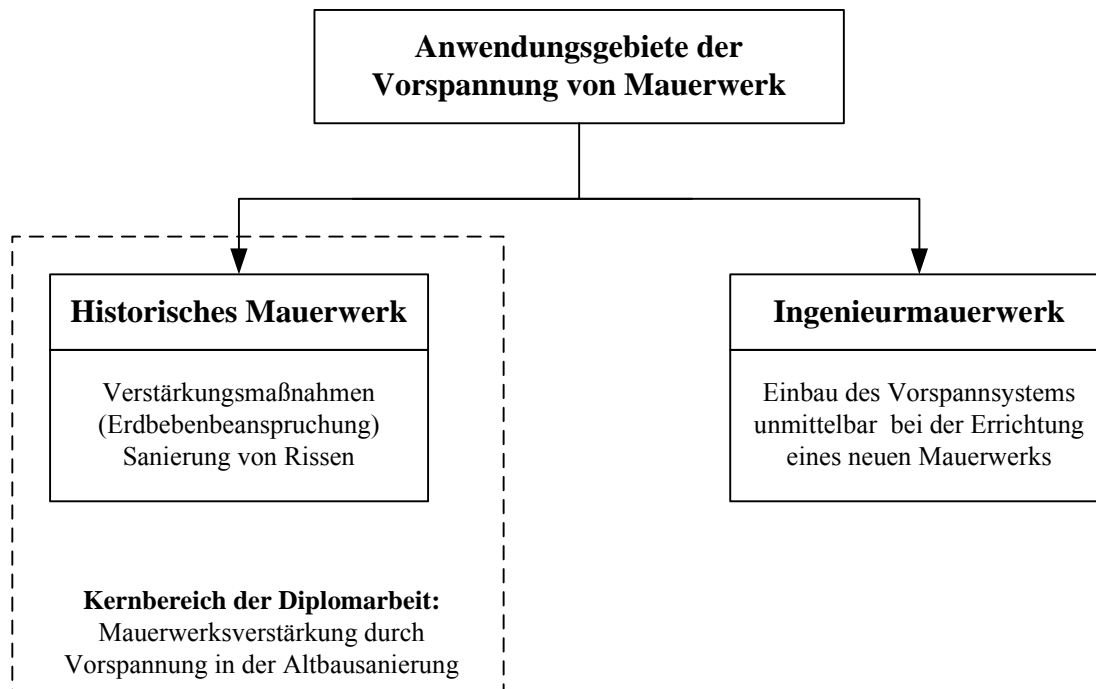


Abb. 2.2: Anwendungsgebiete der Vorspannung von Mauerwerk

Wie aus Abb. 2.2 hervorgeht kann bei der Vorspannung von Mauerwerk grundsätzlich in zwei Bereiche unterschieden werden:

- Vorspannung von **historischem Mauerwerk**: Kernbereich der Diplomarbeit (siehe Kapitel 3)

Beim Vorspannen von historischem Mauerwerk werden im nicht zugfesten Material gezielt Druckkräfte eingeleitet, um bereits vorhandene Risse zusammenzudrücken und künftige Risse zu vermeiden. Jedoch wird das Vorspannen bei Mauerwerk auch dazu verwendet, gezielt den Kraftfluss und damit die Lastabtragung im Mauerwerk zu verändern. Es kommt zu einer Lastumlagerung, welche einen tiefen Eingriff in das Tragsystem darstellt.[8][20][34]

- Vorspannung von **Ingenieurmauerwerk**: dieser Bereich wird in der Diplomarbeit nur nachfolgend kurz allgemein erläutert.

Wird Mauerwerk vertikal gering belastet jedoch gleichzeitig horizontal in und senkrecht zur Wandebene belastet so ist eine Vorspannung des Mauerwerks sinnvoll. Diese bewirkt eine Erhöhung der Biege- und Schubtragfähigkeit sowie eine Verbesserung der Rissicherheit der Mauerwerkswand. Bei der Vorspannung von Ingenieurmauerwerk werden die Spannglieder unmittelbar bei der Errichtung, meist im Abstand von 1,0 m bis 2,5 m, in die vertikalen Lochkanäle der Wand integriert. Je nach Vorspannsystem gibt es dabei Vorspannung mit oder ohne Verbund. [26]

3. Instandsetzung / Vorspannung von historischem Mauerwerk (Bestandsmauerwerk)

3.1. Allgemeines

Die Eigenschaften, wie Festigkeit und Tragfähigkeit, von historischem Mauerwerk lassen sich im Allgemeinen nur sehr schwer vorhersagen. Grund dafür sind sehr große Steifigkeitsunterschiede innerhalb der Mauerschichten. So besteht ein historisches Mauerwerk meist aus einer optisch einwandfreien Außenschale, aber die Innenbereiche meist aus einer Bruchsteinfüllung mit unterschiedlichen Mörtelanteilen. Kritische Bereiche sind meist die schlecht ausgeführten und ungenügend tief gegründeten Fundamente, was Ausgangspunkt für zahlreiche Schädigungen der Bausubstanz ist. [34]

Für diese Schädigungen werden laut [33] und [34] folgende ingenieurmäßige Sicherungstechniken in der Denkmalpflege angewendet:

- Injizieren
- Vernadeln
- **Vorspannen**

Für die vorliegende Arbeit von Bedeutung ist das Vorspannen von Mauerwerk, der Vollständigkeit halber werden in Tab. 3.1 aber alle drei Sicherungstechniken kurz beschrieben, wobei das Injizieren und Vernadeln nicht mehr näher behandelt wird.

Tab. 3.1: Denkmalpflegerische Bewertung der Verfahren (nach [34], Seite 64-65)

UMFANG DES EINGRIFFS	INJIZIEREN	VERNADELN	VORSPANNEN
Bereich	großflächig	partiell	punktuell
AUSWIRKUNGEN auf	INJIZIEREN	VERNADELN	VORSPANNEN
Trennfunktion	Veränderung der Bauphysik	Veränderung der Bauphysik durch Injektion	Veränderung der Bauphysik durch Injektion
Tragfunktion	Festigen des statischen Systems	Verstärken des statischen Systems	Veränderung des statischen Systems
Formstruktur	keine Auswirkungen	keine Auswirkungen	keine Auswirkungen
Oberfläche	Gefährdung durch Injektionsgut	Gefährdung durch Injektionsgut Eingriffe durch Bohrlöcher	Gefährdung durch Injektionsgut Eingriffe durch Bohrlöcher Eingriffe durch Ankerplatte (bereich)
Mauersteine	keine Auswirkungen	Eingriffe durch Bohrlöcher	Eingriffe durch Bohrlöcher Eingriffe durch Ankerelemente
Bindemittel	Teilergänzungen	Teilergänzung und Einbau neuer Elemente	Teilergänzung und Einbau neuer Elemente
Schichtenmauerwerk	Festigen des Verbandes	Verstärken des Verbandes	Vorspannen des Verbandes
Schalenmauerwerk	Festigen der Schalen	Einbau neuer Elemente	Einbau neuer Elemente
ALTERUNGSVERHALTEN	INJIZIEREN	VERNADELN	VORSPANNEN
Lebensdauer (keine Langzeiterfahrungen)	seit ca. 1900	seit den 1920er Jahren	seit den 1920er Jahren
Pflegefähigkeit	nein	nein	mit Verbund: nein ohne Verbund: ja
Reparaturfähigkeit	nein	nein	mit Verbund: nein ohne Verbund: ja
Reversibilität	nein	nein	mit Verbund: nein ohne Verbund: ja

3.2. Werkstoffe

In diesem Abschnitt werden die wichtigsten Eigenschaften der Werkstoffe, die bei einer Vorspannung Verwendung finden, diskutiert. Der erste Punkt befasst sich mit den Eigenschaften des Bestandsmauerwerks bei der Sanierung alter historischer Gebäude. Den zweiten Punkt bilden die möglichen Spanngliedmaterialien mit besonderem Schwerpunkt auf Aramidfasern, die auch bei den Versuchen eingesetzt wurden.

3.2.1. Mauerwerk – Bestandsmauerwerk

3.2.1.1. Allgemeines

Um gezielte Maßnahmen für eine Instandsetzung von historischem Mauerwerk setzen zu können, ist es notwendig die charakteristischen Eigenschaften des Bestandsmauerwerks zu kennen. Erst durch eine gezielte und gründliche Bestandserkundung bzw. Untersuchung der gemauerten Wandkonstruktion ist es möglich eine realistische Einschätzung der bestehenden Bausubstanz durchzuführen. Die Aufnahmen sollten grundsätzlich nach folgenden Schema ablaufen: [16][20][34]

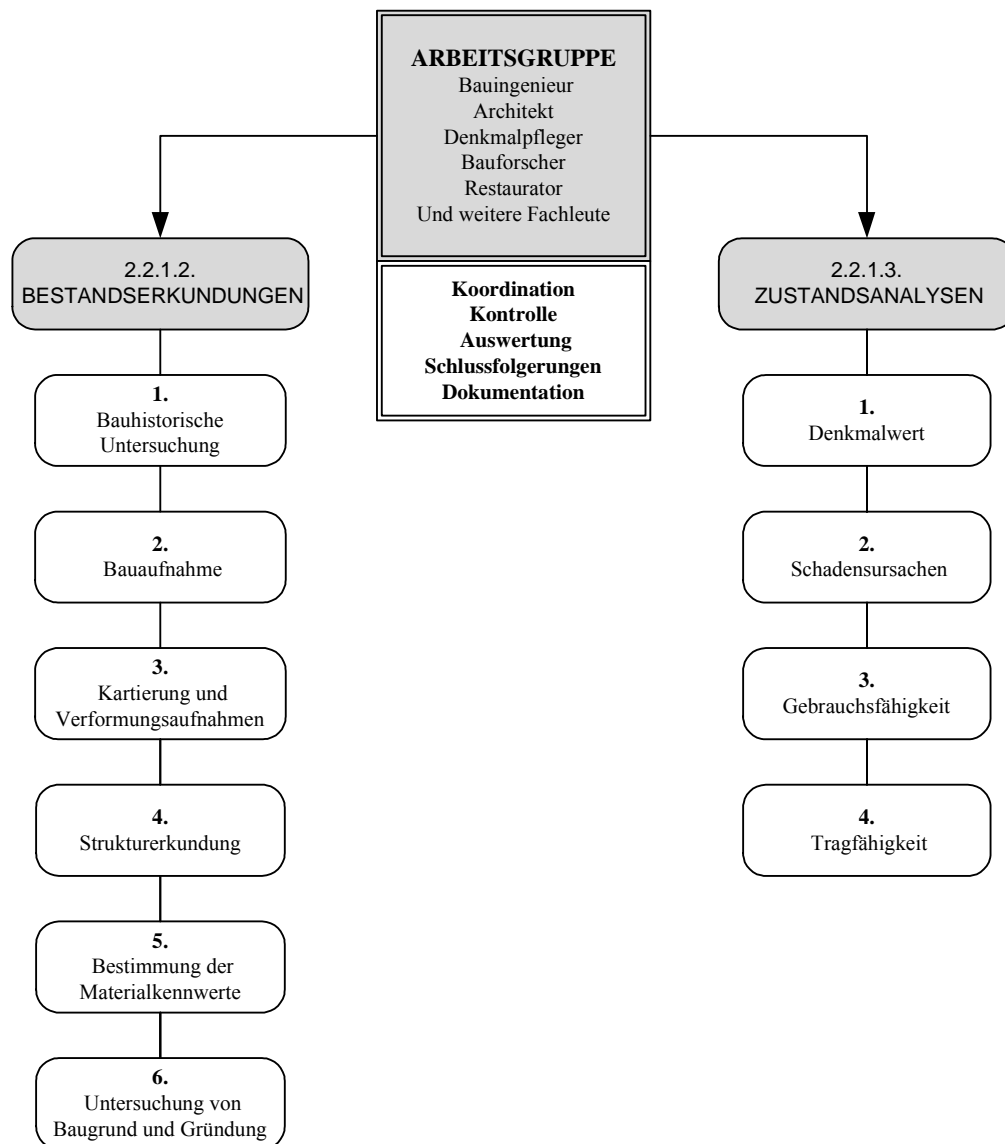


Abb. 3.1: Schema zur Organisation von Bestandserkundungen und Zustandsanalysen; (nach [34], Seite 6)

3.2.1.2. Bestandserkundungen

1. *Bauhistorische Untersuchung*

Darunter ist die Auswertung alter Bild- und Schriftdokumentationen über Bauphasen, Umbaumaßnahmen und früheren Schädigungen zu verstehen. Man kann die bauhistorische Untersuchung als eine Summe aller Erkenntnisse zur Vorgeschichte eines Bauwerks sehen, die so genannte Anamnese. Durch die Kenntnis der Vorgeschichte können Art und Umfang von Voruntersuchungen minimiert werden und dadurch Kosten eingespart werden. [20][34]

2. *Bauaufnahme*

Bei der Bauaufnahme werden die geometrischen Abmessungen der Konstruktion festgehalten. Dies geschieht je nach erforderlicher Genauigkeitsstufe mittels Handaufmass, geodätischer Vermessung, computergestütztes Aufmass, Photogrammetrie oder einer Kombination dieser Verfahren. Die Bauaufnahme ist Grundlage für alle weiteren Erkundungen und Untersuchungen. [34]

3. *Kartierungen und Verformungsaufnahmen*

Sind Risse, Verformungsmerkmale oder Gefügeänderungen zu erkennen müssen diese systematisch bei der Bestandserkundung erfasst und dokumentiert werden. Bei Bedarf muss auch die zeitliche Entwicklung einer Schädigung überwacht werden, um die Ursache und den Schadensprozess zuverlässig klären zu können.

- Risse und Gefügestörungen: Angabe der Rissbreiten; Informationen über die Gestalt der Risse; (Entstehung und Ursache von Rissen siehe Kapitel 3.2.1.8)
- Materialanomalien: Veränderung, welche über die normale Alterung hinausgehen, müssen kartiert werden, dies sind z.B. Abplatzungen, Absandungen, Ausblühungen, Verfärbungen
- Verformungen: Markante Durchbiegungen, Schiefstellungen oder Ausbauchungen von Bauteilen sollten im Bezug auf einen Normalzustand erfasst werden. Die möglichen Verfahren sind wie bei der Bauaufnahme: Handaufmass, geodätische Verfahren, computergestütztes Aufmass oder die Photogrammetrie. Aktuelle Überwachungen von Bauwerken erfolgen durch periodische Messungen mit den genannten Verfahren. [34]

4. *Strukturerkundung*

Es wird der innere Aufbau und Zustand des Mauerwerks untersucht. Methoden sind neben den gewöhnlichen Bohr- und Endoskopiemethoden neuere Techniken die eine zerstörungsfreie oder – arme Untersuchung möglich machen.

Zu diesen neuen Techniken gehören lt. [34] nachfolgende Methoden:

- Radar
- Geoelektrik
- Magnetik
- Infrarotthermographie
- Ultraschall
- Mikroseismik
- Feuchtemeßgeräte
- Kombinierte Verfahren

5. *Bestimmung der Materialkennwerte*

Im weiteren Bestandsaufnahmeablauf kann es jetzt notwendig werden an ausgewählten Stellen des Mauerwerks die mechanischen, physikalischen oder mineralogischen Eigenschaften zu bestimmen. Um diese Eigenschaften bestimmen zu können, müssen häufig Proben entnommen werden. Probenanzahl und Probengröße sind abhängig davon, welche Werte ermittelt werden müssen bzw. welche Schadensformen und Baustoffe untersucht werden.

Typische Probengrößen sind laut [20]:

- Bohrkern \varnothing 10cm, Länge \geq 12cm zur Ermittlung von Festigkeitswerten
- Bohrkern \varnothing 3cm, Länge \geq 5cm zur Beurteilung des Gefüges sowie zur Bestimmung des Feuchtegehaltes und des Salzgehaltes
- Bohrmehl 50 – 100g pro Probe zur Bestimmung des Feuchte- und Salzgehaltes

6. *Untersuchung von Baugrund und Gründung*

Die Ermittlung von Größe, Beschaffenheit und Aufbau eines Fundamentes kann durch Kernbohrung (vom Gelände oder Innenräumen aus) oder mit Schürfen zur Freilegung der Seitenflächen durchgeführt werden. Eine genaue Untersuchung des Baugrundes ist aufgrund des großen Schadenspotentials durch Setzungen von besonderer Bedeutung. [34]

3.2.1.3. *Zustandsanalysen [34]*

1. *Denkmalwert*

Entscheidend für weitere Analysen und Sanierungskonzepte ist die Frage des Denkmalwertes, d.h. in wie weit die historische Bausubstanz erhalten bleiben muss.

2. *Schadensursachen*

Die Schadensursachen festzustellen kann eine sehr schwierige Aufgabe werden, da es sich meist um sehr komplexe, räumlich und zeitlich abhängige Schadensmechanismen und Ursachen handelt. Wichtig im Zusammenhang mit den Schadensursachen sind die aktuelle Beobachtung und Verfolgung von Schadensentwicklungen durch die Verformungs- und Rissüberwachung.

3. *Gebrauchsfähigkeit*

Ganz allgemein sind die Anforderungen an die Gebrauchsfähigkeit von historischen Bauten nicht so hoch, als es bei Neubauten der Fall ist. Anforderungen an die Gebrauchsfähigkeit sind u.a. im Bereich des Wärme-, Schall-, Brand- und Feuchteschutzes.

4. *Tragfähigkeit*

Ist die Beanspruchung in allen Bauteilen mit ausreichender Sicherheit kleiner, als die Beanspruchbarkeit der Konstruktion, so gilt die Konstruktion als tragsicher.

3.2.1.4. *Materialeigenschaften der Komponenten*

Wie im vorangegangenen Kapitel erläutert, werden zur Beurteilung von Bestandsobjekten die Komponenten Mauerstein und Mörtel untersucht. Dabei kann zu Beginn auf Angaben von Materialeigenschaften zur Bauzeit zurückgegriffen werden, sofern solche vorhanden und als vertrauenswürdig einzustufen sind. Eine statistische Absicherung dieser Werte ist aber auf jeden Fall anzustreben.

Tab. 3.2 gibt einen ersten Anhaltspunkt über die Festigkeiten der Mauersteine für Bestandsmauerwerk (Bauzeit bis etwa 1918).

Tab. 3.2: *Festigkeitsangaben zu Mauersteinen um 1900, nach [16]*

Stein	Druckfestigkeit f_b [N/mm ²]	Druckfestigkeit f_z [N/mm ²]
Ziegel, gewöhnlich	6,0 - 12,0	1,0
Ziegel, gut	14,0 - 25,0	2,0
Handschlagziegel	15,0 - 30,0	2,5 - 5,0
Maschinziegel	20,5 - 23,0	
Wölbziegel	12,3	
Lochziegel	19,4	
Maschinlochziegel	15,0	
Poröse Vollziegel	15,0	
Poröse Wölbziegel	2,7	
Klinker	30,0 - 90,0	100

Im Denkmalpflegebereich wurden jedoch im überwiegenden Teil Natursteinmauerwerk oder Mischmauerwerk verwendet. Bei Natursteinen gibt es Anhaltspunkte über die mechanischen Festigkeiten, welche anhand der Abbauorte unterteilt werden. [16][17]

Beim Mauermörtel unterscheiden sich die Festigkeitsdaten der Bauzeit meist sehr deutlich von den Daten, die durch Probeversuche ermittelt werden. Dies ist auf mögliche Bindemittelauswaschungen durch Feuchtigkeitseinwirkung zurückzuführen. [16]

Bevor mit einer Sanierung im Altbaubereich begonnen wird, sollten auf jeden Fall durch Probeentnahmen die Komponentenfestigkeiten von Mörtel und Stein ermittelt werden.

3.2.1.5. Einwirkungen auf Mauerwerkskonstruktionen

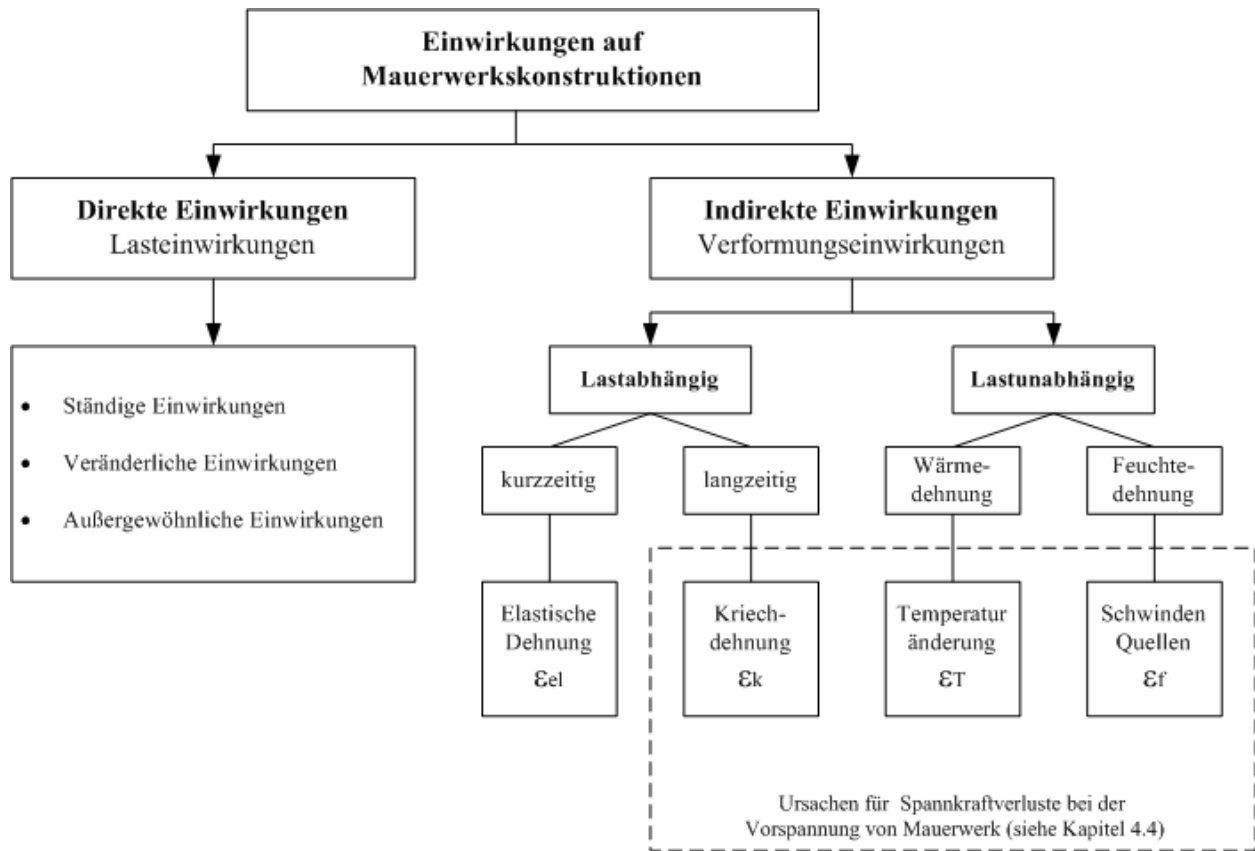


Abb. 3.2: Übersicht der Einwirkungen auf Mauerwerkskonstruktionen (nach [16], Seite 8 und [28], Seite 147)

Jede Verformung des Mauerwerks und des Spannstahles haben lt. [9] Einfluss auf die Spannkraft. Dabei kommt es zu Spannkraftänderungen, wobei in lastabhängige und lastunabhängige Verformungen zu unterscheiden ist (siehe Abb. 3.2).

Nachfolgend werden diese Formänderungen im Mauerwerk kurz beschrieben, eine Erläuterung im Bezug auf die Spannkraftverluste nach dem Vorspannen enthält das Kap. 4.4.

Lastabhängige Verformungseinwirkungen [1][28]:

Durch die Lasteinwirkungen (Eigenlasten, ständige Lasten, Verkehrslasten) entstehen Verformungen die je nach Dauer der Belastung (kurzzeitig – langfristig) unterschieden werden. Einflussfaktoren auf die lastabhängigen Verformungen sind die Höhe und die Dauer der Belastung sowie die Eigenschaften des Mauerwerks.

- Elastische Dehnung: entstehen sofort nach Lastaufbringung und sind nach Entlastung völlig reversibel.
- Kriechdehnung: die plastische Verformung des Mauerwerks unter andauernder Last über längere Zeit wird als Kriechen bezeichnet. Das Kriechen des Mauerwerks steigt zu Beginn deutlicher an und ist nach etwa 3 bis 5 Jahren unter annähernd konstanter Belastung und gleich bleibender Lufttemperatur und – feuchte abgeschlossen. Der Einfluss des Belastungsalters auf die Endkriechzahl φ_{∞} ist im Vergleich zum Beton klein, da sich die Festigkeit der Mauersteine nach der Herstellung im Werk kaum verändert. Rechenwerte für φ_{∞} sind in Tafelwerken enthalten und weisen zum Teil große Unterschiede je nach Steinart auf.

Lastunabhängige Verformungseinwirkungen [1][28]:

- Wärmedehnung: durch Änderung der Temperatur hervorgerufen; für den Temperaturverlauf im Wandquerschnitt sind die Wanddicke und die Wärmeleitfähigkeit bestimmend. Sonneneinstrahlung, Witterung, Nutzung (Klimaanlage, Heizung), transparenter Wärmedämmung, unterschiedlichen Farben auf einer Wand, unterschiedliche Herstellungstemperaturen und Brandeinwirkung führen zu unterschiedlichen Temperaturen in der Mauerwerkswand.
- Feuchtedehnung:
Darunter versteht man alle feuchtigkeitsbedingten Formänderungen; Volumenveränderungen (Schwinden und Quellen) und Dehnungen werden durch die Änderung des Feuchtegehaltes im Mauerwerk hervorgerufen. Größere Bedeutung hat dabei das Schwinden, weil es dadurch zu Zugspannungen im Mauerwerk kommt.
Einflussfaktoren auf die Größe und den zeitlichen Verlauf des Schwindens haben lt. [1][28] :
 - die Steinart
 - die Mörtelart (geringer Einfluss)
 - die Vorbehandlung der Mauersteine
 - der Feuchtegehalt beim Einbau
 - die Austrocknungsbedingungen: relative Luftfeuchte und Luftbewegung

3.2.1.6. Beanspruchbarkeit von Mauerwerk - Versagenskriterien

Einachsige Druckbeanspruchung

Einfluss auf die Druckfestigkeit haben lt. [1][14][28] :

- die Druck- und Zugfestigkeit des Mauersteines
- die Druckfestigkeit des Mauermörtels
- das Verformungsverhalten von Mauerstein und Mauermörtel
- der Feuchtegehalt der Mauersteine beim Vermauern
- die Dicke der Lagerfugen
- der Mauerwerksverband
- die Ausführungsqualität

Die Druckfestigkeit des Mauerwerks wird generell durch den einaxialen Druckversuch ermittelt. Die Methode der Druckfestigkeitsbestimmung von Mauerwerk wird aber nur in Ausnahmefällen verwendet. Dabei müsste ein prüffähiger Teil des Mauerwerks entfernt und in einer Prüfmaschine die Druckfestigkeit ermittelt werden. Durch den Ausbau und Transport des Mauerwerks muss man, aufgrund von Gefügeveränderungen, mit verfälschten Ergebnissen rechnen.

Eine Möglichkeit der direkten Bestimmung der Druckfestigkeit des Mauerwerks ist die Prüfung mit Flachpressen, so genannten „Flat Jacks“. Bei dieser Methode werden die Flachpressen parallel zueinander in freigeräumten Lagerfugen eingebracht. Anschließend wird das Mauerwerk in einen Druckspannungszustand versetzt. Eine weitere Möglichkeit der direkten Bestimmung wäre ein Belastungsversuch. Unter einer bestimmtem aufgebrachten Last wird nachgewiesen, ob das Mauerwerk diese ohne größere Veränderungen, wie Risse oder Verformungen, aufnehmen kann.

Die Formel (1) zeigt eine weitere Methode an, mit welcher die Druckfestigkeit bestimmt werden kann. Dabei müssten zuerst die Komponentenfestigkeiten der Mauerwerkssteine und des verwendeten Mörtels bestimmt werden. [17][34]

Laut Eurocode 6 ist die charakteristische Druckfestigkeit definiert als:

$$f_k = K * f_B^{0,75} * f_m^{0,25} \quad (1)$$

In der Gleichung (1) bedeutet:

- f_k = charakteristische Mauerwerksdruckfestigkeit
- K = Koeffizient für verschiedene Mauerwerksarten
- f_B = Steindruckfestigkeit
- f_m = Mörteldruckfestigkeit

Einachsige Zug- und Biegezugbeanspruchung

Wie bereits erwähnt ist die Zugfestigkeit im Vergleich zur Druckfestigkeit des Mauerwerks sehr gering. Vor allem bei Bauteilen mit geringen Auflasten ist ein gewisser Wert der Zug- bzw. Biegezugfestigkeit des Mauerwerkes erforderlich. Ist dies nicht der Fall kann es zu Rissbildungen kommen, da die Zug- und Biegezugspannungen nicht durch die Auflasten überdrückt werden.

Einfluss auf die Zugfestigkeit haben lt. [1][14][28]

- die Mauersteinzugfestigkeit
- die Verbundfestigkeit zwischen Mauermörtel und Mauerstein (Haftscherfestigkeit)
- die Art des Mauerwerksverbandes
- die Druckfestigkeit des Mauerwerks
- die gleichzeitige Wirkung einer Druckbeanspruchung senkrecht zur Lagerfuge
- Materialeigenschaften wie z.B. das Saugvermögen der Steine
- die Ausführungsqualität

Mithilfe von Grafiken, Erläuterungen und Formeln gibt Tab. 3.3 einen kurzen Überblick über die Versagenskriterien von Mauerwerk unter einachsiger Zug- und Biegezugbeanspruchung.

Tab. 3.3: Versagenskriterien von Mauerwerk für einachsige Beanspruchung nach [1] [28]

Beanspruchungsart		Bruchkriterium
Zentrische Zugfestigkeit	<p>a) Spannungen b) Versagen des Steins ① c) Versagen der Lagerfuge ②</p>	<p>① <u>Versagen des Steins</u> aus Gleichgewichtsgründen ist die aufnehmbare Zugspannung des Mauerwerks gleich der Hälfte der Steinzugfestigkeit</p> $f_Z = f_{ZSt} / 2$ <p>② <u>Versagen der Lagerfuge:</u> Bei Überschreitung der Scherfestigkeit löst sich der Verband; die maximal aufnehmbare Zugfestigkeit kann unter der Berücksichtigung des Gleichgewichts und des Coulombschen Reibungsgesetz erfolgen.</p> $f_Z = (c + \mu * \sigma_D) * \ddot{u} / h_{ST}$
		<p>Wird die Haftzugfestigkeit zwischen Stein und Mörtel überschritten so entsteht ein horizontaler Riss (Nr. 3 in der nebenstehenden Grafik) in der Lagerfuge und die Biegezugfestigkeit ist erreicht.</p> $f_{BZ\perp} = f_{HZ}$
Biegezugfestigkeit senkrecht zur Lagerfuge	<p>a) Versagen des Steins b) Versagen der Lagerfuge</p>	<p>a) <u>Versagen des Steins:</u> nach Grafik a.) kann die Biegezugfestigkeit f_{BZII} mit Hilfe der Mauerwerks – Zugfestigkeit σ_Z und dem Rissmoment m_y ermittelt werden.</p> $\sigma_Z = M / W = 6 * 2m_y / d^2$ $m_y = f_{BZ} * d^2 / 6$ $f_{BZII} = f_{ZSt} / 2$ <p>b) <u>Versagen der Lagerfuge:</u> Die Lagerfuge versagt, wenn die Steine eine höhere Zugfestigkeit besitzen. Durch die Momentenbeanspruchung entstehen Torsionsmomente in der Lagerfuge. Die Scherfestigkeit des Verbandes zwischen Mörtel und Stein leistet gegen die entstanden Torsionsmomente Widerstand.</p> $f_{BZI} = 1,26 * (c + \mu * \sigma_D) * \ddot{u} / h_{ST}$
		<p>Mit offenen Stoßfugen</p> <p>Mit offenen Stoßfugen</p>

Beanspruchungsart		Bruchkriterium
Biegezugfestigkeit parallel zur Lagerfuge mit vermörtelten Stoßfugen	<p style="text-align: center;">$2h_{St} + 2h_{Mö} \equiv 2h_{St}$</p>	<p>① <u>Versagen des Steins</u> In der nebenstehenden Grafik sind die aufnehmbaren Kräfte (D,Z) beim Steinversagen dargestellt. Die Biegezugfestigkeit ist um etwa 17% größer als bei unvermörtelten Stoßfugen.</p> <p>$f_{BZII} = 0,59 * f_{ZSt}$</p>
	<p style="text-align: center;"><i>äußere und innere Steinkräfte</i></p>	<p>② <u>Versagen der Verbandes:</u> Tritt auf wenn die Steine eine hohe Zugfestigkeit aufweisen, dadurch lösen sich die Steine im gerissenen Zustand aus dem Verband und es entstehen Torsionsmomente in der oberen und unteren Lagerfuge. Wird die maximale Schubspannung in der Lagerfuge überschritten so ist die Biegetragfähigkeit des Mauerwerks erreicht.</p> <p>$f_{BZII} = 1,65 * (c + \mu * \sigma_D) * \ddot{u} / h_{St}$</p>

Folgende Formelzeichen wurden in Tab. 3.3 verwendet:

- f_Z = Zugfestigkeit des Mauerwerks
- f_{ZSt} = Zugfestigkeit des Steins
- f_{HZ} = Zugfestigkeit zwischen Stein und Mörtel
- c = Kohäsion nach Tabelle der DIN 1053, T1
- μ = Reibungsbeiwert ($\mu=0,67$)
- \ddot{u} = Überbindemaß
- h_{St} = Steinhöhe ($h_{St} + h_{Mö}$)

Zweiachsige Beanspruchung

Nachfolgend werden kurz die drei wichtigsten Versagenskriterien für Mauerwerk unter zweiachsiger Beanspruchung erläutert. Diese drei wichtigsten Kriterien stammen lt. [1] von:

1. Page und Dhanasekar et al.
2. Mann / Müller
3. Ganz / Thürlimann

Ausgangsbasis für die drei Versagenskriterien sind die Mohr- Coulombschen Bruchbedingungen.

Zu 1.) Page und Dhanasekar et al

Page und Dhanasekar et al. befassten sich als erstes mit Versuche an Mauerwerksscheiben unter zweiachsiger Beanspruchung (Zug und Druckbeanspruchung). Dabei wurden die Versuche an Mauerwerksscheiben mit unterschiedlicher Lagerfugenneigung durchgeführt. Die Mauerwerksscheiben hatten eine Länge von 36cm und wurden aus vollen Ziegelsteinen mit dem Maßstab 1:2 hergestellt. Aus den Versuchsergebnissen entwickelten sie ein dreidimensionales Versagenskriterium (siehe Abb. 3.3 links unten), wobei an den Hauptachsen die Hauptspannungen σ_1 und σ_2 aufgetragen werden, sowie auf der dritten Achse der Beanspruchungswinkel θ . Für verschiedene Belastungskombinationen und unterschiedliche Neigungswinkel gibt es Versagenseinhüllende, wobei für den Winkel von 45° die Versagenseinhüllende symmetrisch ist ansonsten asymmetrisch. In Abb. 3.3 sind verschiedene Versagenseinhüllende abhängig vom Lagerfugenwinkel dargestellt.

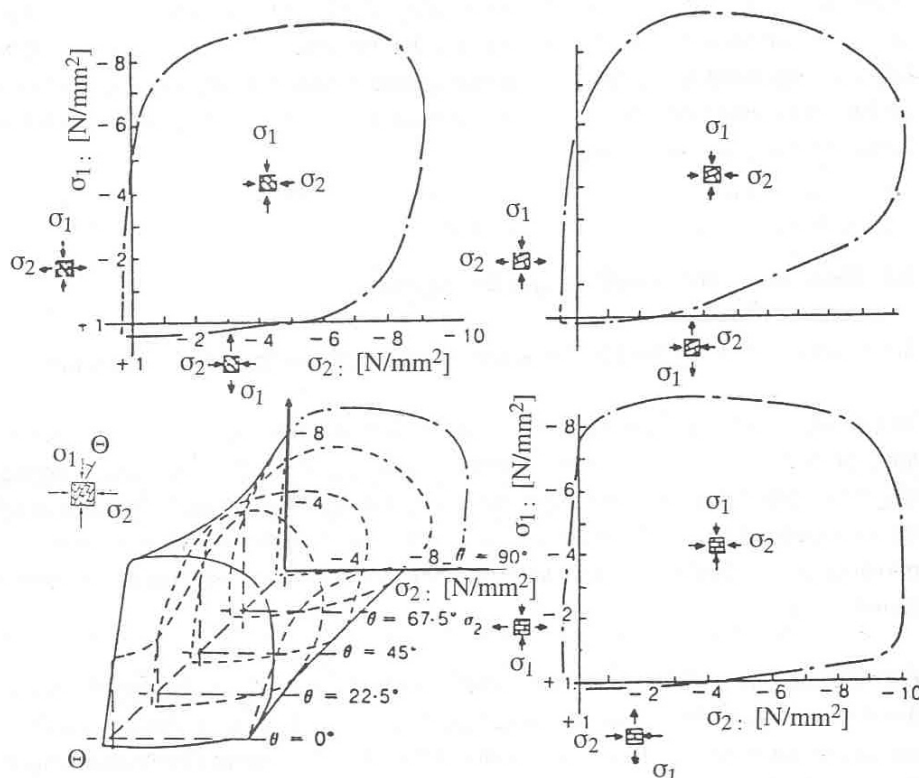


Abb. 3.3: Versagenseinhüllende für das Mauerwerk, [Dhanasekar et al., 1985] (aus [1], Seite 50)

Typische Rissbilder beim Versagen von Mauerwerk sind lt. [1]:

- **DRUCK – DRUCK – BEREICH**
Risse in der Mauerwerksebene parallel zur Scheibenmittelfläche
- **DRUCK – ZUG – BEREICH**
Risse senkrecht zur Scheibenebene durch die Steine und/oder die Fugen, meist senkrecht zu den Hauptzugspannungen und parallel zu den Hauptdruckspannungen
- **ZUG – ZUG – BEREICH:**
Trennrisse meistens in den Fugen; Verlauf abhängig vom Winkel und von der Beanspruchungskombination.

Zu 2.) Mann / Müller

Wesentliches Ergebnis der Arbeiten von Mann und Müller ist die Entwicklung der Hüllkurve für die Grenzen des Mauerwerksversagens.

In Abb. 3.4 sind die Grenzen des Mauerwerksversagens auf Schub in einem $\tau - \sigma$ - Diagramm dargestellt. Das Diagramm lässt sich in 3 Kernbereiche aufteilen:

- | | | |
|----------------------|---|--|
| a. geringe Auflast | ⇒ | FUGENVERSAGEN
die Lagerfuge versagt durch Abscheren; |
| b. hohe Auflast | ⇒ | STEINVERSAGEN AUF ZUG
aus der Überlagerung von Druck und Schubspannungen resultieren schiefe Hauptzugspannungen, welche bei überschreiten der Steinzugfestigkeit zum Bruch führen. |
| c. sehr hohe Auflast | ⇒ | MAUERWERKSVERSAGEN AUF DRUCK
Druckfestigkeit des Mauerwerks wird durch die maximale Hauptdruckspannung erreicht bzw. überschritten. |

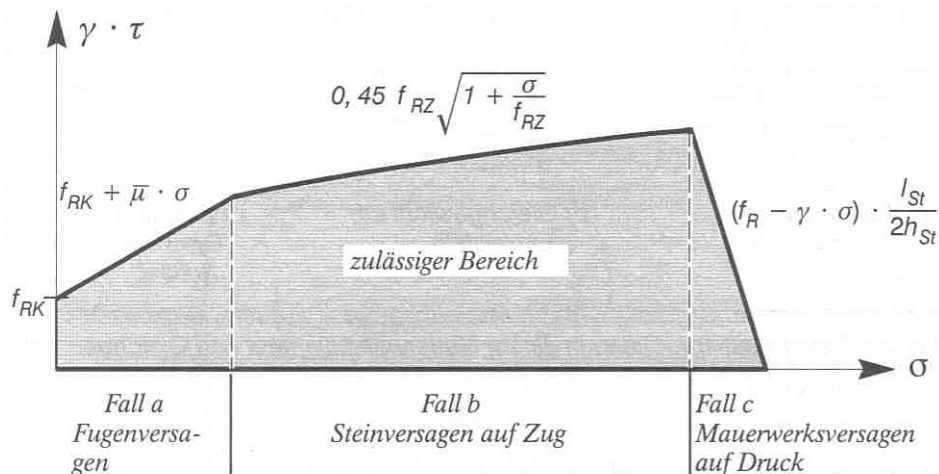


Abb. 3.4: Hüllkurve für die Schubtragfähigkeit von Mauerwerk nach DIN 1053 (aus [1], Seite 54)

Zu 3.) Ganz / Thürlimann

Aus ihren eigens durchgeführten Versuchen leiteten Ganz und Thürlimann Bruchbedingungen für zweiachsig beanspruchte Mauerwerksscheiben (mit und ohne Zugfestigkeit) ab. Die Versuche wurden an Mauerwerksscheiben, bestehend aus gelochten Ziegelsteinen, mit den Abmessungen $L=H=1,20\text{m}$ durchgeführt. Basis für die Bruchbedingungen bildet die Plastizitätstheorie und das starr-plastische Materialverhalten. Auch bei diesen Arbeiten wird die Neigung der Lagerfuge variiert. Die Abb. 3.5 zeigt einen Vergleich der beiden Versagensumhüllenden von den Untersuchungen von Dhanasekar und Ganz / Thürlimann.

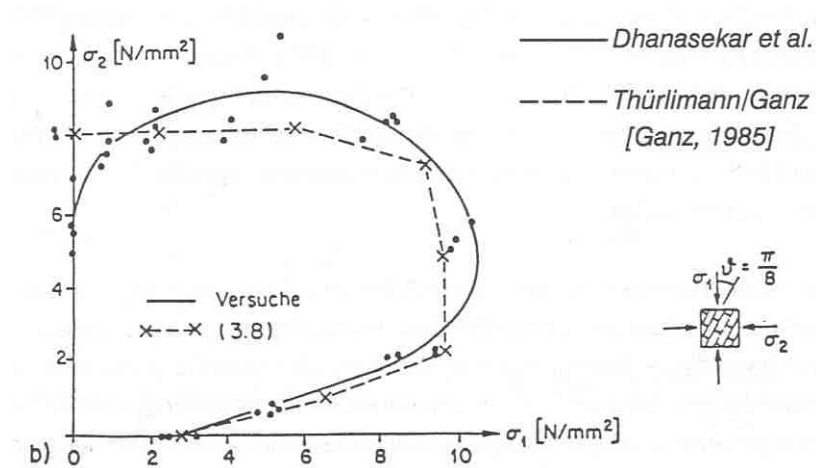


Abb. 3.5: Vergleich der Resultate von Dhanasekar und Thürlimann/Ganz für $\varphi = \pi/8$ (aus [1], Seite 52)

3.2.1.7. E – Modul von Mauerwerk

Der Elastizitätsmodul ist lt. [1] abhängig von:

- der Art der Beanspruchung (Druck oder Zug)
- der Belastungsrichtung (parallel oder senkrecht zur Lagerfuge)
- der Anisotropie des Mauerwerks

Definition des E- Moduls von Mauerwerk lt. DIN 1053 [28][17]:

Zur Bestimmung des Rechenwertes des E- Moduls E_{MW} von Mauerwerk ist der Sekantenmodul bei etwa 1/3 der Höchstspannung und der zugehörigen Gesamtdehnung $\text{ges } \varepsilon$ aus einmaliger Belastung heranzuziehen.

$$E_{MW} \equiv \frac{\max \sigma}{3 * \text{ges } \varepsilon} \quad (2)$$

Abb. 3.6 zeigt die grafische Darstellung für die Definition des E- Moduls von Mauerwerk.

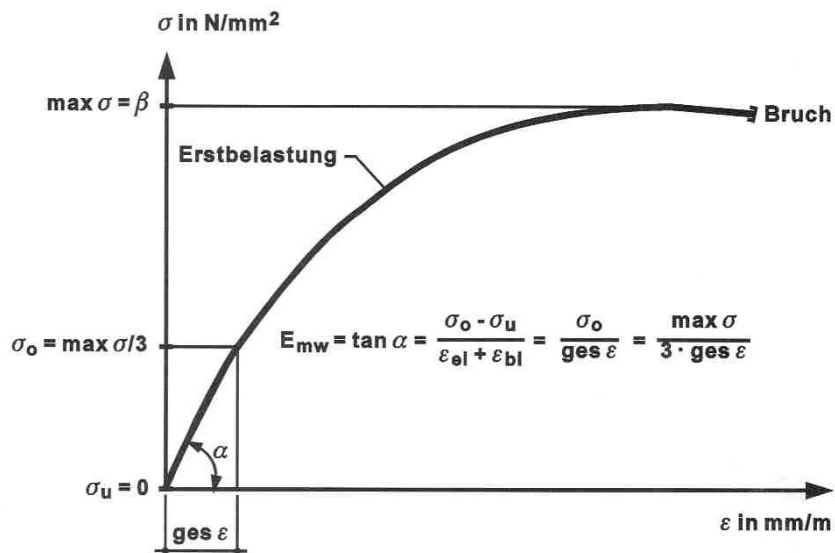


Abb. 3.6: Zur Definition des E-Moduls von Mauerwerk E_{MW} (aus [28], Seite 54)

3.2.1.8. Risse im Mauerwerk – Entstehung und Ursachen

Da die Vorspannung von Mauerwerk bei der Instandsetzung von historischem Mauerwerk vorwiegend zur Rissanierung eingesetzt wird, werden in diesem Abschnitt kurz die Rissursachen und die Entstehung der Risse beschrieben.

Die Hauptursache der Rissbildung im Mauerwerk ist die Überschreitung der geringen Zugfestigkeit des Mauerwerks bei Zwangsbeanspruchung. Mauerwerk ist ein relativ sprödes Material, dass nur sehr wenig Zugbeanspruchung aufnehmen kann. Zugzwänge führen demnach immer zu Rissen, weshalb die Forderung nach komplett ungerissenen Mauerwerkswänden sinnlos wäre. Die Ursache für Risse sind immer lastabhängige oder lastunabhängige Verformungen. [1]

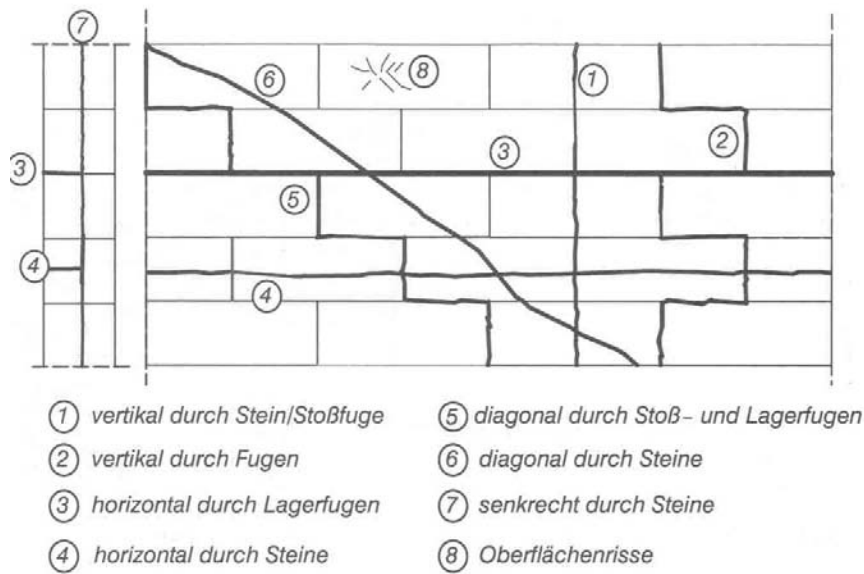


Abb. 3.7: Rissarten im Mauerwerk (schematisch) (aus [1], Seite 10)

Nachfolgend werden lt. [1] die Ursachen der unterschiedlichen Rissarten aus Abb. 3.7 angeführt:
 Rissnummer:

- 1.) zentrischen Zwang; Biegung parallel zur Lagerfuge
- 2.) zentrischen Zwang; Biegung parallel zur Lagerfuge
- 3.) zentrischen Zwang; Biegung senkrecht zur Lagerfuge; Horizontalschub;
- 4.) zentrischen Zwang; Biegung senkrecht zur Lagerfuge
- 5.) Schub infolge horizontaler Kräfte kombiniert mit Vertikalkräften;
- 6.) Schub infolge horizontaler Kräfte kombiniert mit Vertikalkräften;
- 7.) überhöhte Auflast auf einem Teilquerschnitt;
- 8.) Netzrisse; Eigenspannungen aus Temperatur und Schwinden; nur an oberflächennahen Schichten

3.2.2. Spannglieder

3.2.2.1. Allgemeines

Bei der Vorspannung von Mauerwerk werden noch zum überwiegenden Teil Spannglieder aus Stabstahl verwendet. Die herkömmliche Ausführung sind Spannglieder aus Stabstahl mit durchgehend aufgewalztem Gewinde (System Dywidag). In Tab. 3.4 sind Spannstähle mit ihren möglichen Abmessungen und der Stahlgüte angegeben, welche bei der Sicherung von Mauerwerk durch Vorspannung, Verwendung finden. Hauptsächlich wird Spannstahl der Güte 885/1080 und 835/1030 verwendet. Werden Stähle mit höherer Güte verwendet, müssen strengere Auflagen bei Herstellung und Montage berücksichtigt werden.

Tab. 3.4: Spannstähle zur Mauerwerksinstandsetzung (nach [34], Seite 100)

Art	Stabdurchmesser [mm]	Stahlgüte [N/mm ²]
Spannstähle mit durchlaufend aufgewalzten Gewinderippen z.B System Dywidag	15	885 / 1080
	26,5	835 / 1030
	32	835 / 1030
	36	1080 / 1230
Hochfeste korrosionsichere Stähle, glatt oder gerippt z.B Staifix	10	880 / 990
	12	850 / 980
	16	800 / 930
	20	790 / 900
	25	700 / 850
	32	630 / 790

Zunehmend werden jedoch auch Faserverbundwerkstoffe zur Vorspannung von Mauerwerk verwendet. Bei den Versuchen für diese Diplomarbeit wurden Aramidstäbe verwendet, weshalb auf eine detaillierte Beschreibung von Spanngliedern aus Spannstahl verzichtet wird. Aramid zählt zu den Faserverbundwerkstoffen, welche in Kapitel 3.2.2.2 näher behandelt werden. Es folgen Erläuterungen zum Aufbau von Faserverbundwerkstoffen bzw. eine Beschreibung der wichtigsten mechanischen Eigenschaften.

3.2.2.2. Faserverbundwerkstoffe – mit besonderer Berücksichtigung von Aramid

Aufbau von Faserverbundwerkstoffen nach [23]:

Das Prinzip von Faserverbundwerkstoffen ist die Kombination von mindestens zwei unterschiedlichen Werkstoff- Komponenten zu einem Verbundwerkstoff. Durch diese Kombination lassen sich die Gebrauchseigenschaften der Werkstoffe optimieren.

Die Verbundkunststoffe bestehen aus zwei grundlegenden Komponenten:

1. *Fasern*
2. *Matrix*

Zu 1.) Fasern

Durch die Fasern werden die Eigenschaften des Verbundwerkstoffes wesentlich beeinflusst. Dabei werden die mechanischen Eigenschaften im hohen Maße durch die Orientierung der Fasern geprägt.

Unterscheidung nach dem Fasermaterial:

- **Glasfasern**
Glasfasern wurden als erstes zur Verstärkung von Kunststoffen verwendet.
- **Fasern aus Kohlenstoff**
Wenn die Eigenschaften von Glasfasern nicht mehr ausreichen, werden Kohlenstofffasern verwendet. Ein Vorteil der Kohlenstofffasern ist der negative Wärmeausdehnungskoeffizient, der gemeinsam mit dem positiven des Matrixwerkstoffes, einen Baustoff ohne Wärmedehnung ergibt. Es wird in vier verschiedene Typen, je nach Kohlenstoffanteil und Art der Herstellung unterschieden:
 - **HT – Fasern (High Tenacity):**
waren als erste Fasern am Markt erhältlich; laut Abb. 3.8 liegen Festigkeit und Steifigkeit etwas über der des Stahles; günstiger Preis;
 - **HM – Fasern (High Modulus):**
Mehr als doppelt so hoher E- Modul als Stahl (Abb. 3.8); sind die teuersten Kohlenstofffasern; Nachteil: geringe Bruchdehnung
 - **HST – Fasern (High Strain and tenacity):**
E- Modul ähnlich wie bei den HT- Fasern, jedoch besitzen HST- Fasern eine wesentlich höhere Festigkeit und Bruchdehnung;
 - **IM – Fasern (intermediate modulus):**
Eigenschaftsbereich zwischen HST- Fasern und HM- Fasern;
- **Polymerfasern**
Hierbei handelt es sich um die Polyethylfasern und **Aramidfasern**. Wesentliche Eigenschaften sind der negative Wärmeausdehnungskoeffizient, welcher bei Polymerfasern noch geringer ist als bei den Fasern aus Kohlenstoff. Polymerfasern besitzen ein gutes Energieabsorptionsvermögen bei gleichzeitig geringer Dichte. Dadurch sind diese Fasern bei sehr leicht stoßbeanspruchten Bauteilen besonders gut geeignet.
Definition von **Aramidfasern** lt. [13]:
„Aramidfasern ($d_f \approx 10\mu\text{m}$) sind hochkristalline, organische Chemiefasern (aromatisierte Polyamide). Sie bestehen aus Makromolekülketten, die vorwiegend durch Wasserstoffbrücken quervernetzt sind. Dieser Aufbau führt zu ausgeprägter Anisotropie: hohe Zugfestigkeit in Kettenrichtung und eine vergleichsweise geringe quer dazu.“

Zu 2.) Matrix

Um die mechanischen Eigenschaften eines Verbundwerkstoffes zu erreichen, übernimmt die Matrix folgende Aufgaben:

- Fixierung der Fasern in der gewünschten geometrischen Anordnung
- Übertragung der Kräfte auf die Fasern
- Stützung der einzelnen Fasern bei Druckbeanspruchung (Stabilität gegen Knicken)
- Schutz der Fasern vor der Einwirkung von Umgebungsbedingungen (Feuchtigkeit, Chemikalien usw.)

Als Matrixsystem haben sich vor allem Reaktionsharze auf Basis ungesättigter Polyesterharze und Epoxidharze bewährt. Immer häufiger kommen Thermoplaste zum Einsatz, diese zeichnen sich durch eine hohe Dehnbarkeit und eine hohe Wärmeformbeständigkeit aus.

Wesentlich bei Verbundkunststoffen ist die Haftung der Fasern an der Matrix, um eine optimale Verstärkung zu erzielen. Die Eigenschaften eines Faserverbundwerkstoffes können also, als eine Kombination der Eigenschaften der Fasern mit der Matrix verstanden werden. Einflussfaktoren wie Matrixsystem, Fasersystem, Fasergehalt, Faserorientierung, Haftung der Faser an der Matrix, Verarbeitungsbedingungen und Beanspruchungsdauer wirken sich auf die Festigkeit eines Faserverbundwerkstoffes aus. [11]

Vorteile von Faserverbundwerkstoffen nach [13]:

Dem Nachteil der teuren Anschaffungskosten von Faserverbundwerkstoffen stehen einige Vorteile gegenüber, welche sind:

- hohe Zugfestigkeit und Elastizität (abhängig vom Fasergehalt)
- hohe Korrosionssicherheit
- geringe Dichte
- antimagnetisch, elektrisch nicht leitend (außer Kohlenstofffasern)

Eigenschaften von Faserverbundwerkstoffen

Festigkeiten und E- Modul

In der nachfolgenden Grafik (Abb. 3.8) lässt sich erkennen, dass reine Fasern deutlich höhere Festigkeiten besitzen als z.B. die Metalle Aluminium, Stahl und Titan. Kohlenstofffasern können einen weit höheren E- Modul erreichen als Stahl. Glas und Polymer- Fasern liegen mit ihrem E- Modul im Bereich des Stahles.

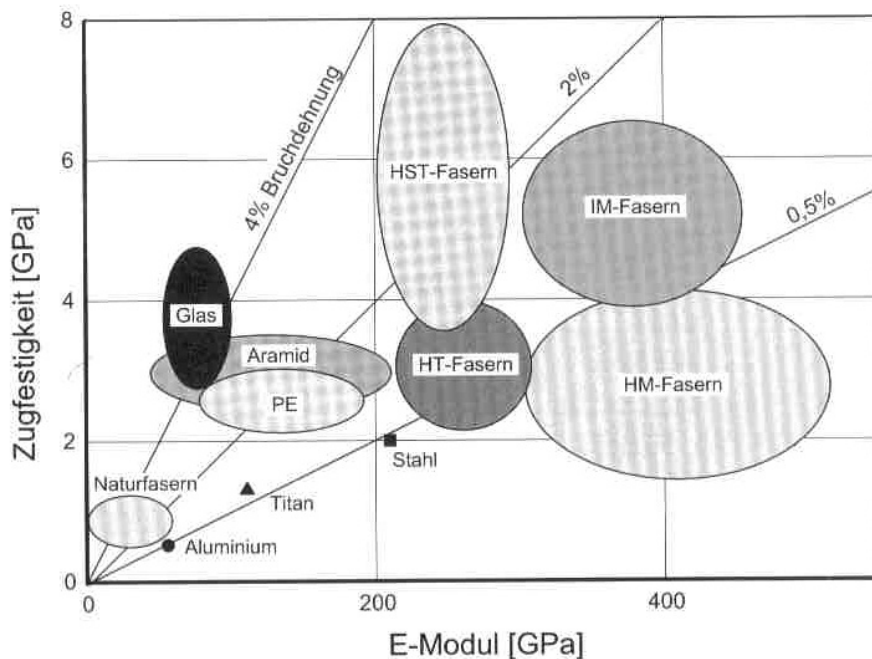


Abb. 3.8: Eigenschaften von Verstärkungsfasern und Metallen (aus [23], Seite 226)

In Tab. 3.5 wird ein wesentlicher Vorteil der Fasern, im Vergleich zu Stahl, deutlich. Die Fasern liegen mit ihrer Dichte bei ca. $\rho = 1,00 - 2,50 \text{ g/cm}^3$, wohingegen Stahl eine Dichte von $\rho = 7,85 \text{ g/cm}^3$ besitzt.

Tab. 3.5: *Eigenschaften verschiedener Fasern (aus [11], Seite 196)*

Faser	Dichte g/cm ³	Zugfestigkeit MPa	Elastizitäts- modul GPa
E-Glasfaser	2,52	2500	70
R-Glasfaser	2,54	3600	85
S-Glasfaser	2,49	4500	86
C-Faser HT-Typ	1,77	2700 bis 3500	220 bis 240
C-Faser HM-Typ	1,90	2000 bis 3200	350 bis 490
Aramidfaser Kevlar 29	1,44	2800 bis 3000	58 bis 80
Aramidfaser Kevlar 49	1,45	2700 bis 3000	130 bis 132
PE-Faser (Dyneema SK60 von DSM)	0,97	2600 bis 3300	87

Elastizitätsmodul:

Der E- Modul des Faserverbundwerkstoffes ergibt sich als eine Linearkombination aus dem E- Modul der Fasern und dem E- Modul der Matrix. In der Tab. 3.6 wird der deutliche Unterschied zwischen dem E- Modul der Fasern zum E- Modul der Matrix veranschaulicht.

Tab. 3.6: *Vergleich der E – Module der Fasern mit den E – Modulen der Matrix (nach [2], [11])*

MATERIAL	E - MODUL [GPa]
Fasern aus	
Kohlenstoff	220 - 490
Glas	70 - 86
Aramid (Kevlar)	58 - 132
Matrix aus	
Epoxidharz	2,1 - 5,5
Polyesterharz	1,3 - 4,5

Die Formel (3) nach [2] gibt den E- Modul des Faserverbundwerkstoffes für die Faserrichtung an:

$$E_{VII} = V_F * E_F + (1 - V_F) * E_M \quad (3)$$

Die Formel (4) nach [2] gibt den E- Modul des Faserverbundwerkstoffes quer zur Faserrichtung an:

$$E_{V \perp} = \left\{ \frac{V_F}{E_F} + \frac{(1 - V_F)}{E_M} \right\}^{-1} \quad (4)$$

V_F Volumenanteil der Fasern

E_F E- Modul der Fasern

E_M E- Modul der Matrix

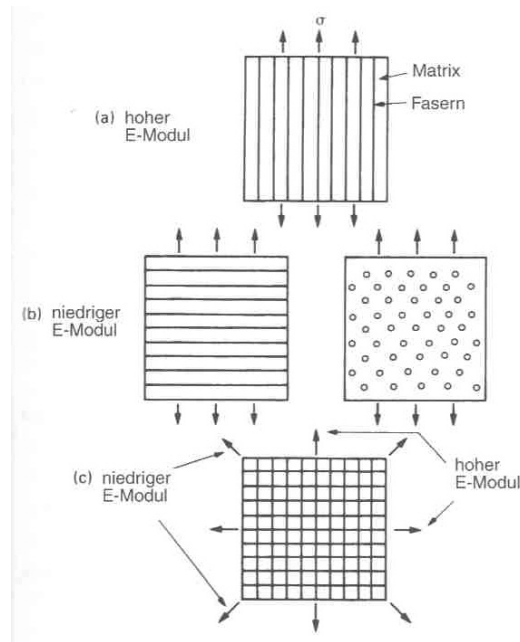


Abb. 3.9: E-Modul von Faserverbundwerkstoffen (aus [2], Seite 223)

Abb. 3.9 verdeutlicht, bei welcher Belastungsrichtung ein hoher E-Modul des Faserverbundwerkstoffes auftritt. Wird der Faserverbundwerkstoff oder auch ein Teilchenverbundwerkstoff quer zur Faserrichtung belastet, ist der E-Modul wesentlich geringer, als wenn dieser in Längsrichtung belastet wird. Bei einer orthogonalen Anordnung der Fasern werden Vorzugsrichtungen für einen hohen E-Modul bzw. einen niedrigen E-Modul deutlich.

Tab. 3.7: Eigenschaften von Verbundwerkstoffen im Vergleich zu Metallen (nach [2], Seite 223)

MATERIAL	Dichte ρ [t/m ³]	E - MODUL [GPa]	Festigkeit R _p [GPa]
Verbundwerkstoffe			
CFK, 58 % uniaxiale Kohlenstofffasern in Epoxidharz	1,5	189	1050
GFK, 50 % uniaxiale Glasfasern in Polyester	2,0	48	1240
Kevlar-Epoxidharz (KFK), 60 % uniaxiale Kevlarfasern in Epoxidharz	1,4	76	1240
Metalle			
hochfester Stahl	7,8	207	1000
Aluminiumlegierung	2,8	71	500

In Tab. 3.7 sind exemplarisch die mechanischen Eigenschaften von drei möglichen Verbundwerkstoffen angegeben. Natürlich gibt es eine Vielzahl von Möglichkeiten und Alternativen dieser Verbundwerkstoffe. Es ist daher immer notwendig, die Firmenangaben der verwendeten Materialien zu beachten. Die Werte aus Tab. 3.7 geben lediglich Richtwerte an, in welchen Bereich sich Dichte und E-Modul von Verbundwerkstoffen im Vergleich zu Stahl bewegen.

Zeitstandverhalten nach [13]:

Unter der Zeitstandfestigkeit versteht man die Zeitspanne, welcher ein Werkstoff unter gleich bleibender Belastung, bruchfrei ertragen kann. Man kann die Belastung als Bruchteil der Kurzzeitbruchlast angeben. Kohlenstofffaserverbundwerkstoffe besitzen ein besseres Zeitstandsverhalten als Verbundwerkstoffe mit Aramidfasern oder Glasfasern. Bei Aramidfaserverbundwerkstoffen liegt die, auf 50 Jahre extrapolierte, Zeitstandfestigkeit laut Untersuchungen bei etwa 70 % der Kurzzeitfestigkeit.

dynamisches Verhalten:

Aus Abb. 3.10 wird deutlich, dass Aramid- und Kohlenstoffverstärkungen eine wesentlich kleinere Festigkeitsabnahme bei schwingender Belastung aufweisen als Glasfaserverstärkungen oder unverstärktes Epoxidharz. Die Schwingfestigkeit der Aramid- und Kohlenstoffverstärkungen liegen im vergleichbaren Bereich von Spannstahl, wobei Kohlenstoffverstärkungen auch einen höheren Wert erreichen können. (wurde lt. [13] in japanischen Versuchen demonstriert)

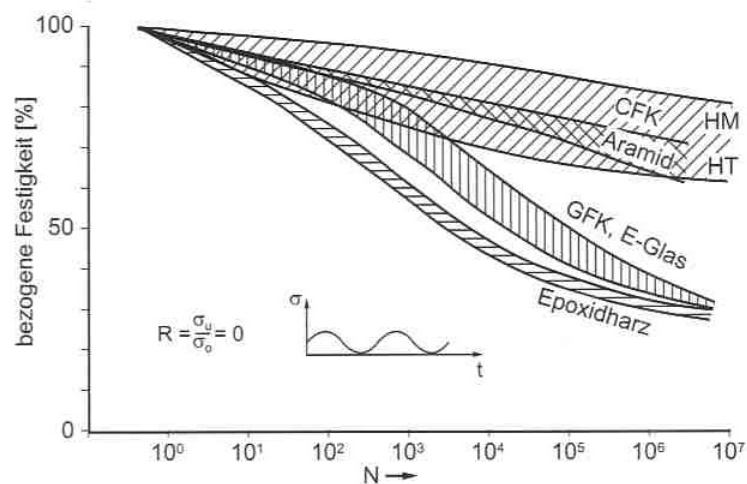


Abb. 3.10: Ermüdungsfestigkeit bei Schwellbeanspruchung (aus [23], Seite 233)

Relaxation nach [13]:

Polymere Matrixmaterialien und Aramidfasern verhalten sich viskoelastisch, wohingegen Glas und Kohlenstofffasern praktisch gar nicht kriechen oder relaxieren. Aramidfaserverbundwerkstoffe können einen bis zu vier- bis fünffachen Spannungsverlust im Vergleich zu Spannstahl aufweisen.

Zum Abschluss werden noch einige Punkte lt. [13] zur Dauerhaftigkeit von Aramidfaserverbundwerkstoffen angegeben:

- Aramidfaserverbundwerkstoffe verlieren in alkalischer Umgebung einen Teil ihrer Festigkeit.
- Aramidfasern können Wassermoleküle in ihrem Gefüge anlagern, dadurch kann es zu Quellerscheinungen kommen.
- Aramidfasern sind lichtempfindlich; sie dürfen nicht langfristig der UV-Strahlung ausgesetzt werden.

Die genauen Firmenangaben zu den, bei den Versuchen an der TU- Wien, verwendeten Aramidstäben sind in der Versuchsdokumentation in Kap. 5.3.2 in der Tab. 5.4 zusammengefasst.

3.3. Vorspannung von historischem Mauerwerk

3.3.1. Allgemeines

Nachdem in dem Kapitel 3.1 kurz die gängigen Sicherungstechniken aus denkmalpflegerischer Sicht (Injizieren, Vernadeln, *Vorspannen*) und im Kapitel 3.2 die Eigenschaften des Bestandsmauerwerks und der Spannglieder behandelt wurden, widmet sich das nachfolgende Kapitel explizit der Vorspanntechnologie bei historischem Mauerwerk. Dafür soll Abb. 3.11 einen kurzen Überblick über die mögliche Klassifizierung bei vorgespanntem Mauerwerk geben.

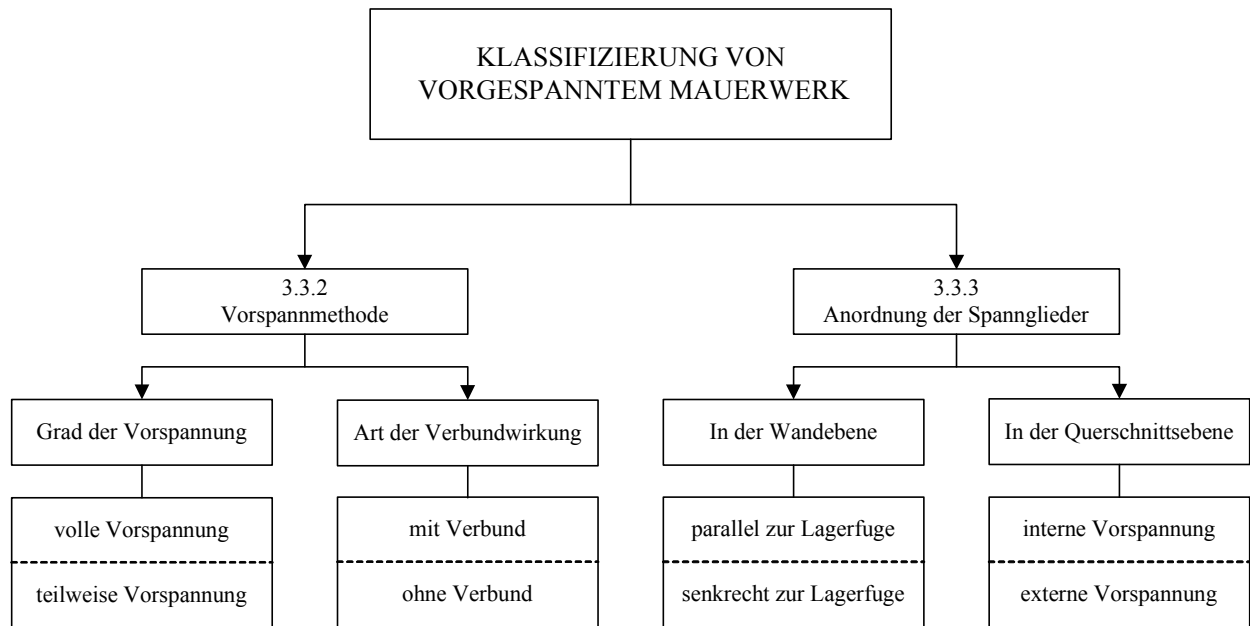


Abb. 3.11: Klassifizierung von vorgespanntem Mauerwerk

3.3.2. Vorspannmethoden

Wie in Abb. 3.11 zu erkennen ist, kann man bei vorgespannten Mauerwerk Klassifizierungen nach dem Grad der Vorspannung und der Art der Verbundwirkung vornehmen.

3.3.2.1. Grad der Vorspannung

In Kap. 2.2.1 wurden bereits kurz die Begriffe „volle“ und „teilweise“ Vorspannung im Bezug auf Spannbeton erläutert. Nun werden diese Begriffe für die Vorspannung von Mauerwerk erläutert.

Volle Vorspannung:

Im Gebrauchslastenzustand treten im Mauerwerk keine Risse auf.

Teilweise Vorspannung

Es muss mit Rissbildung gerechnet werden, da im Mauerwerk Zugspannungen auftreten, welche die Zugfestigkeit überschreiten können.

3.3.2.2. *Art der Verbundwirkung*

Bei der Vorspannung von Mauerwerk können die Spannglieder mit oder ohne Verbund im Mauerwerk geführt werden. Beim Einsatz der Vorspannung zur Sicherung von historischem Mauerwerk wird üblicherweise eine Vorspannung mit nachträglichem Verbund eingesetzt. Die schubfeste Verbindung wird durch das Ausinjizieren des Bohrloches oder des Hüllrohres nach dem Vorspannen hergestellt. [34] In der Arbeit von Nietzold [25] werden Untersuchungen durchgeführt, inwieweit auf die Verbundwirkung zwischen Spannglied und Mauerwerk verzichtet werden kann. Diese Erkenntnisse fließen in den nachfolgenden Erläuterungen der Vorspannung mit oder ohne Verbund ein.

Vorspannung mit Verbund:

Gibt es große Schäden am historischen Mauerwerk, sodass große Vorspannkräfte erforderlich sind, muss die Vorspannung mit Verbund gewählt werden. Durch diese Vorspannung mit nachträglichem Verbund wird eine umfangreiche Mauerwerksvergütung erreicht.

Weitere Vorteile neben der Mauerwerksvergütung sind lt. [34] :

- ein zuverlässiger Korrosionsschutz: dieser wird durch Einbau von Abstandhalter, welche eine ausreichende Zementumhüllung gewährleisten, erreicht.
- Tragverhalten bei ungünstig wirkenden äußeren Verformungen: Durch eine gleichmäßige Einleitung der zusätzlichen Spannungen in das Mauerwerk, kommt es zu keiner Kraftkonzentrierung in den Einleitungsbereichen der Endverankerung und damit zu einer Erhöhung der Sicherheit gegen schlagartiges Versagen der Endverankerungen.

Vorspannung ohne Verbund:

Diese Methode wird bei geringen Vorspannkräften angewendet, welche z.B. bei der konstruktiven Rissesicherung erforderlich sind. Das Spannglied wird bei dieser Methode frei im Bohrloch bzw. im Hüllrohr geführt. Eine Vergütung der Mauerwerks ist nur mehr in den Krafteinleitungszonen notwendig.

Wesentliche Vorteile der Vorspannung ohne Verbund sind lt. [34] :

- Die Kontrollierbarkeit der Ankerkraft
- Möglichkeit des Auswechslens bzw. des Nachspannens der Ankerglieder

Zu Berücksichtigen ist jedoch, dass eine periodische Überwachung der Spannglieder erforderlich ist. Weiters muss der Korrosionsschutz sichergestellt werden, dies geschieht durch Einfetten oder Abdecken mit Korrosionsschutzmasse innerhalb des Hüllrohres.

3.3.3. Spanngliedführung

Bei der Anordnung der Spannglieder lässt es sich lt. Abb. 3.11 in die Spanngliedführung in der Wandebene und in der Querschnittsebene unterscheiden.

3.3.3.1. Anordnung der Spannglieder in der Wandebene:

Parallel zur Lagerfuge

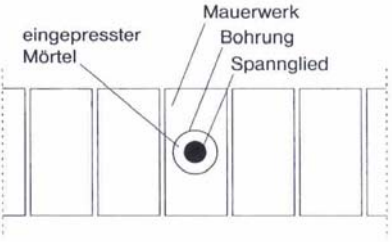
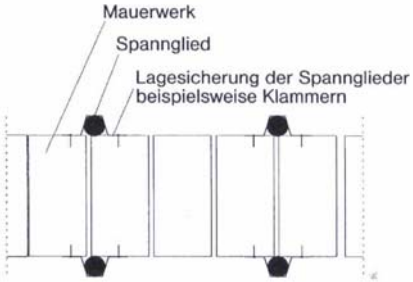
Üblicherweise wird diese Art der Vorspannung angewendet, wenn es darum geht vertikale oder schräg verlaufende Risse zu sanieren. Die horizontalen Spannglieder werden mittig in der Wand eingebracht um eine gleichmäßig verteilte Druckspannung über die Wanddicke zu erzeugen. Diese Vorspannkräfte wirken senkrecht zu den vertikalen Auflasten, was keine Verminderung der Tragfähigkeit für Nutzlasten bedeutet. Für die Rissicherung wirkt sich der entstehende zweiachsige Spannungszustand besonders günstig aus, da die Gefahr von Querspannungen, welche zu Rissen führen, herabgesetzt wird. [9][32]

Senkrecht zur Lagerfuge

Bei dieser Art der Vorspannung werden die Vorspannkkräfte vertikal zur Lagerfuge eingeleitet und überlagern sich dadurch mit den vertikalen Auflasten. Verwendung findet diese Art der Vorspannung zur Überdrückung von Exzentrizitäten bei der Lastableitung. Durch vertikale Vorspannung kann, bei Mauerwerk mit geringer Auflast, die Standsicherheit gegenüber horizontaler Krafteinwirkung, wie Wind oder Erdbebenbeanspruchung, erhöht werden. Durch die Überlagerung der vertikalen Spannkkräfte mit den Normalkräften im Bauteil ist ein Nachweis der Stabilität erforderlich. [9][32]

3.3.3.2. Anordnung der Spannglieder in der Querschnittsebene

Tab. 3.8: Anordnung der Spannglieder in der Querschnittsebene (Abbildung aus [24], Seite 201)

Spanngliedführung innerhalb des Querschnittes	Spanngliedführung außerhalb des Querschnittes
<p>Beispiel eines internen Spanngliedes bei einer vertikalen Vorspannung</p> 	<p>Beispiel mit externen Spanngliedern bei einer vertikalen Vorspannung</p> 
<p>Vorteile / Nachteile / Gegenüberstellung [8], [9]</p> <ul style="list-style-type: none"> • Brandschutztechnische Vorteile • Aus ästhetischen Gründen bevorzugt • Denkmalpflege: nur die Verankerungen sind sichtbar • Schutz der Spannglieder vor thermischen Einwirkungen • Die Spannkrafteinleitung ins Mauerwerk ist technisch einfacher herzustellen als bei der externen Vorspannung • Der Einpressmörtel dient der Herstellung des Verbundes und ist gleichzeitig Korrosionsschutz • Das Ausknicken der Wand wird verhindert, weil sich das Mauerwerk gegen das angespannte Spannglied abstützt. 	<p>Vorteile / Nachteile / Gegenüberstellung [8], [9]</p> <ul style="list-style-type: none"> • Spannglieder sind jederzeit zugänglich • Spannglieder können leicht nachgespannt werden • Korrosionsschutz muss durch geeignete Umhüllungen sicher gestellt werden. • Für eine mittige Krafteinleitung sind zwei Spannglieder erforderlich, die im Verankerungsbereich über eine Traverse verbunden werden müssen • Externe Spannglieder sind optisch mit ihren Schutzhüllungen eher unerwünscht

3.3.4. Wichtige Aspekte bei der Herstellung einer Vorspannung

Nachfolgend werden wichtige Punkte des Herstellungsprozesses bei einer Vorspannung von Mauerwerk beschrieben. Es handelt sich dabei lediglich um allgemeine Gesichtspunkte, die sich hauptsächlich auf die Vorspannung von Mauerwerk mittels Spannstahl beziehen.

3.3.4.1. Bauaufnahme

Zentraler Punkt bevor eine Vorspannung von Mauerwerk durchgeführt werden kann, ist eine detaillierte Bauaufnahme mit einer anschließenden maßgenauen Bauausführung. Dem Punkt der Bauaufnahme wird meistens eine nicht ausreichende Genauigkeit bzw. Wichtigkeit beigemessen, was nach einer durchgeführten Sanierung mittels Vorspannung zu neuerlichen Schäden führen kann. Die Möglichkeiten und Vorgangsweisen bei der Bauaufnahme wurden bereits im Kap. 3.2.1.2 Bestandserkundungen von Mauerwerk dargestellt.

In diesem Abschnitt werden anhand grafischer Beispiele zwei mögliche, schädliche Ausführungsfehler erläutert. Natürlich kann es auch zu einer Überlagerung mehrerer Fehler kommen, wodurch größere Schäden zu erwarten sind. [30]

BEISPIEL 1:

Das erste Beispiel zeigt deutlich, dass ein genaues Aufmass der Bestandskonstruktionen von besonderer Bedeutung ist, um nach der Vorspannmaßnahme nicht neuerliche, evtl. auch größere, Schäden zu erhalten.

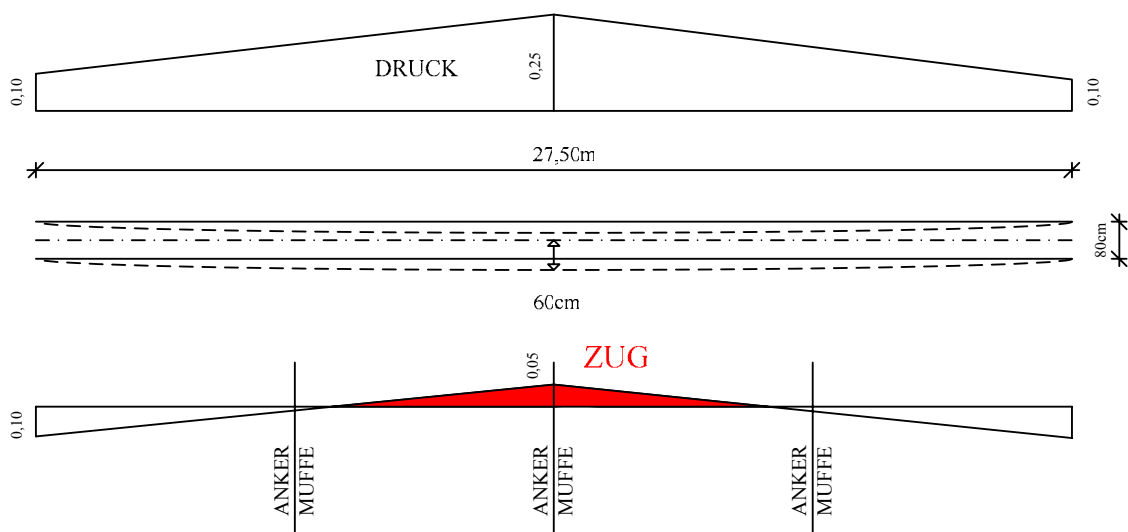


Abb. 3.12: Beispiel einer Vorspannung in Mauerachse (nach [30], Seite 120)

Im ersten Beispiel (Abb. 3.12) sollte ein 80cm starkes, gerissenes Mauerwerk eines Kirchenschiffes horizontal vorgespannt werden. Der Spannanker sollte über die Länge des Kirchenschiffes (27,50m) eingebracht und vorgespannt werden. Die Vorspannkraft sollte so gewählt werden, dass eine horizontale Mauerwerkspressung von 0,1 N/mm² im geringsten Mauerquerschnitt, oberhalb der Fensterscheitel erreicht wird. Auf eine detaillierte Bauwerksvermessung wurde vor Bauausführung verzichtet. Das Bohrloch wurde in Mauerachse geteuft.

Der Umstand dass aus einbautechnischen Gründen der Anker in 4 Einzelstücke getrennt wurde und mit Muffen gestoßen werden sollte, erwies sich für die Kontrolle des Bohrlochverlaufes als äußerst günstig. Es wurde eine Abstand zwischen Bohrgestänge und Mauerwerksflucht von über 60cm gemessen. Als erste Vermutung wurde eine Abweichung der Bohrlochachse von der Sollachse angenommen. Doch genauere Messungen zeigten eine vorhandene Ausbauchung des Mauerwerks. Wäre nun das Mauerwerk

mit den geplanten 120 kN vorgespannt worden, so wären zusätzliche Zugspannungen von $0,05 \text{ N/mm}^2$ im Bereich der Maueraußenschalen entstanden.

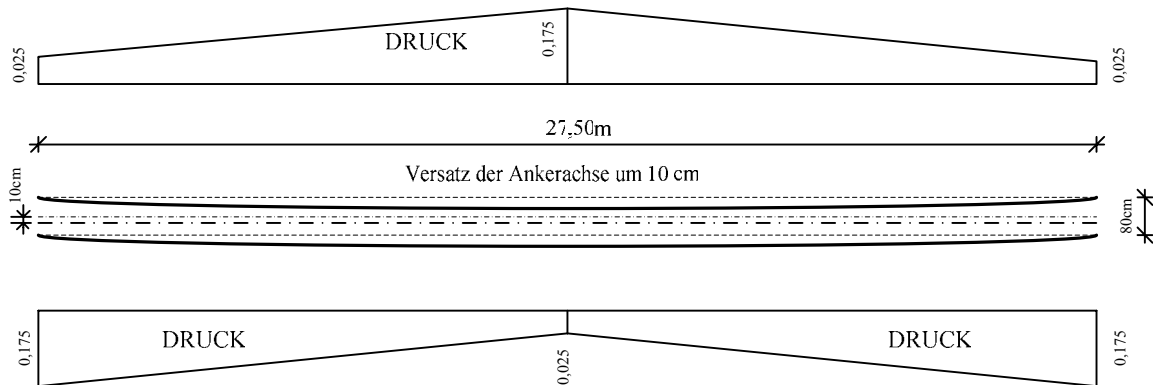


Abb. 3.13: Korrekturmaßnahme: Versatz der Ankerachse um 10cm (nach [30], Seite 120)

Die Korrekturmaßnahme zeigt Abb. 3.13, wobei das alte Bohrloch verpresst wurde und ein neues Bohrloch, 10 cm versetzt, hergestellt wurde. Damit wurde erreicht, dass in keinem Abschnitt des Mauerwerks Zugspannungen durch die Vorspannung entstanden.

BEISPIEL 2:

Im zweiten Beispiel wird deutlich, dass bei nur geringen Bohrlochabweichungen schädliche Zugspannungen im Mauerwerk entstehen können.

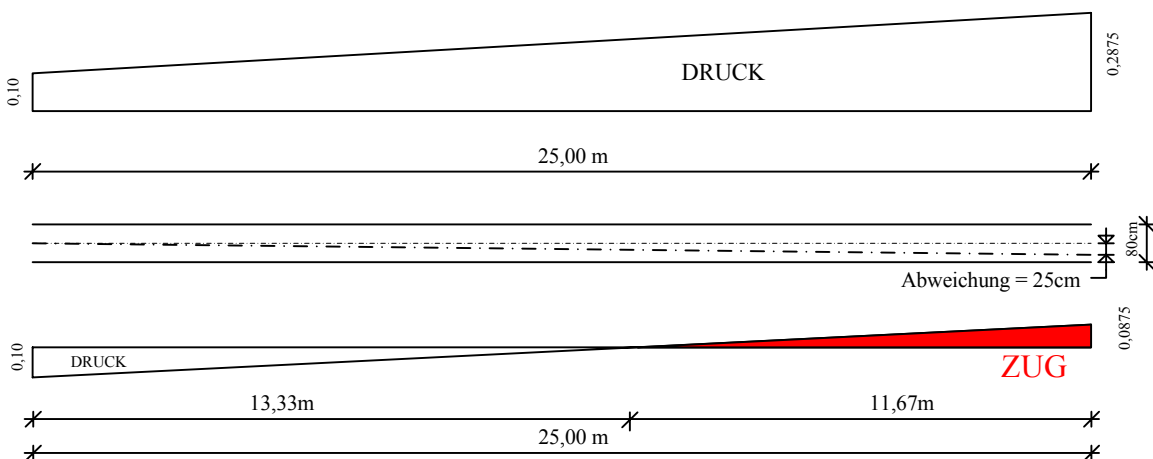


Abb. 3.14: Verlauf der Randspannungen im Mauerwerk bei einer Bohrlochabweichung von 1% von der Sollachse (nach [30], Seite 124)

Abb. 3.14 zeigt eine Bohrlochabweichung von nur 1 % von der Sollachse. Die Vorspannkraft betrug $0,12 \text{ MN}$. Durch die Abweichung von der Sollachse entstehen schädigende Zugspannungen im Mauerwerk.

3.3.4.2. Herstellung der Bohrlöcher

Die beiden wesentlichen Faktoren für die Auswahl einer Bohrmethode sind:

- Bohrtechnische Faktoren
- Denkmalpflegerische Faktoren

Zu den denkmalpflegerischen Faktoren gehört vor allem der Substanzverlust, der durch das Bohrloch selbst oder durch das Ausspülen beim Nassbohrverfahren entsteht. Durch die Wassermengen beim Nassbohrverfahren besteht neben den Ausschwemmungen auch ein gewisses Risiko von chemischen Reaktionen im Mauerwerk. Abdichtungen des Mauerwerks müssen vor allem dort hergestellt werden, wenn es sich um denkmalpflegerisch zu schützende Oberflächen handelt. Es kann zwar durch gewisse Vorkehrungen (gezielte Wasserabfuhr, Schutz durch Folien) der Verschmutzungsgrad durch die Bohrtechnik gemindert werden, jedoch wird es nie völlig ausgeschlossen sein. [34]

Für die Planung der Bohrarbeiten bzw. die Auswahl der geeigneten Bohrmethode muss der Zustand des Mauerwerks bekannt sein. Diese Erfassung der wichtigsten Kenndaten sollte, wie in Kap. 3.2.1.2 beschrieben, während der Bestandserkundung des historischen Mauerwerks erfolgen.

Zu diesen wichtigen Kenndaten des Mauerwerks gehören lt. [34] :

- Daten über den Mauerwerksverband
- Hohlraumvolumen des Mauerwerks
- Gesteinsmaterial
- Gesteinsfestigkeit
- Mörtelaufbau

Der Bohrlochdurchmesser selbst ist lt. [34] abhängig von:

- dem Durchmesser der Spannglieder
- der zu erreichenden Verbundwirkung
- dem erforderlichen Korrosionsschutz

Bei den, dieser Arbeit zugrunde liegenden, Versuchen wurde ein Bohrlochdurchmesser von 50mm gewählt.

Wie in Kap. 3.3.4.1 erläutert wurde, ist eine zielgerechte Bohrung mit minimaler Abweichung von der Sollachse notwendig, um schädliche Kräfte im Mauerwerk zu verhindern. Es sollten daher auch stets Kontrollöffnungen, z.B. an Koppelstellen von Spanngliedern, hergestellt werden, um den Verlauf der Bohrung kontrollieren zu können. Gut geeignet ist Mauerwerk, das vor der Kernbohrung verpresst wurde. Es ist dadurch ein erhöhte Homogenität des Mauerwerks zu erwarten, was in der Regel bedeutet, dass man einen standfesten Bohrkanal vorfinden wird. Außerdem sollten nur in standfeste Bohrkanäle Spannglieder eingebracht werden, was öfters zu Ausinjizieren des Bohrkanals führt, welcher nach Erhärten wieder aufgebohrt wird.

3.3.4.3. Einbringen / Spannen der Spannglieder

Wird als Spannglied gewöhnlicher Spannstahl verwendet, so bestimmen die Einbaumöglichkeiten auf der Baustelle die Einbaulängen der Spannglieder. Wichtige zu beachtende Aspekte sind hier u. a. das Gewicht der Spannglieder oder der Freiraum vor dem Bohrloch zum Einfädeln. Wesentlich mehr Möglichkeiten stehen zur Verfügung bei der Verwendung von Aramidstäben. Sie besitzen den Vorteil des geringeren Gewichtes, was für die Handhabung auf der Baustelle wesentliche Erleichterungen mit sich bringt.

3.3.4.4. Korrosionsschutz bei Spanngliedern aus Spannstahl

Tab. 3.9: Korrosionsschutz von Spanngliedern aus Spannstahl nach [34]

Korrosionsschutz mit Verbund	Korrosionsschutz ohne Verbund
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Durch Verpressen der Bohrlöcher mit Zementmörtel ➤ ca. 1cm Überdeckung mit Zementmörtel ausreichend ➤ Abstandhalter sorgen für allseitige Umhüllung mit Zementmörtel 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Durch Einfetten der Spannglieder ➤ Durch Abdecken mit Korrosionsschutzmasse innerhalb des Hüllrohres

Auch bei diesem Punkt zeigt sich ein deutlicher Vorteil der Aramidspannglieder. Diese besitzen die Eigenschaft korrosionssicher zu sein, was den Korrosionsschutz überflüssig macht.

3.3.5. Spanngliedverankerung

3.3.5.1. Allgemeines

Die Instandsetzung von historischem Mauerwerk durch Vorspannung beruht auf der Technologie des Spannbetonbaues, wie schon im Kapitel 2.2 erwähnt wurde. Bei Instandsetzungen von altem Mauerwerk kommt jedoch der Aspekt hinzu, dass diese Bauteile nicht vorspanngerecht konstruiert sind. Es muss also ein geeignetes Spannverfahren der jeweiligen Bestandssituation angepasst werden. So ist die Krafteinleitung der zentrale Problembereich, welcher sich beim Mauerwerk wesentlich vom Spannbeton unterscheidet. Mauerwerk besitzt eine relativ geringe Druckfestigkeit und praktisch keine Querkzugfestigkeit, sodass größere Lasteinleitungsflächen notwendig werden. Des Weiteren können zusätzliche Störungen des Kraftflusses, durch vorhandene Inhomogenitäten des Mauerwerks, entstehen. [9][34]

Im Wesentlichen können drei Verankerungsarten unterschieden werden:

1. Ankerkörper aus Stahlbeton
2. Ankerkörper aus Stahl
3. Verankerung durch Verbund (siehe Kapitel 3.3.5.2)

Für meine Forschungsarbeit wurden die Versuche mittels Verankerung der Aramidstäbe durch Verbund durchgeführt. Daher wird der Punkt 3 im Kap. 3.3.5.2 sowie im Kap. 4.3 ausführlich bearbeitet und die Punkte 1 und 2 nachfolgend nur kurz beschrieben. Es handelt sich dabei um eine allgemeine Erläuterung bei der Verwendung von Spannstahl als Spannglied.

Zu 1.) Ankerkörper aus Stahlbeton

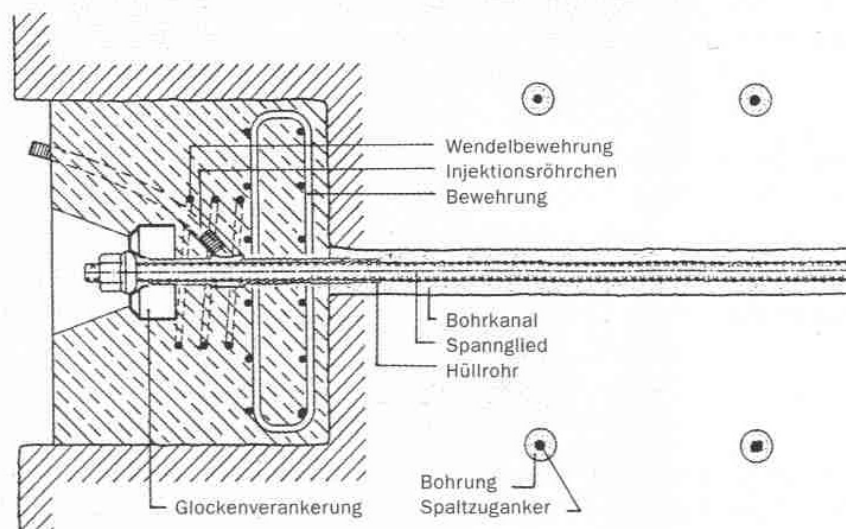


Abb. 3.15: Ankerkörper aus Stahlbeton (aus [34], Seite 108)

Abb. 3.15 zeigt die mögliche Anordnung einer Verankerung mittels so genannten „Betonpolster“. Bei dieser Verankerung können alle gängigen Vorspannsysteme verwendet und im Mauerwerk verankert werden. Ein zentrales Problem beim Verankern mittels Stahlbeton sind die relativ großen Ankerbereiche, die einen großen Substanzverlust mit sich ziehen.

Der große Ankerbereich ist einerseits für die Unterbringung der Biege- und Spaltzugbewehrung und andererseits für die Weitergabe der Vorspannkraft (über die erforderliche Fläche verteilt) an das Mauerwerk erforderlich. Im Bereich des Betonpolsters wird das Spannglied in einem Hüllrohr geführt, um eine gewisse Beweglichkeit beim Vorspannen zu erhalten. Die Fuge zwischen Betonpolster und Mauerwerk sollte nach dem Betonieren angebohrt und verpresst werden. Dieser Vorgang dient der

Füllung der entstandenen Hohlräume während dem Betonieren und einer gleichzeitigen Vergütung des Mauerwerks im Krafteinleitungsbereich. [9][34]

Zu 2.) Ankerkörper aus Stahl

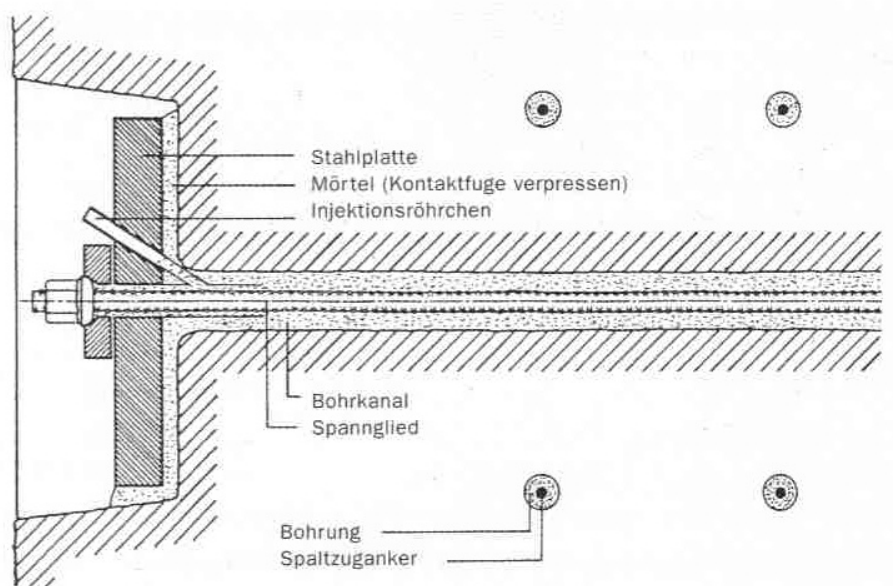


Abb. 3.16: Ankerkörper aus Stahl (aus [34], Seite 111)

Wird eine Verankerung mittels Stahlplatte durchgeführt, können im Vergleich zum Stahlbetonpolster wesentlich geringere Verankerungstiefen ausgeführt werden. Daraus lässt sich der Vorteil ableiten, dass weniger Mauerwerk ausgestemmt werden muss, was bei historischem Mauerwerk aus denkmalpflegerischer Sicht auf jeden Fall anzustreben ist. In Abb. 3.16 sieht man eine Möglichkeit der Verankerung mittels Stahlplatte. Die Ankerplatte erhält zwei Bohrungen für das Spannglied und das Injektionsröhrchen. Des Weiteren ist eine Ausgleichsschicht zwischen Platte und Mauerwerk aus Zementmörtel für die schlüssige Krafteinleitung vorzusehen. Um den Korrosionsschutz zu gewährleisten, wird nach dem Vorspannen die gesamte Ankerplatte einbetoniert. Bei Stahlplatten versucht man die Lasteinleitungsfläche möglichst gering zu halten, damit die Ankerplatte nicht zu dick und damit schwer und unhandlich auf der Baustelle ist. [9][34]

3.3.5.2. *Endverankerung durch Verbund*

Eine weitere Möglichkeit der Endverankerung ist der reine Verbund des Spanngliedes im Bohrloch. Dabei wird die Spannkraft entlang einer bestimmten Übertragungslänge durch Haftung, Reibung und Scherverbund auf das Mauerwerk übertragen. Bei dieser Methode ist kein Ankerkörper erforderlich. Diese Methode ist auch bei der Rissbeschränkung durch die so genannte „vorgespante Vernadelung“ sinnvoll.

Bei vorhandenen Mauerwerkskonstruktionen stellt die Abschätzung der vorhandenen Sicherheiten große Probleme dar, da der Verlauf sowie die zulässige Größe der Verbundspannungen nicht bekannt sind.

Versagen kann einerseits zwischen Spannglied und Injektionsmantel und andererseits zwischen Injektionsmantel und Mauerwerk entstehen. [6][34]

Eine detaillierte Betrachtung von Kraftübertragung durch Verbund folgt im Kapitel 4. Dort werden die wichtigsten Modellbildungen für die Kraftübertragung sowie Modelle für das Verbundversagen dargestellt.

4. Modellbildungen und Berechnungen bei vorgespanntem Mauerwerk

4.1. Allgemeines

In diesem Kapitel werden bestehende Modellbildungen bei vorgespanntem Mauerwerk diskutiert. Den zentralen Bereich dieses Kapitels bildet dabei die Krafteinleitung mit spezieller Rücksichtnahme auf die Krafteinleitung durch Verbund. Ebenfalls kurz dokumentiert werden die Spannkraftverluste durch lastabhängige und lastunabhängige Formänderungen.

4.2. Krafteinleitung – Druckausbreitung im Mauerwerk

4.2.1. Allgemeines

Um den Verankerungsbereich für die Einleitung der Vorspannkraft in das Mauerwerk zu konstruieren, sind einige wichtige Grundlagen von Bedeutung. Untersuchungen zu diesem Verankerungsbereich gibt es von Haller [9], Wenzel [34],[35] und Nietzold [25]. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden in den nachfolgenden Erläuterungen zusammengefasst und liefern einen Überblick über den Problembereich, der Krafteinleitung in das inhomogene Material „Mauerwerk“. Im Kap. 3.3.5 wurden bereits die konstruktiven Möglichkeiten der Endverankerung beschrieben. Nachfolgende Erläuterungen beziehen sich auf die Modellbildungen und Berechnungsformeln für die Krafteinleitungszone.

Grundsätzlich können folgende zwei Bereiche unterschieden werden:

1. Krafteinleitung durch Stahlbeton oder Stahlplatte
2. Krafteinleitung durch Verbund (siehe Kap. 4.3)

In den Versuchen, die im Rahmen der Diplomarbeit durchgeführt wurden, wurde die Krafteinleitung durch Verbund gewählt. Anzumerken ist noch, dass in der oben genannten Literatur vorwiegend Spannstahl als Spanngliedmaterial aufscheint.

4.2.2. Teilflächenpressung rechtwinklig zur Lagerfuge (nach Haller [9])

Unter der Verteilungsplatte entstehen Teilflächenpressungen wie bei Auflagern von Stützen oder Balken. Dafür sind zulässige Werte in der DIN 1053 Teil 1 vorhanden. Für historisches Mauerwerk gelten lt. [9] diese Werte nicht, da dieses Mauerwerk wesentlich größere Wanddicken oder nicht durchgehend im Verband gemauerte Wände aufweist.

4.2.3. Teilflächenpressung parallel zur Lagerfuge (nach Haller [9])

Ähnliche Probleme wie bei der Druckausbreitung herrschen bei der Ermittlung der Schubtragfähigkeit von Mauerwerk, zu welcher es zahlreiche Untersuchungen gibt (siehe auch Kap. 3.2.1.6). Der Unterschied liegt darin, dass bei Schubversuchen die Ableitung von horizontalen Kräften in vertikaler Richtung entscheidend ist. Bei der horizontalen Vorspannung liegen jedoch Aktions- und Reaktionskräfte der Teilflächenpressungen in gleicher Höhe.

Laut Haller [9] lässt sich die zulässige Teilflächenpressung nach Gleichung (5) berechnen.

$$\text{zul } p_T = p_{T0} * (1,75 - 0,75 * \frac{c}{d}) < 1,5 * p_{T0} \quad (5)$$

- p_{T0} = Grundwert der zulässigen Druckspannung nach Din1053 Teil 1
 c = Ankerplattenbreite
 d = Wanddicke

4.2.4. Druckausbreitung im Mauerwerk

Um die Druckausbreitung im Mauerwerk zu analysieren, ist es sinnvoll die Untersuchungen für homogene Materialien anzusehen. Haller gibt in seiner Arbeit einen Überblick der Untersuchungsergebnisse für homogene Materialien an, welche in Tab. 4.1 zusammengefasst werden.

Tab. 4.1: Krafteinleitung und Druckausbreitung nach [9]; (Grafiken aus [9], Seite 39)

KRAFTEINLEITUNG UND DRUCKAUSBREITUNG IN WÄNDEN AUS HOMGENEN MATERIAL	
	<p>a.)</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ $l/h > 2,0$ • Spannkraft verteilt sich auf die gesamte Höhe • Einleitungslänge \cong Wandhöhe • gleichmäßig verteilte Spannung nach Ende der Einleitungslänge
	<p>b.)</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ $l/h < 2,0$ ➤ $l/h > 1,1$ ➤ $l_E > l/2$ • keine gleichmäßig verteilte Spannung in Wandmitte
	<p>c.)</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ $l/h < 0,9$ ➤ $l_E \gg l/2$ • der gedrückten Bereich beträgt maximal das 1,1fache der Länge • geringe Zugspannungen außerhalb des kreisförmigen Druckbereiches
	<p>d.) Wand mit Öffnungsreihen</p> <ul style="list-style-type: none"> • durch die Fensterreihe begrenzt \Rightarrow ähnliche Ausbreitung wie im Bild a.)

Haller unterscheidet bei der Druckausbreitung in zwei Bereiche:

- Ankerplattenbreite = Wanddicke: Scheibenspannungszustand; Druckausbreitung nur in Wandebene
- Ankerplattenbreite < Wanddicke: räumliche Druckausbreitung

Durch Versuche belegt, gibt Haller folgende wesentliche Aussagen für die Druckausbreitung im Mauerwerk:

Krafteinleitungslänge: ➤ bei Mauerwerk ohne oder mit geringer Auflast größer als bei homogenen Material
 ➤ bei asymmetrischen Verband muss auch nach Einleitungszone mit asymmetrischer Druckverteilung oder Druckkonzentrationen gerechnet werden

Druckausbreitung: ➤ weiträumiger als senkrecht zur Lagerfuge nach DIN 1053
 ➤ Druckspannungsspitzen laut Haller besser mit einem Ausbreitungswinkel von 70° ermitteln

4.2.5. Spaltzugkräfte und Randzugkräfte

Zentraler Problembereich bei örtlich konzentrierter Krafteinleitung in das Mauerwerk ist die Bildung von Spaltzugspannungen und Randzugspannungen. Diese entstehen durch die Neigung der Hauptdruckspannung im Bereich der Lasteinleitung bis zur Zone gleichmäßiger Druckspannung. Aus der Neigung der Drucktrajektorien resultieren Spaltzugspannungen quer zur Krafrichtung sowie Randzugspannungen. [9]

Ein Beispiel der Größe und Verteilung von Zugspannungen für homogene Materialien zeigt Abb. 4.1.

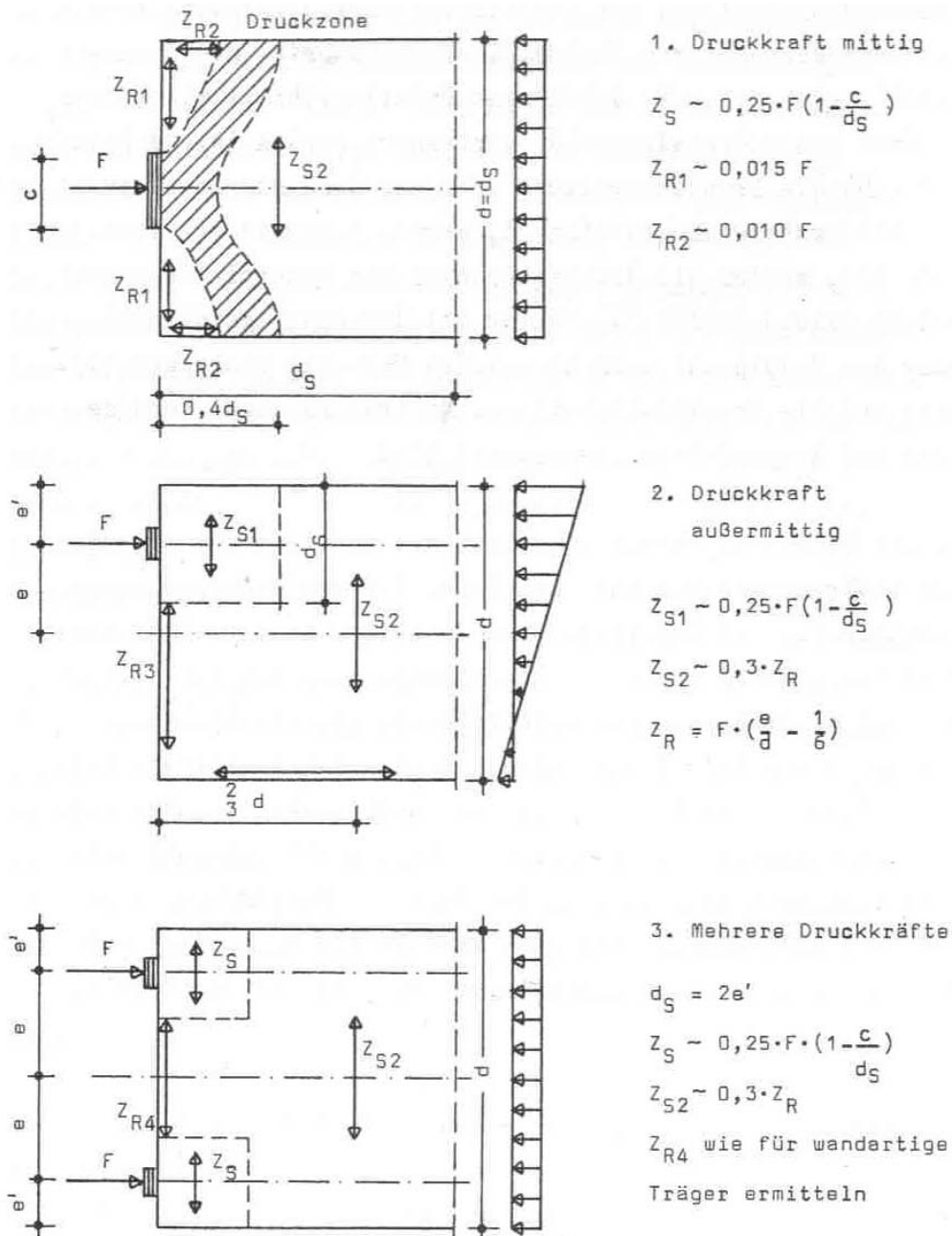


Abb. 4.1: Spaltzug- und Randzugkräfte für homogenes Material (aus [9], Seite 27)

Üblicherweise werden die Spaltzugkräfte durch Nadelanker quer zu Wand aufgenommen. Für die Bemessung der Nadelanker gibt es zwei Empfehlungen:

- Haller [9] : Jede Nadel sollte auf die 1,5-fache anteilige Zugkraft ausgelegt werden
- Pieper [27] : Anordnung von mindestens 4 Nadeln, die eine Tragkraft von 50 % der Ankerkraft erreichen.

4.2.6. Mindestauflast

Laut Haller [9] muss eine gewisse Mindestauflast vorhanden sein, um das Ausknicken der belasteten Schichten zu verhindern.

Die erforderliche Auflast lässt sich aus Formel (6) berechnen:

$$q_{\text{erf}} = \nu * 1,67 * \frac{\sigma * F}{h * E_{\text{II}}} \quad (6)$$

ν = Sicherheitsbeiwert = 5,0

σ = $F / (d * a)$

F = Spannkraft

d = Wanddicke

a = Höhe der Ankerplatte

h = Schichthöhe

E_{II} = lt. Haller durch Versuche ermittelt:

= 460 N/mm² bei unverpreßtem Bruchsteinmauerwerk

= 2000 N/mm² bei unverpreßtem Ziegelmauerwerk Mz25, Mörtelgruppe IIa

Wird die Mindestauflast nicht erreicht, so müssen entweder die Vorspannkraft und die mittlere Druckspannung geringer gewählt werden oder es müssen vertikale Nadeln angeordnet werden.

4.3. Verbund als Kraftübertragung

4.3.1. Allgemeines

Dieses Kapitel befasst sich mit den theoretischen Grundlagen zur Wirkungsweise von Verbund als Kraftübertragung zwischen einzelnen Oberflächen. Bei der Betrachtung der Kraftübertragung durch Verbund sind bei der Vorspannung folgende Kontaktflächen wesentlich:

- die Kontaktfläche zwischen Spannglied und Injektion
- die Kontaktfläche zwischen Injektion und Bohrlochwandung

In Tab. 4.2 wird die Übertragung durch Verbundkräfte am Modell des Coulombschen Reibungselementes erläutert.

Tab. 4.2: Verbund als Kraftübertragung nach [4][6][7]

HAFTREIBUNGSKRAFT		GLEITREIBUNGSKRAFT	
HAFTUNG	REIBUNG	GRENZHAFTUNG	
$H < \mu_0 * N$	$H = \mu_0 * N$	$R = \mu * N$	
der Körper bleibt in Ruhe	der Körper bleibt noch in Ruhe; wird er angestoßen so wird er sich wegen $\mu < \mu_0$ in Bewegung setzen	der Körper beginnt zu rutschen	
Haftungskoeffizient: μ_0 abhängig von der Rauigkeit der berührenden Flächen		Reibungskoeffizient: μ	

In Tab. 4.2 wird der Unterschied zwischen Haftung und Reibung dargestellt. Demnach bleibt ein Körper solange in Ruhe bis die Kraft F die Haftkraft H überschreitet. Kommt es zur Bewegung des Körpers wird ebenfalls eine tangentielle Kraft vom Boden auf den Körper übertragen. Dabei spricht man von der Reibungskraft. Die Größe der Tangentialkräfte (Haftreibungskraft H und Gleitreibungskraft R) ist abhängig von der Rauigkeit der beiden Oberflächen.

4.3.2. Zwei Methoden der Krafteinleitung bei Vorspannung durch Verbund

Zuvor wurden allgemeine Erläuterungen zur Kraftübertragung durch Verbund behandelt. In diesem Kapitel sollen diese Erläuterungen auf Ankerstäbe im Mauerwerk umgelegt werden.

Grundsätzlich kann man lt. [6] in zwei Bereiche unterscheiden:

- Krafteinleitung in den Verpresskörper
- Krafteinleitung in den Ankerstab

Wesentlich für meine Arbeit ist die Krafteinleitung in den Ankerstab, da diese Art der Krafteinleitung bei Ausziehversuchen auftritt. In der Tab. 4.3 werden die Merkmale und Unterschiede der beiden Krafteinleitungen dargestellt.

Zuvor sollen aber wichtige Aspekte bei der Krafteinleitung in zylindrische Verpresskörper dargestellt werden. Wie in Abb. 4.2 ersichtlich wirkt die resultierende Haftreibungskraft, bei einer Lastumlagerung vom Mauerwerk auf den Verpresskörper, nur auf einen Haftungstreifen. Dieser Haftungstreifen resultiert aus der zylindrischen Oberfläche des Verpresskörpers und wird durch den Haftungswinkel ρ_0 beschränkt.

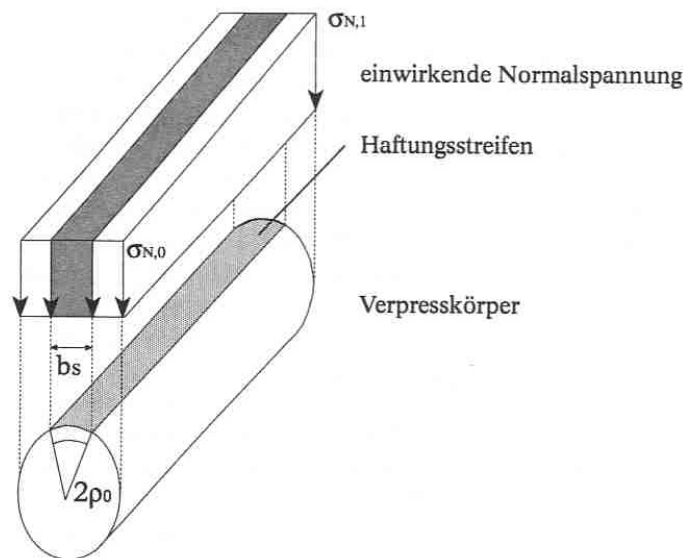
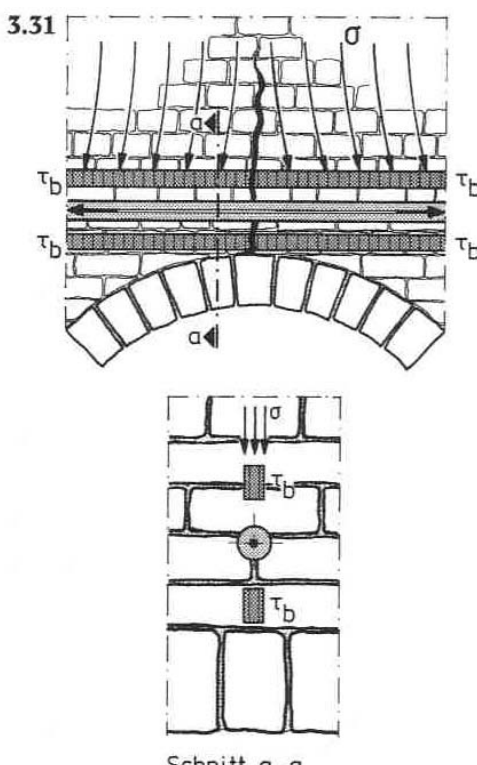
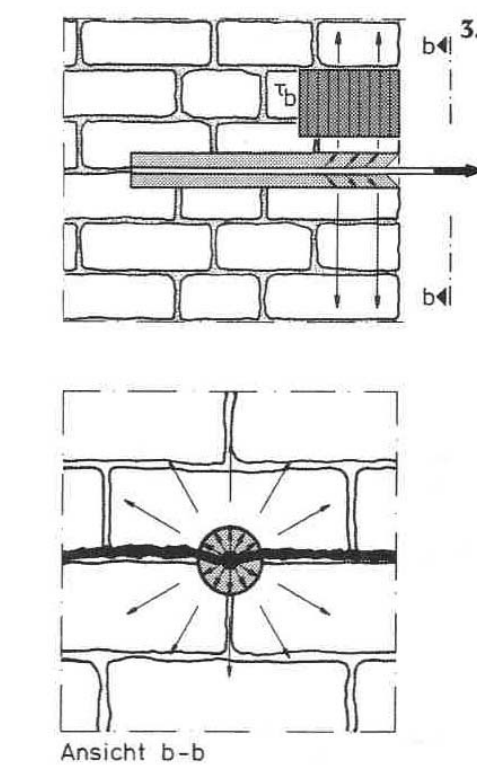


Abb. 4.2: Krafteinleitung in den Verpresskörper über den „Haftungstreifen“ (aus [6], Seite 49)

Tab. 4.3: Zwei Methoden der Krafteinleitung nach [6] (Grafik aus [6], Seite 52)

KRAFTEINLEITUNG IN DEN VERPRESSKÖRPER	KRAFTEINLEITUNG IN DEN ANKERSTAB
<p>3.31</p>  <p>Schnitt a-a</p>	<p>3.32</p>  <p>Ansicht b-b</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Veränderung des Spannungszustandes im Mauerwerk durch den Anker • Zug- und Schubkräfte werden über die Bohrlochoberfläche in den Verpresskörper eingeleitet. Die Größe der übertragbaren Kräfte ist abhängig von: <ul style="list-style-type: none"> ⇒ den mechanischen Eigenschaften des Verpresskörpers ⇒ den Verschiebungen zwischen den Kontaktflächen • die Verbundspannung verteilt sich entlang des „Haftstreifens“ auf den Verpresskörper. 	<ul style="list-style-type: none"> • beim nachträglichem Aufbringen von Zugkräften (Zugversuch) • im oben angeführten Modell konzentriert sich die Verbundkraftübertragung auf eine kurze Strecke im Krafteinleitungsbereich • der vorhandene Spannungszustand im Mauerwerk wird durch den Anker verändert • die Zugkraft wird über den Verpresskörper in das umliegende Mauerwerk übertragen

4.3.3. Verbundversagen

Tab. 4.4: Modelle für Verbundversagen bei Zugversuchen nach [6] (Grafiken aus [6], Seite 54)

	<ul style="list-style-type: none"> • idealer Coulombscher Reibungskörper • Koeffizient μ_s: Wert für Haftung bzw. Reibung zwischen Ankerkörper und Verpresskörper • nach Überwinden der Haftung bei konstanter Zugkraft \Rightarrow gleichmäßiges Rutschen
	<ul style="list-style-type: none"> • Federelement zugeschaltet \Rightarrow aufgrund der zu erwartenden verfestigenden Wirkung bei Verschiebung eines zylindrischen Verpresskörpers im Mauerwerk • die Zugkraft kann im Zustand der Gleitreibung noch weiter ansteigen
	<ul style="list-style-type: none"> • Koeffizient μ_s: Wert für Haftung bzw. Reibung zwischen Ankerkörper und Verpresskörper • Koeffizient μ_G: Wert für Haftung bzw. Reibung zwischen Verpresskörper und Bohrlochwand • $\mu_G < \mu_s$: Haftung wird bei geringer Zugkraft überwunden • $\mu_G \geq \mu_s$: ausreichend raue Kontaktfläche zwischen Bohrlochwand und Verpresskörper; Haftung zwischen Ankerstab und Verpresskörper maßgebend für die Verschiebung (wie im oberen Beispiel)
	<ul style="list-style-type: none"> • $\mu_G \geq \mu_s$: raue Bohrlochwand; größere Zugkräfte aufnehmbar als bei glatter Kontaktfläche zwischen Bohrlochwand und Verpresskörper; bevor es zu einer Verschiebung des Stabes kommt, bilden sich Risse im Verpresskörper • $\mu_G < \mu_s$: glatte Bohrlochwand; geringere Zugkräfte aufnehmbar

4.4. Spannkraftänderungen

Jede Formänderung nach dem Spannvorgang hat Spannkraftänderungen zur Folge. Diese können lt. [9] in zwei Gruppen unterschieden werden:

- a. Spannkraftänderungen aus **lastunabhängigen Formänderungen** durch Temperatur oder Feuchtigkeitseinwirkung
- b. Spannkraftänderungen aus **lastabhängigen Formänderungen** infolge des Spannungszustand des Mauerwerks

Die allgemeine Beschreibung von lastunabhängigen und lastabhängigen Formänderungen wurde bereits bei der Behandlung des Mauerwerks im Kapitel 3.2.1.5 angeführt.

Die nachfolgenden Erläuterungen entstammen den Arbeiten von Haller [9] und Wenzel [34]. Obwohl sich diese Erläuterungen auf den Spann Stahl als Spanngliedmaterial beziehen, da dieser noch hauptsächlich in Verwendung ist, sollen sie hier trotzdem kurz angeführt werden.

zu a.) Spannkraftänderungen aus lastunabhängigen Formänderungen

- Temperatur und Feuchtigkeit
der Einfluss von Temperatur und Feuchtigkeit auf die Spannglieder im Mauerwerksinneren hat eher geringe Bedeutung. Es kommt bei Temperaturbelastung nur zu sehr geringen Temperaturschwankungen im Inneren von historischen Mauerwerkskonstruktionen.

zu b.) Spannkraftänderungen aus lastabhängigen Formänderungen

- Kriechen
Die Spannkraftverluste durch Kriechen treten meist in den ersten Stunden und Tagen nach der Vorspannmaßnahme auf. Wesentlich für die Größe der Verluste ist die Mauerwerksgüte (Gefügestörungen etc.) bzw. die vorhergehende Vergütung des Mauerwerksgefüges.

Haller [9] gibt eine Abschätzung für den Spannkraftverlust durch Kriechen bei einer Vorspannung parallel zur Lagerfuge in Formel (7) an:

$$\Delta Z_k = \varphi_\infty * \sigma_{M,V} * A_V * \frac{E_V}{E_{II}} \quad (7)$$

Folgende Parameter sind in Formel (7) enthalten:

- φ_∞ = Endkriechzahl (1,3 – 2,6 angenommen für $E_{II} = 1000 \text{ N/mm}^2$)
- $\sigma_{M,V}$ = vorgesehene Mauerwerksvorspannung
- A_V = Querschnittsfläche des Vorspanngliedes
- E_V = E-Modul des Vorspanngliedes
- E_{II} = E-Modul Mauerwerk parallel zur Lagerfuge

- plastische Verformungen
Plastische Verformungen, welche bei plötzlichen Setzungen, Bauwerksbewegungen und Erschütterungen eintreten, können ebenfalls zu Spannkraftänderungen führen.

5. Versuchsdokumentation

5.1. Allgemeines

Die vorangegangenen Kapitel lieferten ein theoretisches Grundgerüst zur Vorspannung von Mauerwerk. Kapitel 5 dokumentiert die praktischen Forschungsarbeiten, zur Vorspannung von Mauerwerk, die an der TU- Wien durchgeführt wurden. Kernbereich der Forschungsarbeit bildet der Ausziehversuch. Dabei wurden jeweils drei Aramidstäbe pro Bohrloch eingebracht und mittels Injektionsharz bzw. Epoxyleber verpresst. Anschließend wurde getestet, welche Kraft aufgebracht werden kann bis es zum Versagen

- eines Aramidstabes
- der Verklebung oder
- des Mauerwerks kommt.

Die Versuchsdokumentation beschreibt den genauen Ablauf der einzelnen Arbeiten. Unterstützend sind Grafiken, Tabellen und Fotos eingebaut. Im Anschluss an die Dokumentation des Ablaufes werden die Ergebnisse ausgewertet und interpretiert.

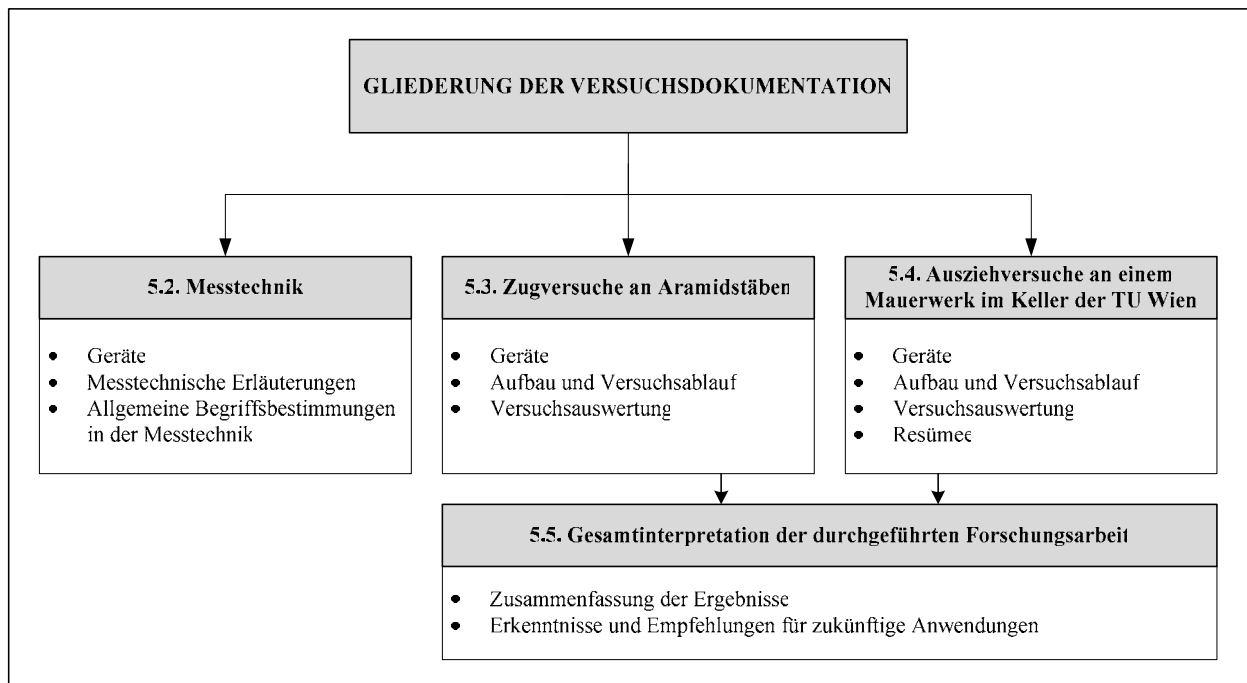


Abb. 5.1: Übersicht der drei Kernbereiche der Versuchsdokumentation

Als Orientierungshilfe gibt Abb. 5.1 einen Überblick über die Gliederung der Versuchsdokumentation. Demnach wird zuerst die Messtechnik, mit Erläuterungen zu den bei den Versuchen verwendeten Geräten, sowie allgemeine Begriffsbestimmungen in der Messtechnik behandelt. Den zweiten Teil bilden die durchgeführten Zugversuche an Aramidstäben. Der dritte Teil befasst sich mit dem Kernbereich der Forschungsarbeit. Hier wird der, im Keller der TU- Wien, durchgeführte Ausziehversuch an einem Mauerwerk dokumentiert.

5.2. Messtechnik

5.2.1. Begriffe in der Messtechnik

Bevor die einzelnen Messgeräte beschrieben werden, die bei den Versuchen zur Anwendung kamen, werden kurz wichtige Grundbegriffe der Dehnmessstechnik erläutert.

Dehnung:

Eine Dehnung eines Körpers kann grundsätzlich durch zwei Beanspruchungsarten verursacht werden. Es handelt sich dabei um:

- die mechanische Einwirkung = Krafteinwirkung
- eine Wärmedehnung = Temperaturerhöhung

Umgekehrt spricht man von der Stauchung, entweder durch Krafteinwirkung oder Temperaturabkühlung.

Um eine Definition der Dehnung anzugeben, sind zwei wichtige Begriffe in der Messtechnik anzuführen:

1. *Absolute Längenänderung:*

Definition lt. [12] : „Die absolute Längendehnung Δl ist die Differenz zwischen der Länge l einer Strecke zum Zeitpunkt der Messung und ihrer ursprünglichen Länge, der Basislänge oder Bezugslänge l_0 :

$$\Delta l = l - l_0 ; [m] \quad (8)$$

2. *Relative Längenänderung*

Die relative Längenänderung wird auch Dehnung genannt. Definition der Dehnung lt. [12] : „Die Dehnung ε ist definiert als Quotient aus einer Längenänderung Δl und einer Bezugslänge l_0 “

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} ; \left[\frac{m}{m} \right] \quad (9)$$

Bei der Einheit der Dehnung spricht man von einem Größenverhältnis. Üblicherweise werden in der Dehnmessstechnik folgende Einheiten verwendet:

$$\begin{aligned} 10^{-6} \text{ m} &= \mu\text{m} \\ 10^{-3} \text{ m} &= \text{mm} \\ 10^{-2} \text{ m} &= \text{cm} \end{aligned}$$

Promille oder Prozentangaben sollten in der Dehnmessstechnik vermieden werden, da es zu Fehlinterpretationen, bei gemeinsamen Angaben mit Toleranz – oder Messfehler- Angaben, kommen kann.

5.2.2. Messgeräte

Zur Durchführung der Versuche wurden im Wesentlichen drei Messgeräte verwendet, die nachfolgend erläutert werden. Dabei handelt es sich um:

- Dehnmessstreifen (siehe Kap. 5.2.2.1)
- Kraftaufnehmer (siehe Kap. 5.2.2.3)
- Wegaufnehmer

5.2.2.1. *Dehnungsmessstreifen DMS:*

Für die im Kap. 5.3 beschriebenen Zugversuche an Aramidstäben, wurden zur Messung der relativen Dehnung DMS verwendet. Probeversuche, vor den eigentlichen Zugversuchen, gaben einen Einblick in die Wirkungsweise und die Handhabung von DMS. Bevor die Probeversuche dokumentiert werden, werden die Wirkungsweise und die wichtigsten Eigenschaften von DMS behandelt.

Laut [12] kann man Dehnungsmessstreifen unterscheiden in:

- Elektrische Widerstands- DMS (Metallische-, Halbleiter- und Aufgedampfte DMS)
- Kapazitive DMS
- Piezoelektrische DMS
- Spannungsoptische DMS
- Mechanische DMS

Für unsere Versuche von Bedeutung sind die elektrischen Widerstands- DMS mit besonderer Beachtung der metallischen DMS. Diese DMS werden nachfolgend genauer betrachtet. Auf die genaue Erläuterung der restlichen Gruppen wird in dieser Arbeit verzichtet.

Elektrische Widerstands- DMS

Wirkungsweise:

Einen Kernpunkt zur Wirkungsweise von diesen DMS liefert die Definition lt. [21] :

„Die Wirkungsweise eines DMS beruht darauf, dass sich der OHM'sche Widerstand eines elektrischen Leiters ändert, wenn sich dessen Länge ändert.“

Wheatstone und Thomson entdeckten den Dehnungs- Widerstands- Effekt elektrischer Leiter, welche durch mechanische Beanspruchung ihren Widerstand ändern.

Diese Widerstandsänderung entsteht durch:

- die Verformung des elektrischen Leiters und
- eine Änderung des spezifischen Widerstandes des Leiterwerkstoffes infolge Gefügeänderung.

Die Formel (10) beschreibt die Beziehung dieser Widerstandsänderung. [12][15]

$$\frac{dR}{R_0} = \varepsilon(1 + 2\nu) + \frac{d\rho}{\rho} \tag{10}$$

R = elektrischer Widerstand, R₀ = Grundwiderstand

ε = Dehnung

ν = Querszahl

ρ = spezifischer Widerstand

$\frac{d\rho}{\rho}$ = Gefügeanteil; Änderung des spezifischen Widerstandes des Leiterwerkstoffes infolge von Gefügeänderungen

Kennliniensteigung S an freigespannten Drähten [12]

$$S = \frac{\frac{\Delta R}{R_0}}{\frac{\Delta l}{l_0}} = \frac{\frac{\Delta R}{R_0}}{\varepsilon} ; \left[\frac{\Omega}{\frac{m}{m}} \right] \tag{11}$$

S = Kennliniensteigung; lt. Versuche ~ 2

ΔR /R₀ = relative Widerstandsänderung

Δl /l₀ = ε = relative Längenänderung; Dehnung

An frei gespannten Drähten, von unterschiedlichen Ausgangsmaterialien zur Verwendung bei DMS, wurden zahlreiche Messungen durchgeführt. Aus diesen Messungen ging hervor, dass es vorteilhaft ist, ein Material zu verwenden, bei welchem der Gefügeanteil aus Gleichung (10) null wird. Daraus folgt, dass Materialien mit einer Kennliniensteigung vom Wert zwei über den gesamten Dehnungsbereich hauptsächlich bei der Herstellung von DMS verwendet werden. Beim Endprodukt der DMS spricht man, anstatt des Faktors S von dem Faktor k. Dieser Faktor k gibt die Empfindlichkeit eines DMS an und weicht meist nur geringfügig vom Wert S der frei gespannten Drähte ab. Diese Abweichung kann aus Einflüssen der Messgitterkonfiguration und aus den Dehnungseinleitungsbedingungen in das Messgitter herrühren. [12]

Dehnungsempfindlichkeit: k- Faktor [12]

$$k = \frac{\frac{\Delta R}{R_0}}{\frac{\Delta l}{l_0}} = \frac{\frac{\Delta R}{R_0}}{\varepsilon} ; \left[\frac{\Omega}{\frac{m}{m}} \right] \quad (12)$$

Bauformen von DMS:

Grundsätzlich gibt es eine ganze Reihe von Bauformen der DMS, welche sich durch die Form, Abmessung, Messgitterlänge oder Lage der Anschlüsse unterscheiden. Zu unterscheiden wären z.B. Linear- DMS in einfacher und doppelter (paralleler) Anordnung, X- Rosetten (unter 90° angeordnete Messgitterachsen), R- Rosetten (drei unter bestimmten Winkel angeordnete Messgitterachsen). [12]

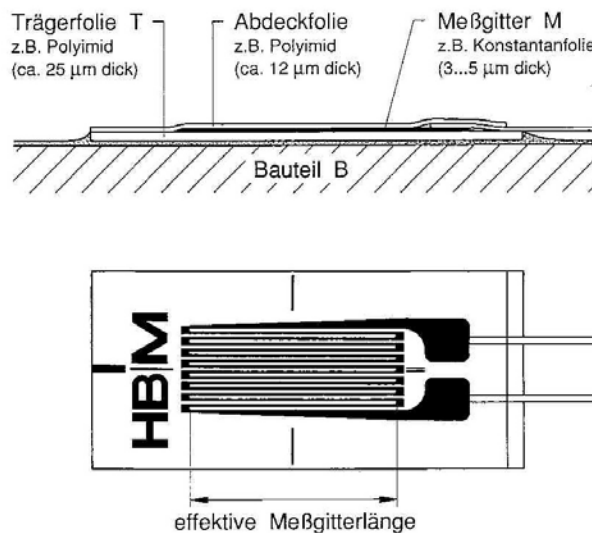


Abb. 5.2: Schema eines Folien-DMS (aus [15], Seite 17)

Abb. 5.2 zeigt das Schema eines handelsüblichen Folien – DMS, welcher heutzutage in vielen Anwendungsbereichen zum Einsatz kommt. Auf einer Trägerfolie liegt die metallische Messgitterfolie, welche durch eine Abdeckfolie geschützt wird.

Mit dem DMS soll in Längsrichtung des Messgitters die mechanische Dehnung gemessen werden. Es kann aber auch, durch andere Störeinflüsse, eine Widerstandsänderung entstehen.

Zu diesen Störungseinflüssen zählen vor allem:

- Temperatureinflüsse
- Querdehnungseinflüsse
- Kriecherscheinungen
- Evtl. vorhandener hydrostatischer Druck

Wheatstone Brückenschaltung

Die Wheatstonesche Brückenschaltung ist die am meisten angewandte Grundschaltung beim Messen mit Dehnungsmessstreifen. Abb. 5.3 zeigt die zwei üblichen Darstellungsweisen der Brückenschaltung, wobei beide Arten elektrisch identisch sind. Wie in Abb. 5.3 ersichtlich besteht die Brückenschaltung aus den vier Widerständen R_1 - R_4 . Die Brückeneckpunkte 2 und 3 bilden die Anschlussstelle für eine Brückenspeisespannung U_B . Danach lässt sich an den Brückeneckpunkten 1 und 4 die Brückenausgangsspannung (Messspannung) U_M abnehmen. [12] [15]

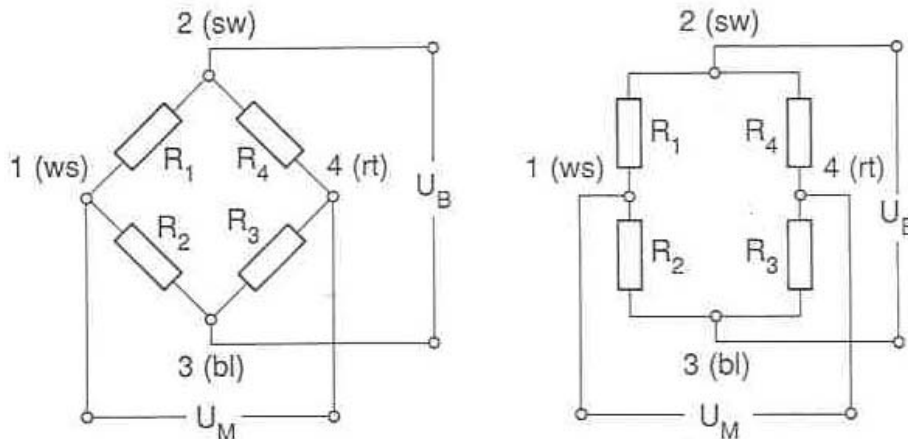


Abb. 5.3: WHEATSTONE'sche Brückenschaltung (aus [15], Seite 160)

$$\frac{U_M}{U_B} = \frac{(\Delta R_1 - \Delta R_2 + \Delta R_3 - \Delta R_4)}{2 * (2 * R_0 + \Delta R_1 + \Delta R_2 + \Delta R_3 + \Delta R_4)} \quad (13)$$

U_M = Brückenausgangsspannung

U_B = Brückenspeisespannung

ΔR_i = Widerstandsänderung der einzelnen Dehnungsmessstreifen

R = Nennwiderstand des verwendeten Dehnungsmessstreifen

Bei der Gleichung (13) lt. [15] handelt es sich um die Grundgleichung der Wheatstoneschen Brückenschaltung, für das Messen mit Dehnungsmessstreifen. Die genaue Herleitung dieser Grundgleichung kann in der Literatur von Keil Stefan (in [15], Seite 161 -162) nachgelesen werden.

Eine wesentliche Interpretation der Gleichung (13) ist:

Gleichgroße Widerstandsänderungen in den Brückenzeigen haben keine Auswirkung auf die Brückenausgangsspannung U_M . Durch diesen Umstand bietet die Wheatstonesche Brückenschaltung sehr gute Möglichkeiten zur Kompensation von Auswirkungen aus Störeinflüssen.

➤ Beispiel:

Wenn alle Dehnungsmessstreifen die gleiche Temperaturänderung erfahren, so bewirkt diese Änderung in allen Dehnungsmessstreifen die gleiche Widerstandsänderung. Dadurch bleibt das Ausgangssignal der Brückenschaltung unbeeinflusst.

Möglichkeiten der Brückenschaltung für das Messen mit Dehnungsmessstreifen:

Werden Messungen in der Anordnung der Wheatstoneschen Brückenschaltung durchgeführt, müssen alle vier Brückenzeige vorhanden sein. Es ist aber nicht erforderlich, dass jeder Brückenzeig mit einem Dehnungsmessstreifen ausgestattet ist. Es können auch Festwiderstände, auch „Dummies“ genannt, eingebaut werden. Daraus ergeben sich die Möglichkeiten, welche in Abb. 5.4 dargestellt sind, der Halb-Viertel oder Vollbrückenschaltung. Die Ergänzung zur vollständigen Wheatstoneschen Brücke erfolgt durch Ergänzungsschaltungen im Messgerät. [15]

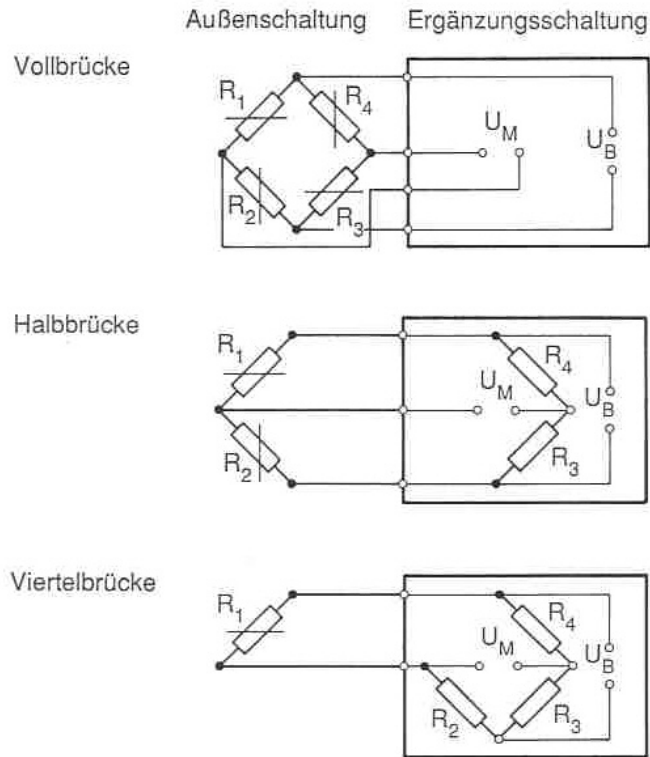


Abb. 5.4: Möglichkeiten der Brückenschaltung beim Messen mit Dehnungsmessstreifen (aus [15], Seite 165)

Die Messkette (nach [12],[15])

Die Messkette besteht im Allgemeinen aus folgenden drei Bereichen:

1. Aufnehmer
2. Anpasser
3. Ausgeber

Die Anordnung dieser drei Bereiche ist in Abb. 5.5 dargestellt.

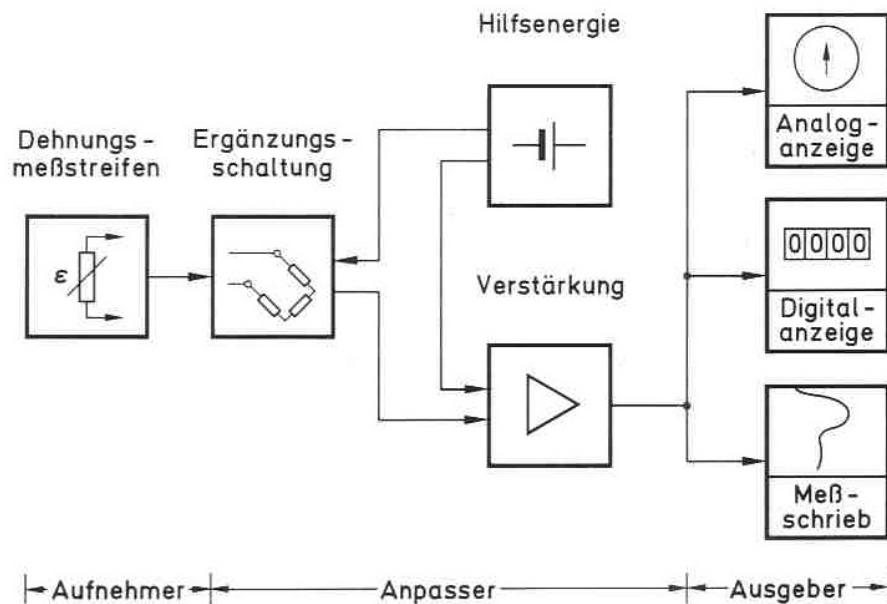


Abb. 5.5: Schema einer Messkette zur Messung von Dehnungen mit DMS. (aus [12], Seite 17)

Die drei Bereiche bilden eine grobe Gliederung der Messkette. Die Messkette kann jedoch auch durch zusätzliche Geräte, wie z.B.: Messstellenumschalter, Filter, Spitzenwertspeicher etc., erweitert werden.

Beschreibung der drei wesentlichen Bereiche der Messkette:

zu 1.) Aufnehmer

Der Aufnehmer, der Dehnungsmessstreifen, bildet das erste Glied in der Messkette. An der Eingangsseite des Aufnehmers wirkt eine mechanische Größe, die Dehnung, welche eine elektrische Widerstandsänderung an der Ausgangsseite verursacht.

zu 2.) Anpasser

Als zweites Glied folgt die Messschaltung, z.B.: eine Wheatstone Brückenschaltung, bei welcher der DMS einen Brückenast bildet. Diese Brückenschaltung gibt an der Ausgangsseite ein elektrisches Signal ab. Der DMS und die Brückenschaltung sind passive Glieder in der Messkette, das bedeutet es muss zuerst eine Hilfsenergie zugeführt werden, um deren Funktionstüchtigkeit zu erhalten. Die Speisung mit Hilfsenergie erfolgt überwiegend durch eine konstant eingepreßte Spannung oder durch einen konstant eingepreßten Strom. Das nächste Glied in der Messkette bildet der Messverstärker. Dieser soll seinen Messbereich an das gelieferte Signal des Aufnehmers (Brückenausgangsspannung) anpassen können. Der Messkraftverstärker sollte das Signal auf eine ausreichende Höhe, zum Betrieb der nachfolgenden Anzeigerinstrumente, verstärken.

zu 3.) Ausgeber

Als letztes Glied der Messkette steht der Ausgeber. Hierbei wird das Signal des Messkraftverstärkers in einen anschaulichen Messwert oder eine Grafik ausgegeben. Zu unterscheiden sind hier analoge oder digitale Anzeigen sowie grafische Messschriebe.

Vorgangsweise beim Applizieren der DMS (nach [5], [12], [15])

Beim Applizieren von DMS auf einem Messobjekt gibt es einige wichtige Grundregeln die beachtet werden sollten. Die Vorgangsweise während der DMS – Applikation sollte nach folgenden Punkten ablaufen:

1. *Vorbereiten des DMS*

Um ein einfacheres Applizieren des DMS an der Messstelle zu ermöglichen, wird der DMS mithilfe zweier Klebestreifen vorbereitet. Ein Klebestreifen dient der leichteren Handhabung bei der Klebung, der andere Klebestreifen wird zur vorläufigen Fixierung der Lötstützpunkte am DMS verwendet.

2. *Vorbereiten der Messstelle*

Bevor der DMS appliziert werden kann, muss die Messstelle einer gründlichen Reinigung unterzogen werden. Diese Reinigung wird im Allgemeinen mit einem Lösungsmittel durchgeführt. Für eine optimale Haftung des DMS sollte die Messstelle mit einem Schleifpapier (lt. Angaben der DMS Herstellerfirma; anhängig vom zu verwendenden Kleber) aufgeraut werden. Diesem Aufrauvorgang sollte noch einmal eine Reinigung mit Lösungsmittel folgen. Beim Anzeichnen der Position des DMS sollten keine Rillen in der Messstelle entstehen.

3. *Applizieren des DMS*

Der DMS wird mithilfe des Klebestreifens an der Messstelle platziert. Wichtig ist, dass der DMS nur an den Klebestreifen oder zwischen den Lötstützpunkten mit einer Pinzette angefasst wird. Der DMS wird mithilfe des Klebestreifens zurückgeklappt und der Kleber (je nach Herstellerangaben) kann aufgetragen werden. Der Kleber wird mit einem Teflonstreifen gleichmäßig verteilt und durch eine rollende Bewegung wird der DMS umgeklappt und mit den Daumen angedrückt. Wichtig bei diesem Arbeitsschritt ist, dass zwischen DMS und Daumen eine Teflonfolie liegt, um das Ankleben des Daumens zu verhindern. Je nach Herstellerangaben und

Temperaturbedingungen wird der DMS während eines angegebenen Zeitraums angedrückt. Im nächsten Arbeitsschritt werden in einem Zug die zwei Klebestreifen abgezogen.

4. *Anlöten der Messkabel an den DMS*

Nun folgt der Arbeitsschritt des Anlötens Messkabel an den DMS. Dies geschieht über die so genannten Lötstützpunkte, welche einen festen Ankerpunkt zwischen DMS und Kabel schaffen. Nach dem Anlöten der Messkabel sollte eine Reinigung mit Lösungsmittel erfolgen, um eventuelle Flussmittelreste zu entfernen.

5. *Prüfungen der einwandfreien DMS- Applikation*

- Visuelle Inspektion
Erkennen von Mängeln bei der DMS- Klebung mithilfe einer ca. 6fach vergrößernden Lupe.
- Durchgangswiderstandsmessung
Messung des DMS – Widerstandes mithilfe eines Ohmmeters. Bei dem überwiegenden Teil der DMS beträgt der Widerstand 120Ω .
- Isolationswiderstandsmessung
Messung des Isolationswiderstandes zwischen DMS und Messobjekt sowie zwischen den einzelnen Messkabeln. Der Widerstand sollte zwischen $2000\text{ M}\Omega$ (bei im Freien applizierten DMS) und $20.000\text{ M}\Omega$ (bei Laborapplikation) liegen.

6. *Messstellenschutz*

Im letzten Schritt sollte ein Schutz der Messstelle vor mechanischen und chemischen Einwirkungen hergestellt werden.

Diese sechs Punkte geben einen groben Überblick, was bei einer DMS – Applikation zu beachten ist. Um diese Applikation von DMS zu üben, machte ich an der TU- Wien eine Probeapplikation von zwei Dehnungsmessstreifen an einem Stahlprobekörper. Der Versuch der im Kap. 5.2.2.2 beschrieben wird, sollte mir den Umgang mit DMS näher bringen und erleichterte die späteren Arbeiten an den Aramidstäben.

5.2.2.2. Dokumentation des Probeversuchs / DMS – Applikation

1. Applizieren der DMS auf einem Stahlprobekörper

Das Applizieren der zwei DMS auf dem Probekörper hielt sich im Wesentlichen an die oben genannte Reihenfolge. Abb. 5.6 zeigt den Stahlprobekörper mit den zwei applizierten Dehnungsmessstreifen.

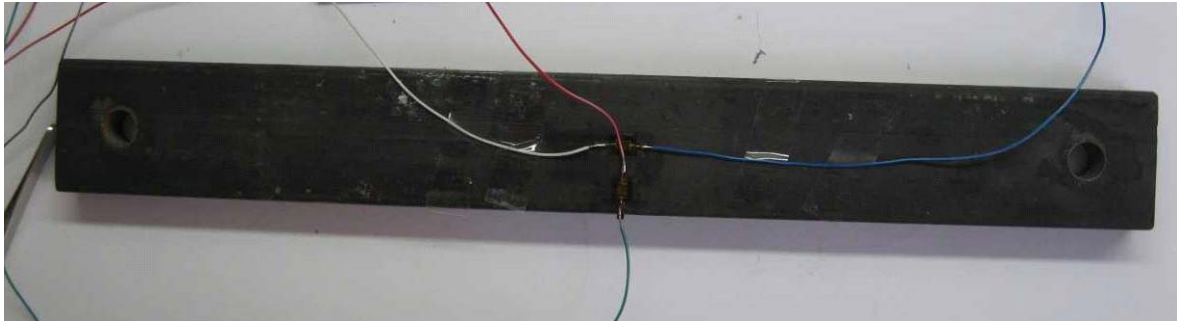


Abb. 5.6: Probekörper aus Stahl

Abmessungen des Probekörpers:

- l = ~ 400mm
- b = 49mm
- h = 19mm

Abb. 5.7 zeigt eine genauere Darstellung der zwei applizierten DMS. Aus dem Größenverhältnis von DMS zu Probekörper wird deutlich, welche geringen Abmessungen der DMS besitzt, woraus man schließen kann, wie schwierig es ist, eine exakte DMS-Applikation durchzuführen. Wichtig ist das exakte, maßgenaue und vorsichtige Arbeiten mit dem DMS. Unterschiedliche Messkabelfarben ermöglichen eine leichtere Orientierung beim Anschließen der Messkabel an die Messbrücke nach dem vorgegebenen Schema.

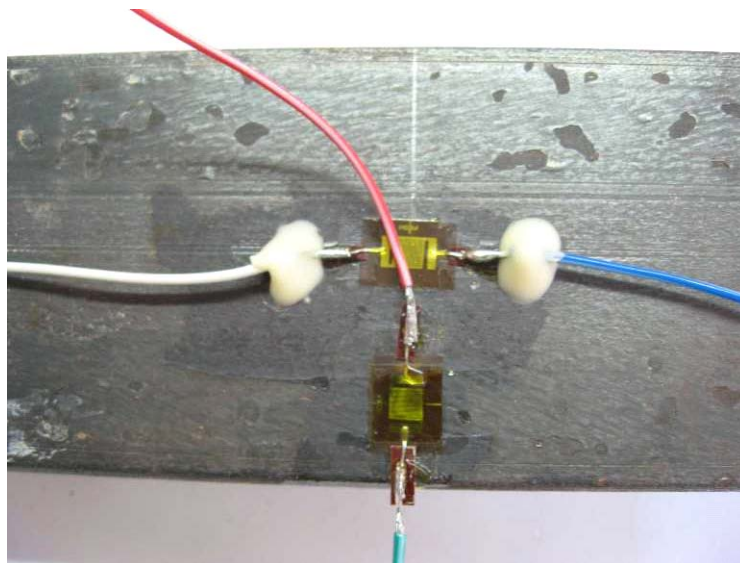


Abb. 5.7: Detaillierte Darstellung der zwei applizierten DMS auf dem Stahlprobekörper

2. Druckversuch

Nach dem Applizieren der DMS am Probekörper wurde dieser in die Prüfmaschine eingebaut. Die Anordnung des Probekörpers während der Versuchsdurchführung zeigt Abb. 5.8.



Abb. 5.8: Druckversuch am Stahlprobekörper

Der Druckversuch wurde folgendermaßen durchgeführt:

- Anschließen der Messkabel an die Messbrücke nach vorgegebenen Schema
- Belastung mit beliebiger Kraft
- Ablesen der Kraft mit zugehöriger, gemessener Dehnung
- Entlastung

Tab. 5.1: Auswertung des Druckversuchs

Probekörper - Angaben		
b	49	mm
h	19	mm
l	400	mm
A = b x h	931	mm ²
E - Modul	210000	N/mm ²

	F	$\sigma = F/A$	Dehnung σ / E	Dehnung gemessen	Abweichung
Einheiten	N	N/mm ²	$\mu\text{m}/\text{m}$	$\mu\text{m}/\text{m}$	$\mu\text{m}/\text{m}$
1. Versuch	14625	15,71	74,80	94,40	19,60
2. Versuch	7130	7,66	36,47	54,50	18,03
3. Versuch	2580	2,77	13,20	24,80	11,60

Nachdem der erste Belastungsversuch mit 14.625N eine zu große Abweichung (19,60 mm/m) ergab, wurden zwei weitere Belastungsversuche absolviert. Bei diesen Versuchen wurde die aufgebrachte Kraft wesentlich minimiert, sodass beim Belastungsversuch Nummer 3 bereits eine Minimierung der Abweichung, um ca. 40 %, erfolgte. Jedoch ist diese Abweichung im Vergleich zur gerechneten Dehnung noch relativ hoch, was man folgendermaßen begründen kann:

- Einfluss von Biegung auf die Messung der Dehnung mit den Dehnmessstreifen
- Der angenommene Wert des E- Moduls ist ein Tabellenwert für Stahl und könnte bei diesen Probekörper evtl. auch abweichen

3. Biegeversuch

Um die Genauigkeit der applizierten DMS doch noch bestätigen zu können, wurde noch ein Biegeversuch durchgeführt. Dieser wurde nach dem Schema, wie es in Abb. 5.9 dargestellt ist, durchgeführt. Der Stahlkörper mit den zwei applizierten DMS wurde mit einer Punktmasse m belastet und die gemessenen Dehnungen notiert.

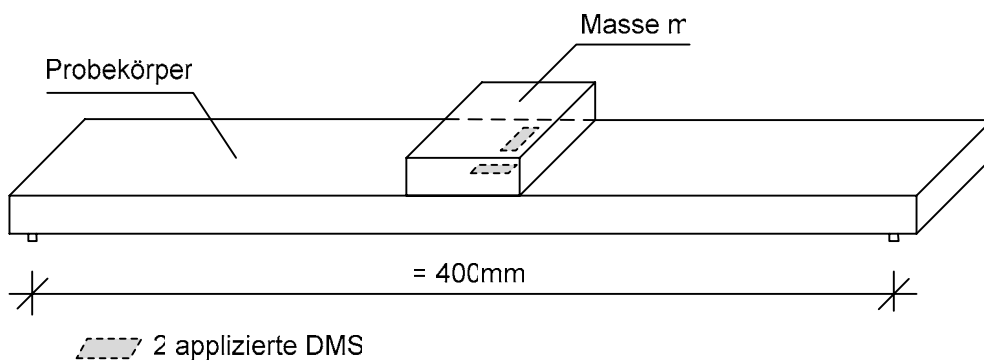


Abb. 5.9: Schema des Biegeversuchs

Tab. 5.2: Auswertung des Biegeversuchs

Probekörper - Angaben		
b	49	mm
h	19	mm
l	400	mm
$A = b \times h$	931	mm ²
$W = b \times h^2 / 6$	2948,17	mm ³
E - Modul	210000	N/mm ²

	$F = m \cdot a$	$M = F \cdot l / 4$	Spannung M/W	Dehnung σ / E	Dehnung gemessen	Abweichung
Einheiten	N	Nmm	N/mm ²	$\mu\text{m}/\text{m}$	$\mu\text{m}/\text{m}$	$\mu\text{m}/\text{m}$
1. Versuch	5,65	565,00	0,19	0,91	1,08	0,17
2. Versuch	16,18	1617,70	0,55	2,61	3,10	0,49

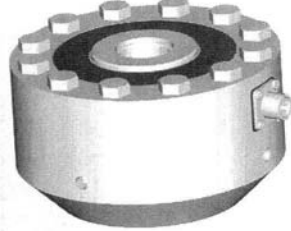
Die Auswertung des Biegeversuch (Tab. 5.2) zeigte schon eine deutlich geringere Abweichung, der gerechneten Dehnung zur gemessenen. Damit wurde bestätigt, dass die Applikation der DMS erfolgreich durchgeführt wurde. Wie bereits oben erwähnt, ist beim Druckversuch der Biegeeinfluss ein entscheidender Faktor, weshalb so eine starke Abweichung zwischen Rechnung und Messung aufgetreten ist.

Nach dieser durchgeführten Probeapplikation konnte mit dem Applizieren an den Aramidstäben begonnen werden. Aufgrund des Materials „Aramid“ ergaben sich einige wesentliche Punkte, die bei der Applikation zusätzlich zu beachten sind. Diese werden im Kap. 5.3.3 bei der Dokumentation der Zugversuche erläutert.

5.2.2.3. *Kraftaufnehmer*

Der für die Versuche verwendete Kraftaufnehmer gehört zur Typenreihe U10M der Firma HBM. In Tab. 5.3 sind die wichtigsten Daten und Eigenschaften des verwendeten Kraftaufnehmers angeführt.

Tab. 5.3: *Kraftaufnehmer Typ U10M – Messbereich 125 kN lt. [10]; (Grafik aus [10], Seite 8)*

Anwendungsgebiet:	<ul style="list-style-type: none"> ➤ messen von Zug- und Druckkräften ➤ messen von statischen und dynamischen Kräften mit hoher Genauigkeit
Typ U10M:	
Mechanische Ausführungen:	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Aufnehmer mit Adapter; Ausführung als Einfachbrücke
Messbereich:	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 125 kN
max. Gebrauchskraft:	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 230 % entspricht 287,5 kN
Bruchkraft:	<ul style="list-style-type: none"> ➤ > 400 % entspricht > 500 kN

5.3. Zugversuche an Aramidstäben

5.3.1. Allgemeines

Es wurden insgesamt drei Aramidstäbe mit einem Einzeldurchmesser von 7,5mm mittels eines Zugversuches getestet. Die Versuchsdurchführung wird in Kap. 5.3.3 ausführlich erläutert. Ziel dieser Versuche war es, die mechanischen Eigenschaften dieser Aramidstäbe zu untersuchen.

5.3.2. Aramidstäbe

In Kap. 3.2.2.2 wurden bereits allgemeine Eigenschaften von Faserverbundwerkstoffen behandelt. In diesem Teil der Versuchsdokumentation werden die Eigenschaften speziell für die Aramidstäbe erläutert, welche bei den Versuchen zur Anwendung kamen. Es handelt sich dabei um Aramidstäbe der Firma Sireg mit Sitz in Italien. Aus den Produktdatenblatt der Firma wurden die technischen Eigenschaften dieser Aramidstäbe entnommen und in Tab. 5.4 zusammengefasst.

Tab. 5.4: Arapree Rod; Überblick der Eigenschaften laut Firmendatenblatt [29]

ARAMID					
ÜBERBLICK DER EIGENSCHAFTEN LAUT FIRMENDATENBLATT					
PRODUKTEIGENSCHAFTEN	* exzellente Korrosionsbeständigkeit				
	* Vorteil beim Vergleich mit konventionellen Baumaterialien ist das Verhältnis der hohen Steifigkeit zum geringen Gewicht				
	* gutes Verhalten bei Ermüdungsbeanspruchung				
	* nicht-magnetische Eigenschaften				
	* Toleranzbereich bei Schädigung				
	* Vorteil der Leichtigkeit bei Transport und Handhabung				
TECHNISCHE EIGENSCHAFTEN	Kenngroße	Einheit	Arapree Rod 5,5	Arapree Rod 7,5	Arapree Rod 10
	Zugfestigkeit	MPa	1400	1400	1400
	Zug - Elastizitätsmodul	GPa	60	60	60
	Endverformung	%	2,4	2,4	2,4
	Nenn Durchmesser	mm	5,5	7,5	10
	nominelle Querschnittsfläche	mm ²	23	44	78
	Traglast	kN	32	61	109
	Gewicht / Längeneinheit	g/m	40	75	130

5.3.3. Versuchsablauf – Versuchsaufbau

Grundsätzlich kann der Versuchsablauf in folgende Arbeitsschritte eingeteilt werden:

- Vorbereitung der Aramidstäbe
- Applizieren der DMS
- Zugversuch

ARBEITSSCHRITT 1: VORBEREITUNG DER ARAMIDSTÄBE

In diesem Arbeitsschritt wurden die Aramidstäbe für die Durchführung des Zugversuches vorbereitet. Dafür wurden die Aramidstäbe jeweils an beiden Enden in eine Gewindehülse eingeklebt. Die Daten des verwendeten Epoxykleber (S&P Resin 220) sind in der Versuchsdokumentation des Ausziehversuches, in Tab. 5.9 zusammengefasst.

- Länge der Aramidstäbe: 80 cm
- Länge der Gewindehülse (Injektionslänge): 30cm



Abb. 5.10: Darstellung des eingeklebten Gewindestabes

ARBEITSSCHRITT 2: APPLIZIEREN DER DEHNUNGSMESSSTREIFEN

Nach Aushärten des Klebers konnte mit der DMS- Applikation begonnen werden. Tab. 5.5 zeigt den Ablauf der Applikation, wobei die Punkte in Kap. 5.2.2.1 zu beachten sind.

Tab. 5.5: Applikation der Dehnungsmessstreifen auf dem Aramidstab

allgemeine Vorbereitung:	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Säubern des Gewindes, Reste des Injektionsharzes entfernen
Vorbereitung der Messstelle:	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Entfernen der sandigen Schicht des Aramidstabes mithilfe eines Schleifpapiers ➤ Aufbringen einer dünnen Schicht des Schnellklebstoffes X60, um eine optimale Schicht zum Applizieren der DMS zu erhalten ➤ Trocknungsvorgang des X60
Applikation der DMS: Prüfung der Applikation:	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Applizieren von zwei DMS auf der Messstelle mit dem Klebstoff X60 ➤ Wichtig: zwei DMS mit einem Winkel von 90° zueinander ➤ Anlöten der Messkabel an die zwei Lötstützpunkte je DMS <div data-bbox="799 1485 1273 1809" data-label="Image"> </div> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Durchgangswiderstandsmessung; übliche DMS 120 Ω
Messstellenschutz	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Fixieren der Messkabel mit dem Klebstoff X60 ➤ Abdecken der Messstelle mit dem dauerplastischen selbstklebenden Kitt AK22

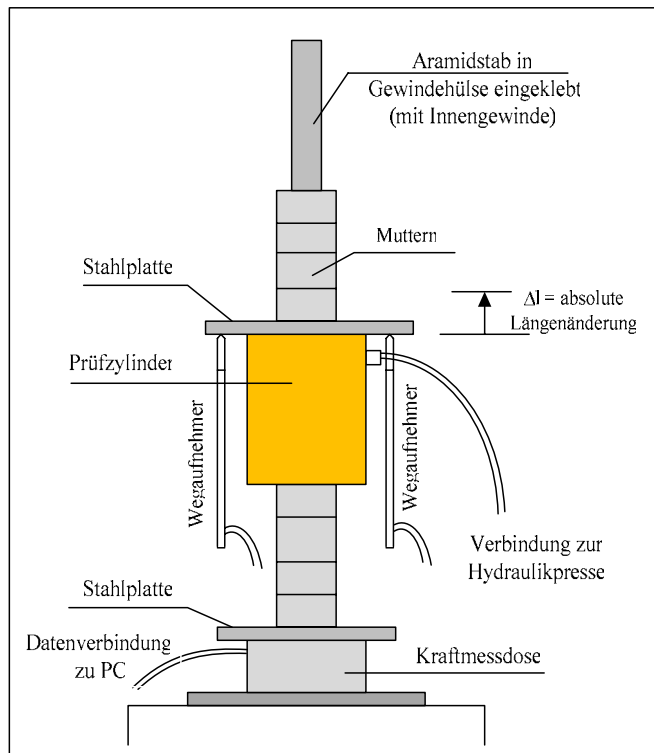
ARBEITSSCHRITT 3: ZUGVERSUCH

Abb. 5.11: Schema sowie Foto des Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau beim Zugversuch ist in Abb. 5.11 dargestellt. Während der Versuchsdurchführung wurde die absolute Längenänderung mittels zwei Wegaufnehmer gemessen. Aus der absoluten Längenänderung und der Ausgangslänge l_0 konnte bei der Versuchsauswertung die Dehnung berechnet werden. Der applizierte Aramidstab wurde laut Abb. 5.11 eingespannt und mittels Hydraulikpresse belastet. Insgesamt wurden drei Aramidstäbe nach diesem Schema getestet.

Probleme mit der DMS – Messung:

Beim ersten Zugversuch konnte noch eine Messung der Dehnung mittels DMS durchgeführt werden. Jedoch lieferte diese DMS- Messungen nur in einem kurzen Anfangsbereich der Belastung sinnvolle Messdaten. Für die Auswertung der Versuche ist dieser geringe Bereich der DMS- Messung nicht von Bedeutung und wird daher auch in der nachfolgenden Auswertung nicht mehr verwendet.

Beim zweiten und dritten Zugversuch konnte überhaupt keine DMS- Messung mehr durchgeführt werden. Nach erfolgtem Versuchsaufbau lt. Abb. 5.11 kam es bei beiden Proben zu einer Zerstörung der DMS- Applikation, wodurch die Messung des Durchgangswiderstandes keine 120Ω mehr ergab.

Somit wurde, für die Auswertung der Versuche, die Dehnung mittels der absoluten Längenänderung bestimmt. Die absolute Längenänderung wurde mithilfe der zwei lt. Abb. 5.11 angeordneten Wegaufnehmer gemessen.

5.3.4. Auswertung der Zugversuche

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Auswertung der drei Zugversuche, welche an Aramidstäben der Firma Sireg durchgeführt wurden. Zu Beginn werden alle drei Versuche in Abb. 5.12 dargestellt, um einen ersten Überblick zu erhalten. Im Anschluss folgen detaillierte Erläuterungen zu den einzelnen Versuchen.

Für die Auswertung der Zugversuche sind die nachfolgend angeführten mechanischen Eigenschaften lt. [29] der verwendeten Aramidstäbe wesentlich.

Arapree Rod 7,5

Durchmesser	7,5 mm
Fläche	44 mm ²
Zugfestigkeit	1400 N/mm ²
Zug E-Modul	60 000N/mm ²
Bruchlast	61 kN

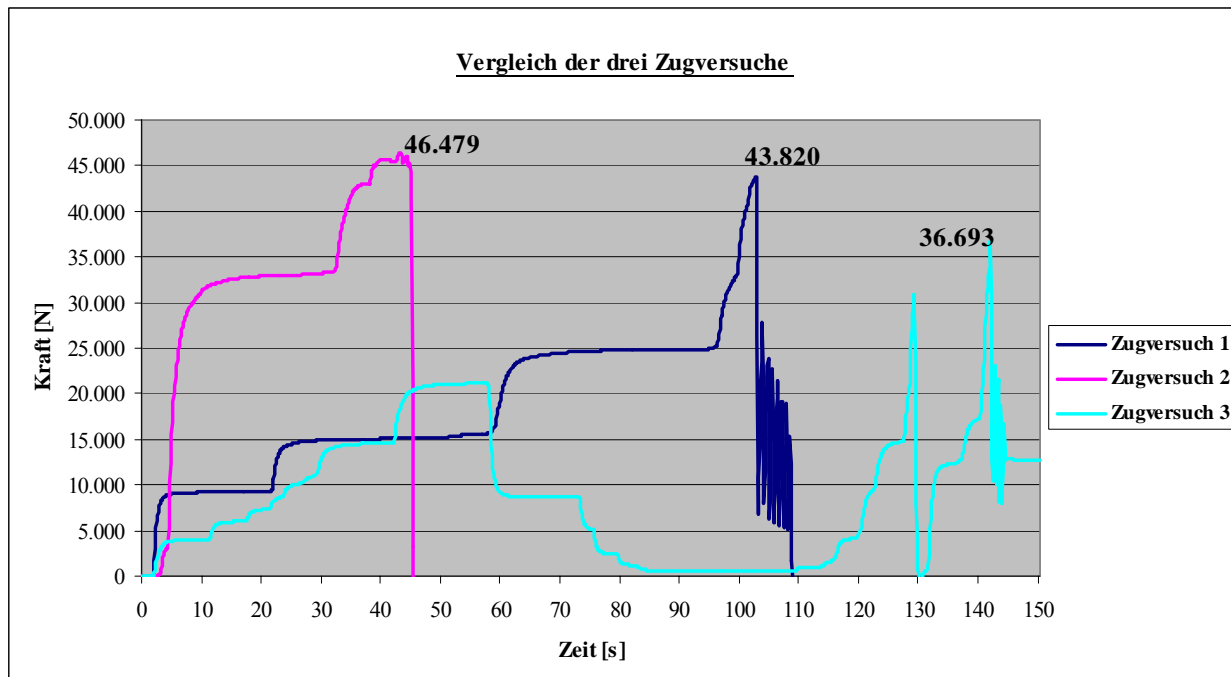


Abb. 5.12: Vergleich der drei Zugversuche

Abb. 5.12 zeigt einen Vergleich der drei durchgeführten Zugversuche, mit Angabe der maximal erreichten Bruchkräfte. Dabei ist anzumerken, dass die Höchstkraft bei Zugversuch Nr. 2 erreicht werden konnte, bei welchem es zu einem Versagen des Aramidstabes gekommen ist. Die Zugversuche Nr. 1 und Nr. 3 mussten bereits bei geringeren Kräften abgebrochen werden, da die Verklebung des Aramidstabes in den Gewindehülsen zuvor versagten.

Das heißt eine Verallgemeinerung auf alle Stäbe ist nicht durchführbar, da es sich bei Probe Nr. 2 auch um einen Ausreißer handeln kann. Dennoch muss angemerkt werden, dass die Bruchkraft dieses Stabes nur etwa 75 % der laut Firmendatenblatt angegebenen Bruchkraft von 61 kN erreicht hat.

Tab. 5.6: Überblick 1: Ergebnisse der drei Zugversuche

ÜBERBLICK 1: ERGEBNISSE DER DREI ZUGVERSUCHE				
Probe		Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3
Bruchkraft [N]		43.820	46.479	36.693
Versagen	Verklebung in der Gewindehülse	ja	-	ja
	Aramidstab	-	ja	-

1. Dehnung:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}; \quad \left[\frac{\text{mm}}{\text{mm}} \right] \quad (14)$$

Auswertung der Dehnung für die Spannungs- Dehnungs- Diagramme:

- Wegaufnehmer „3“
 - Wegaufnehmer „4“
- } Mittelwert der Dehnung

2. Spannung

$$\sigma = \frac{F}{A}; \quad \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right] \quad (15)$$

3. Elastizitätsmodul

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}; \quad \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right] \quad (16)$$

Folgende Formelzeichen wurden für die Formeln (14) bis (16) verwendet:

- Δl = absolute Längenänderung; Messung mit Wegaufnehmern
- l_0 = Bezugslänge ($l_0 = 200\text{mm}$)
- F = aufgebrachte Kraft
- A = Fläche des Aramidstabes ($A = 44\text{mm}^2$)

Mithilfe dieses Formelapparates werden die drei Zugversuche in Diagrammen dargestellt und analysiert.

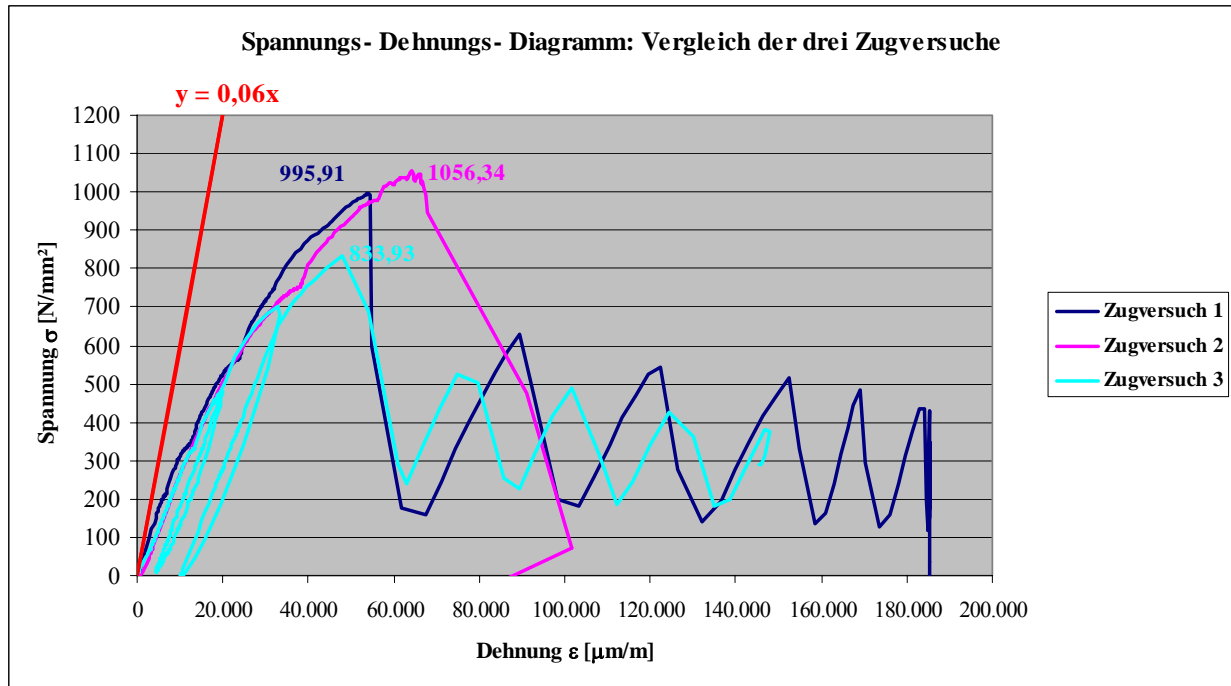


Abb. 5.13: Spannungs- Dehnungs- Diagramm: Vergleich der drei Zugversuche

Abb. 5.13 zeigt den Vergleich des Spannungs- Dehnungs- Diagramms aller drei Versuche. Hier wird deutlich, dass der E- Modul der drei Proben nicht an die Firmenangaben von 60.000 N/mm² herankommt. Die rot dargestellte Gerade gibt jene Steigung an, welche ein Werkstoff mit einem Elastizitätsmodul von 60.000 N/mm² haben müsste.

Tab. 5.7 zeigt eine Gegenüberstellung, der wichtigsten Daten aus dem Diagramm in Abb. 5.13. Dabei wird auch deutlich, dass beim Versuch Nr.2, bei welchem es zu einem Versagen des Aramidstabes gekommen ist, die Bruchspannung nicht an die Zugfestigkeit lt. Firmenangaben von 1400 N/mm² herankommt. Die Werte von Versuch Nr. 1 und Nr.3 können hier nicht mit der Zugfestigkeit verglichen werden, da in beiden Fällen der Epoxykleber in der Gewindehülse zuvor versagt hat.

Tab. 5.7: Überblick 2: Ergebnisse der drei Zugversuche

ÜBERBLICK 2: ERGEBNISSE DER DREI ZUGVERSUCHE				
Probe		Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3
Bruchkraft [N]		43.820	46.479	36.693
Bruchspannung [N/mm ²]		995,91	1.056,34	833,93
Bruchdehnung [%]		6,44	4,78	5,41
Versagen	Verklebung in der Gewindehülse	ja	-	ja
	Aramidstab	-	ja	-

Nach diesem allgemeinen Überblick über die Ergebnisse der Zugversuche, folgen detaillierte Darstellungen und Auswertungen für jeden der drei Zugversuche.

5.3.4.1. Zugversuch Nr. 1

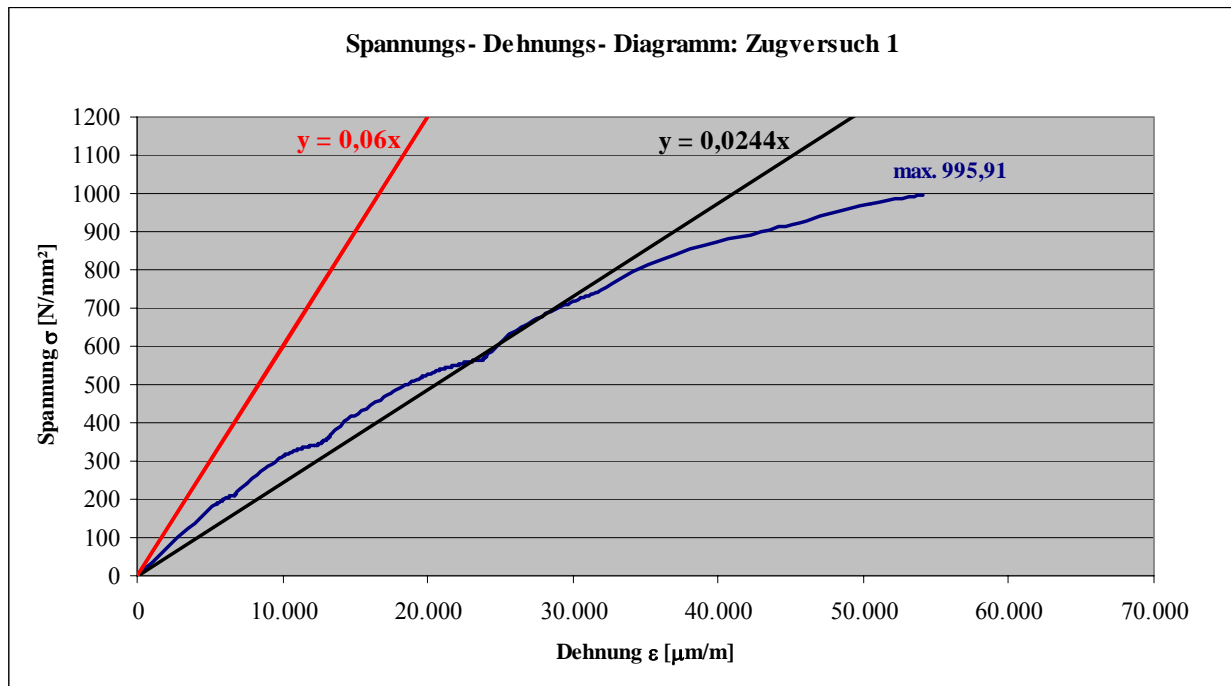
Auswertung - Elastizitätsmodul:


Abb. 5.14: Spannungs-Dehnungs-Diagramm: Zugversuch 1

In Abb. 5.14 wird der erste Zugversuch mittels eines Spannungs-Dehnungs-Diagramms analysiert. Dabei stellt die schwarze Gerade die Trendlinie für den Elastizitätsmodul des Aramidstabes dar. Die rote Trendlinie gibt die Steigung des Elastizitätsmoduls, wenn dieser den Wert der Firmenangaben entsprechen würden. Auch aus diesem Diagramm wird deutlich, dass die tatsächliche Steigung, laut Versuchsdurchführung, stark von den Firmenangaben abweicht.

1. Elastizitätsmodul – Versuchsauswertung
 - Gleichung der Geraden: $y = 0,0244 * x$
 - Elastizitätsmodul: 24.400 N/mm^2

2. Elastizitätsmodul – Firmenangaben
 - Gleichung der Geraden: $y = 0,06 * x$
 - Elastizitätsmodul: 60.000 N/mm^2

Dokumentation der Versagensart:

Bei diesem Zugversuch kam es durch die Verklebung des Aramidstabes in der Gewindehülse zum versagen. Die Verklebung mittels Epoxykleber versagte bei einer Kraft von 43,82 kN und zog den Stab um ca. 6cm aus der Gewindehülse. (siehe auch Versagen der Probe 3: Kap. 5.3.4.3)

5.3.4.2. Zugversuch Nr. 2

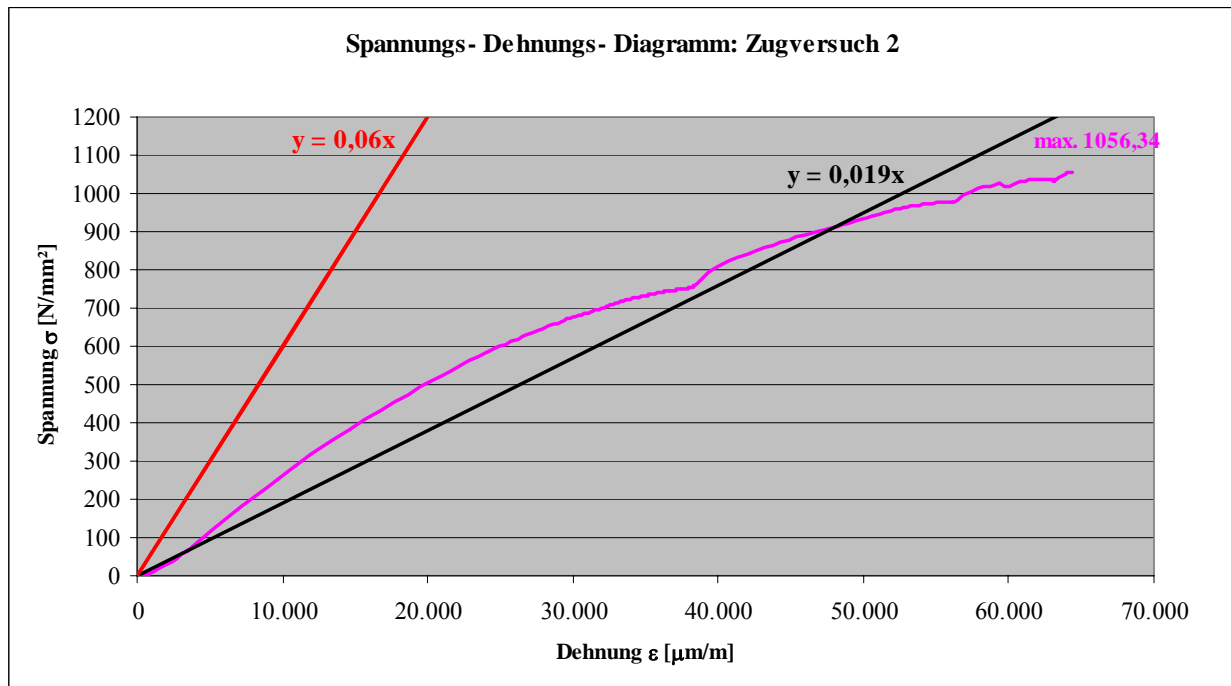
Auswertung - Elastizitätsmodul:

Abb. 5.15: Spannungs- Dehnungs- Diagramm: Zugversuch 2

In Abb. 5.15 wird der zweite Zugversuch ebenfalls mit einem Spannungs- Dehnungs- Diagramms analysiert. Auch hier gibt die schwarze Trendlinie die Steigung des Elastizitätsmoduls aus dem Zugversuch Nr. 2 an. Im Vergleich dazu, stellt die rote Trendlinie wieder die Steigung des Elastizitätsmoduls lt. Firmenangaben dar. Bei diesem Zugversuch gibt es die größte Abweichung zwischen den beiden Trendlinien.

1. Elastizitätsmodul – Versuchsauswertung

- Gleichung der Geraden: $y = 0,019 * x$
- Elastizitätsmodul: 19.000 N/mm²

2. Elastizitätsmodul – Firmenangaben

- Gleichung der Geraden: $y = 0,06 * x$
- Elastizitätsmodul: 60.000 N/mm²

Dokumentation der Versagensart:

Beim zweiten Zugversuch kam es zu einer Zerstörung des Aramidstabes. Dieser Aramidstab, mit einer Stärke von 5,5 mm, konnte nur eine Bruchkraft von etwa 46 kN aufnehmen, was nur 75% der laut Firmenangaben angegebenen Werte entspricht.

Abb. 5.16 zeigt zwei Darstellungen des gerissenen Aramidstabes, wobei hier der sehr faserige Bruch des Stabes deutlich zu erkennen ist. Des Weiteren ist der Matrixverbund innerhalb des Aramidstabes nicht mehr gegeben, was aus der Ablösung der langen Fasern untereinander deutlich zu erkennen ist.



Abb. 5.16: Darstellungen des gerissenen Aramidstabes

5.3.4.3. Zugversuch Nr. 3

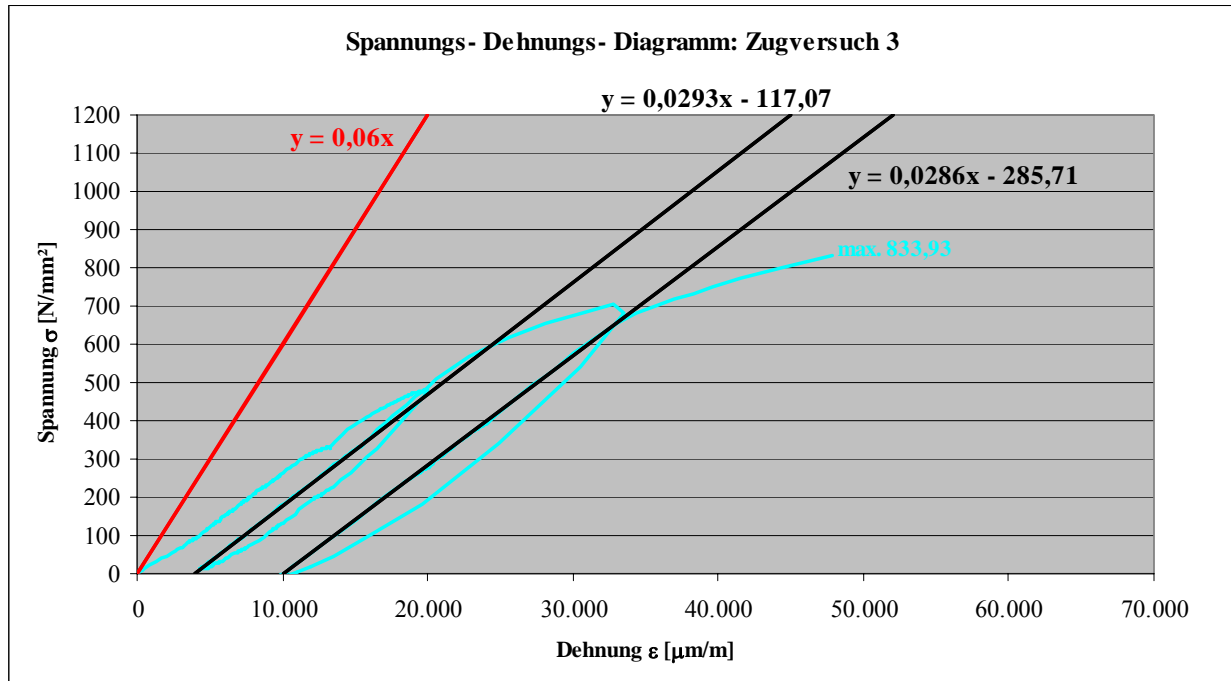
Auswertung - Elastizitätsmodul:

Abb. 5.17: Spannungs-Dehnungs-Diagramm: Zugversuch 3

Auch der dritte Zugversuch wird mithilfe eines Spannungs-Dehnungs-Diagramms in Abb. 5.17 dargestellt. Bei diesem Zugversuch gab es einen Zyklus aus Be- und Entlastung, was aus Abb. 5.12 abzulesen ist. Deshalb wird bei diesem Versuch der Belastungszyklus 2 und 3 separat in einem Spannungs-Dehnungs-Diagramm dargestellt. Bei diesem Versuch werden in Abb. 5.17 nur über die Anfangsbereiche der Belastungszyklen Trendlinien gelegt.

1. Elastizitätsmodul – Versuchsauswertung – Anfangsbereich des ersten Belastungszyklus
 - Elastizitätsmodul: 29.300 N/mm²
2. Elastizitätsmodul – Versuchsauswertung – Anfangsbereich des zweiten Belastungszyklus
 - Elastizitätsmodul: 28.600 N/mm²
3. Elastizitätsmodul – Firmenangaben
 - Gleichung der Geraden: $y = 0,06 * x$
 - Elastizitätsmodul: 60.000 N/mm²

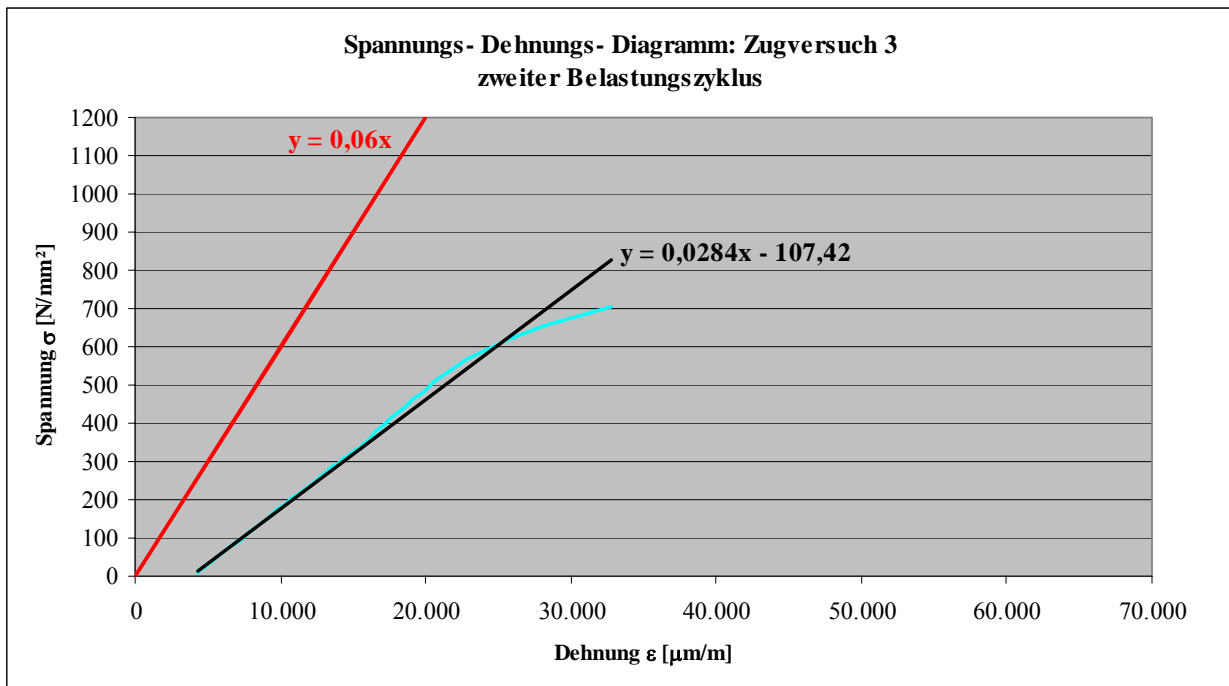


Abb. 5.18: Spannungs- Dehnungs- Diagramm: Zugversuch , zweiter Belastungszyklus

1. Elastizitätsmodul – Versuchsauswertung – zweiter Belastungszyklus

- Gleichung der Geraden: $y = 0,0284 * x - 107,42$
- Elastizitätsmodul: 28.400 N/mm^2

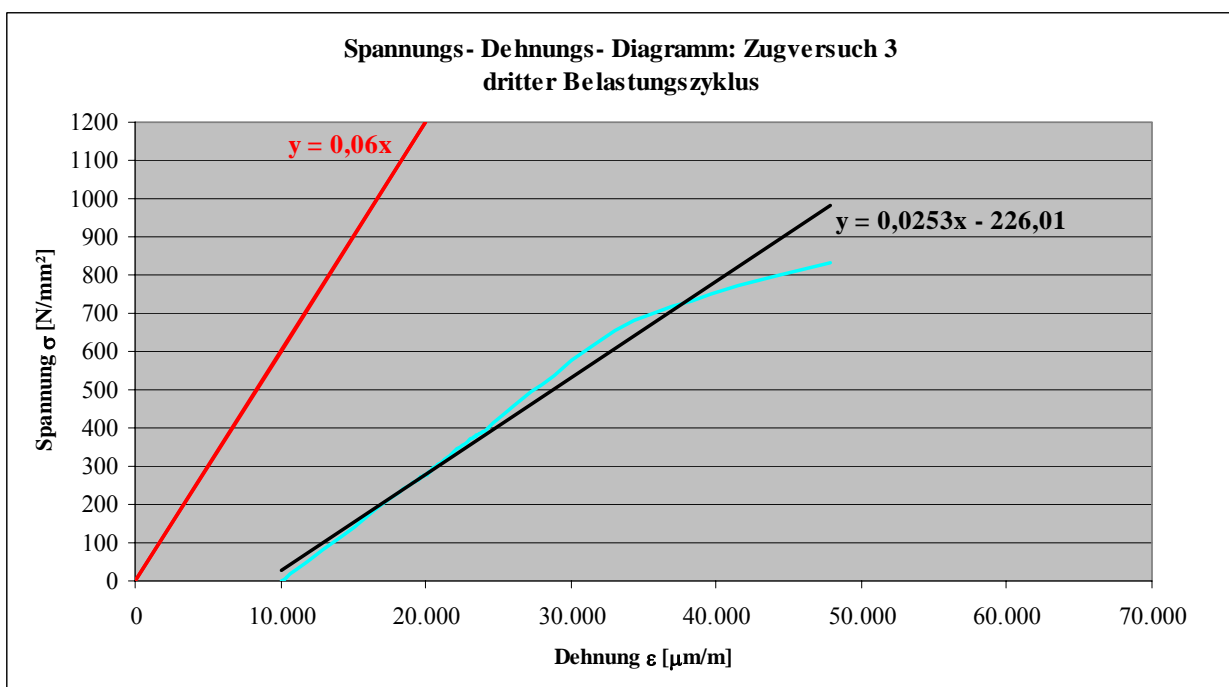


Abb. 5.19: Spannungs- Dehnungs- Diagramm: Zugversuch , dritter Belastungszyklus

1. Elastizitätsmodul – Versuchsauswertung – dritter Belastungszyklus

- Gleichung der Geraden: $y = 0,0253 * x - 226,01$
- Elastizitätsmodul: 25.300 N/mm²

In Abb. 5.18 und Abb. 5.19 wird deutlich, dass bei einer separaten Auswertung der Belastungszyklen die Neigung der Gerade zwar steigt, jedoch auch hier nicht den Elastizitätsmodul von 60.000 N/mm² lt. Firmenangaben erreicht.

Dokumentation der Versagensart:

Beim letzten Zugversuch kam es wiederum zum Versagen des Epoxyklebers in der Gewindehülse. Für den Zugversuch Nr. 3 zeigt Abb. 5.20 den Aramidstab, der aus der Gewindehülse um ca. 3 cm herausgezogen wurde. Die selber Versagensart wurde auch beim Zugversuch „1“ festgestellt.

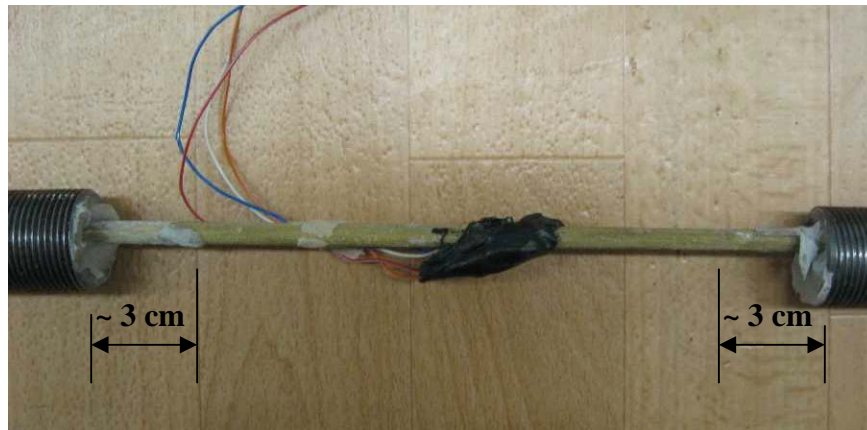


Abb. 5.20: Probe Nr. 3; Versagen des Epoxyklebers in der Gewindehülse

5.4. Ausziehversuche an einem gründerzeitlichen Bestandsmauerwerk im Keller der TU-Wien

5.4.1. Allgemeines

Den Kernbereich der Forschungsarbeit für diese Diplomarbeit bildet der Ausziehversuch von Aramidstäben an einem Mauerwerk der TU- Wien. Bei der Durchführung dieses Versuches unterstützten uns Mitarbeiter der Firma Porr AG, unter Leitung von Herrn Ing. Hartl Martin.

5.4.2. Vorbereitungen für den Ausziehversuch

Bevor der eigentliche Ausziehversuch durchgeführt werden konnte, mussten einige Vorbereitungen getroffen werden. Das Ablaufschema dieser Vorbereitungen ist in Abb. 5.21 dargestellt und wird anschließend anhand von Grafiken erläutert.

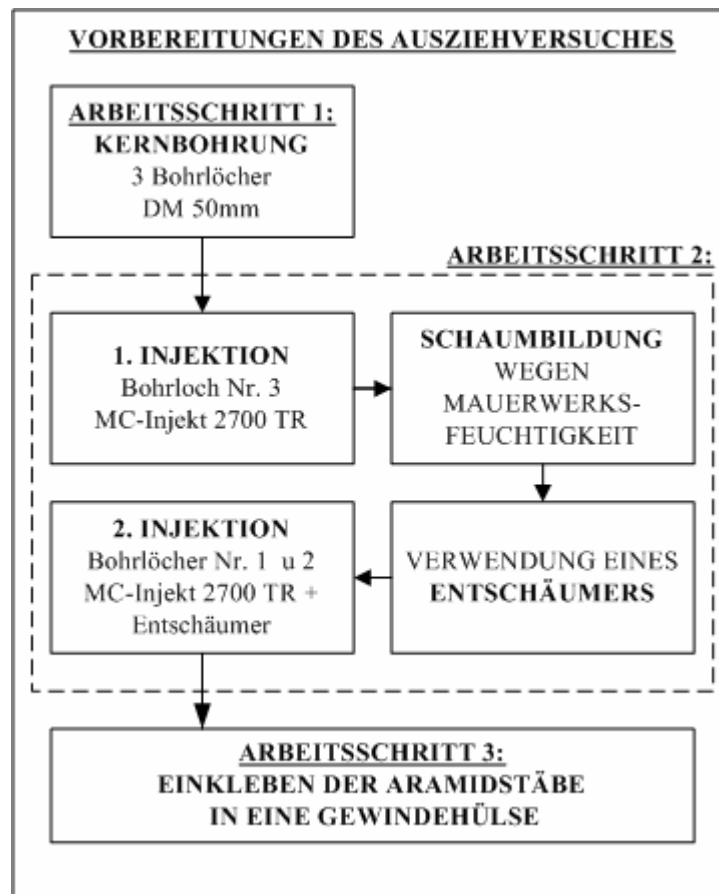


Abb. 5.21: Ablauf der Vorbereitungen für den Ausziehversuch

ARBEITSSCHRITT 1: KERNBOHRUNGEN

Insgesamt wurden drei Kernbohrungen mit einem Durchmesser von 50mm an einem Kellermauerwerk der TU- Wien hergestellt. Diese Arbeiten wurden von zwei Mitarbeitern der Firma Porr durchgeführt.

Gerät: Kernbohrgerät der Firma HILTI DD 160 E (siehe Abb. 5.22)



Abb. 5.22: Kernbohrungen; Nummerierung der drei Bohrlöcher

In der Abb. 5.22, rechts unten, sind die drei hergestellten Bohrlöcher dargestellt und nummeriert. Diese Nummerierung ist für die folgenden Erläuterungen und für die Dokumentation der Ergebnisse von Bedeutung. Die Bohrlöcher haben eine Länge von etwa 1,20m. Abb. 5.23 zeigt noch einmal eine detailliertere Darstellung eines Bohrloches.

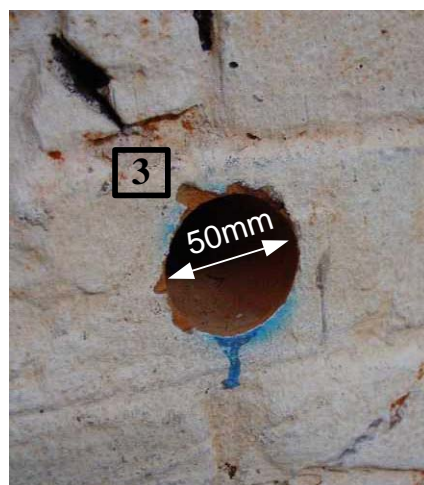


Abb. 5.23: detaillierte Darstellung des Bohrloches Nr. "3"

ARBEITSSCHRITT 2: INJIZIEREN DER ARAMIDSTÄBE IM MAUERWERK MITTELS INJEKTIONSHARZ

Nachdem die Kernbohrungen erfolgreich geteuft wurden, konnte der zweite Schritt in der Vorbereitung der Versuche beginnen. Bei diesem Arbeitsschritt wurden jeweils drei Aramidstäbe in ein Bohrloch eingebracht und anschließend mit dem Injektionsharz MC-Injekt 2700TR der Firma MC-Bauchemie verpresst. Die Firmenangaben über die mechanischen Eigenschaften der Aramidstäbe wurden bereits im Kap. 5.3.2 angeführt. Die Produkteigenschaften des Injektionsharzes **MC-Injekt 2700TR** wurden aus den Firmenangaben entnommen und in Tab. 5.8 zusammengefasst.

Tab. 5.8: MC- Injekt 2700 TR; Überblick der Eigenschaften laut Firmendatenblatt [22]

MC- INJEKT 2700 TR				
ÜBERBLICK DER EIGENSCHAFTEN LAUT FIRMENDATENBLATT				
PRODUKTEIGEN-SCHAFTEN	* Lösemittelfreies, niedrigviskoses Duomerharz auf Polyurethanbasis			
	* Kurze Reaktionszeit			
	* Zähelastisch fest im ausreagiertem Zustand			
	* schäumt in Mischung mit Wasser begrenzt auf			
	* erfüllt KTW-Prüfgruppe C (Einbauteile)			
	* erfüllt Anforderungen des DIBt-Merkblattes "Bewertung und Auswirkung von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser			
	* Farbe: braun			
	* besteht aus zwei Komponenten: Komponente A: Stamm; Komponente B: Härter			
	* Möglichkeit der Zugabe von Beschleunigern und Additive um die Reaktionsgeschwindigkeit und die Eigenschaften des reagierenden bzw. ausreagierenden Produktes zu beeinflussen			
TECHNISCHE EIGENSCHAFTEN	Kenngröße	Einheit	Wert	Bemerkungen
	Dichte	g/cm ³	1,13	DIN 53 479 bei 20°C und 50 % rel. Luftfeuchte
	Viskosität	mPa*s	200 ± 50	DIN EN ISO 3219 bei 20°C und 50 % rel. Luftfeuchte
	Mischungsverhältnis	Volumentteile	1:1	Komp. A : Komp. B
	Topfzeit	min	10	bei 20°C und 50 % rel. Luftfeuchte
	Niedrigste Anwendungstemperatur	°C	+ 6	Bauteiltemperatur
	Druckfestigkeit	N/mm ²	40	DIN EN 196 T 1 bei 20°C und 50 % rel. Luftfeuchte
	Schrägscherfestigkeit	N/mm ²	13,3	BS 6319, Teil 4
	Biegezugfestigkeit	N/mm ²	3,5	DIN EN 196 T 1 bei 20°C und 50 % rel. Luftfeuchte
	Shore A-Härte		ca. 90	DIN 53 505 bei 20°C und 50 % rel. Luftfeuchte
Volumenvergrößerung mit Wasser		1-10 fach	abhängig vom Gegendruck	



Abb. 5.24: [A] Zwei – Komponenten Injektionsharz; [B] Injizieren der Bohrlöcher

Der exakte Ablauf des Injiziervorgangs lautete:

1. Vorbereiten des Injektionsharzes: die zwei Komponenten des Injektionsharzes wurden in Plastikkartuschen getrennt im Mischungsverhältnis 1:1 eingefüllt (siehe Abb. 5.24 [A])
2. Einfädeln der drei Aramidstäbe in das Bohrloch
3. Injizieren des Harzes mittels einer druckluftbetriebenen Handpresse (siehe Abb. 5.24 [B]); während des Injiziervorganges vermischen sich die Komponenten A (Stamm) und B (Härter);



Abb. 5.25: Darstellung des schäumenden Injektionsharzes

Probleme bei der Injektion des Bohrloches mit der Nummer „3“:

Aus Abb. 5.21 geht hervor, dass es zwei Injektionsschritte bei den Vorbereitungen gegeben hat. Der Grund dafür liegt in der stark schäumenden Reaktion des Injektionsharzes bei Kontakt mit Feuchtigkeit. Nach Abschluss der ersten Injektion, bei Bohrloch Nummer „3“, wurden die Arbeiten abgebrochen. Es wurde beschlossen Bohrloch „1“ und „2“ mittels Zugabe eines Entschäumers zu injizieren. In Abb. 5.25 kann man die aufschäumende Wirkung des Injektionsharzes sehr deutlich erkennen.

ARBEITSSCHRITT 3: EINKLEBEN DER ARAMIDSTÄBE IN EINE GEWINDEHÜLSE

Damit der Ausziehversuch durchführbar ist, mussten zuvor die drei Aramidstäbe je Bohrloch in eine Gewindehülse eingeklebt werden. Dadurch kann die Gewindehülse in den Prüfzylinder bzw. in den Kraftaufnehmer eingebracht werden.

Die Arbeitsschritte lassen sich folgendermaßen gliedern:

- Abkleben der Gewindehülse mit Klebeband
- Befüllen der Hülse mit Injektionsmaterial durch eine luftdruckbetriebene Handpresse (siehe Abb. 5.26 [A])
- Aufschieben der Gewindehülse auf die, aus der Wand stehenden, Aramidstäbe



Abb. 5.26: [A] Befüllen der Gewindehülse mit Injektionsmaterial; [B] Darstellung der drei nachträglich angebrachten Gewindehülsen

5.4.3. Der Ausziehversuch

Nachdem alle zuvor beschriebenen Vorbereitungen erfolgreich durchgeführt wurden, konnte mit dem Aufbau des Versuches begonnen werden. Generell wird die anschließende Dokumentation in zwei Bereiche gegliedert:

- VERSUCHSREIHE 1:
 - Verwendung des Injektionsharzes **MC-Injekt 2700TR**
 - Auswertung nicht möglich, da die Gewindehülse abgezogen wurde

- VERSUCHSREIHE 2:
 - Verwendung des Epoxykleber **S&P Resin 220**, zur Verklebung der Gewindehülsen
 - Verwendung von Gewindehülsen mit Innengewinde
 - Auswertung der drei Ausziehversuche (siehe Kap. 5.4.4)

Für den Ausziehversuch wurden folgende Geräte verwendet:

- Prüfzylinder (ENERPAC); Betrieb mittels hydraulischer Presse
- Kraftaufnehmer (Daten siehe 5.2.2.3)
- zwei Wegaufnehmer
- Hilfsgeräte: U- Profile, Stahlplatten, Muttern

VERSUCHSREIHE 1:

Bei der ersten Versuchreihe wurden die Geräte nach dem Schema der Abb. 5.27 aufgebaut.

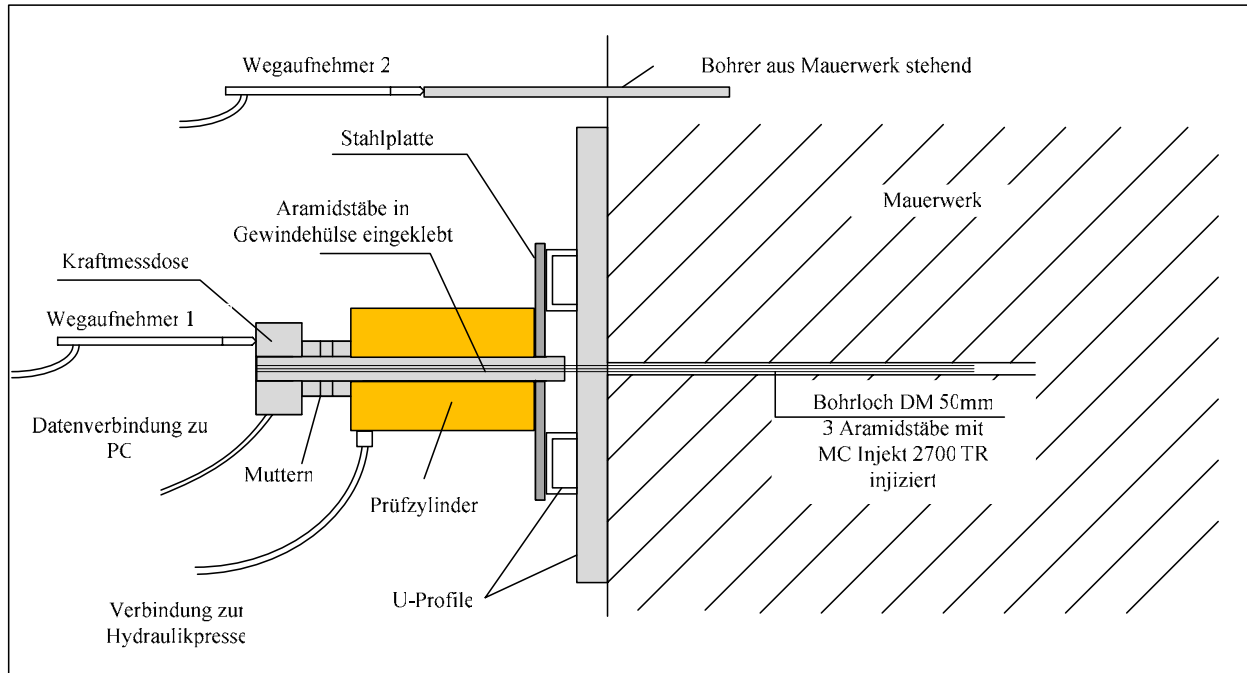


Abb. 5.27: Schema des Versuchsaufbau; Versuchsreihe „1“

Abb. 5.28 zeigt Fotos zum Aufbau des Versuchs nach dem Schema von Abb. 5.27. Nach erfolgreichem Aufbau der Geräte konnte mit der Kraftaufbringung begonnen werden. Die Kraft wurde über den Prüfzylinder mittels einer hydraulischen Presse aufgebracht. Die am Ende angebrachte Kraftmessdose wird zur Messung der aufgetragenen Kraft herangezogen und ist direkt mit dem PC über ein Datenkabel verbunden. Die Wegaufnehmer bei der Versuchsreihe „1“ wurden nach dem Schema von Abb. 5.27 angebracht. Der Versuch musste jedoch nach kurzer Belastung abgebrochen werden, da bereits bei einer Kraft von etwa 5,0 kN die Gewindehülse abgezogen wurde.



Abb. 5.28: Zwei Darstellungen vom Versuchsaufbau

Mögliche Ursachen für dieses Versagen können folgendermaßen begründet werden:

- fehlende Haftung der Verklebung aufgrund der glatten Oberfläche des Gewindestabes
- schlechte Kraftübertragung des Injektionsharzes, welche auch durch die poröse Struktur des Klebers zu erklären wäre



Abb. 5.29: Poröse Struktur des Injektionsharzes

Resümee der Versuchsreihe 1:

Aufgrund der oben angeführten möglichen Ursachen für das Versagen wurden für die nachfolgende Versuchsreihe 2 folgende Änderungen vorgenommen:

- Verwendung eines Epoxykleber für die Verklebung der Gewindehülsen
- Bearbeiten der Gewindehülse: Um eine bessere Verzahnung des Klebers bei der Kraftübertragung zu bewirken, wurden in die bestehenden Gewindehülsen Innengewinde eingeschnitten

VERSUCHSREIHE 2:

Neuerliches Einkleben der Gewindehülsen:

Zu Beginn werden die Eigenschaften des neu verwendeten Epoxylebers in Tab. 5.9 zusammengestellt. Mithilfe dieses neuen Klebers wurden die Gewindehülsen, die mit einem Innengewinde versehen wurden, neu angeklebt. Der Ablauf der Klebung folgte im Wesentlichen dem der ersten Versuchsreihe. (siehe Kap. 5.4.2, Arbeitsschritt 3)

Tab. 5.9: S&P Resin 220 Epoxyleber; Überblick der Eigenschaften laut Firmendatenblatt [31]

S&P Resin 220 Epoxyleber ÜBERBLICK DER EIGENSCHAFTEN LAUT FIRMENDATENBLATT				
PRODUKT-EIGENSCHAFTEN	* Zwei - Komponentenkleber auf Epoxidharzbasis			
	* lösungsmittelfreier, thixotroper, grauer Zwei - Komponentenkleber			
	* speziell entwickelt für die kraftschlüssige Verklebung von Kohlefaserlamellen			
	* Vorteile: verarbeitungsfertig (keine Füllstoffe); verarbeitungsfreundliche Topfzeit; hohe Klebekraft und Haftfestigkeit, hohe mechanische Eigenschaften; schwindminimiertes Aushärten;			
	* Verarbeitung: Komponenten getrennt aufrühren; dannach Komp. B der Komp. A zugeben und gründlich mischen; niedertourig (< 400U/min) mischen, um möglichst wenig Luft einzurühren			
	* max. Untergrundfeuchte: 4 %			
TECHNISCHE EIGENSCHAFTEN	Kenngröße	Einheit	Wert	Bemerkungen
	Dichte	g/cm ³	1,75 1,75	Komponente A Komponente B
	Farbe		hellgrau schwarz	Komponente A Komponente B
	Mischungsverhältnis	Volumenteile Gewichtsteile	4:1 4:1	Komponente A: Komponente B
	Topfzeit	°C	+10 +20 +30	~ 90 Minuten ~ 60 Minuten ~ 30 Minuten
	Druckfestigkeit	N/mm ²	> 90	
	Biegezugfestigkeit	N/mm ²	> 30	
	Verarbeitungstemperatur	°C	+ 10 bis + 35	
	Untergrundtemperatur			mind. 3° C über Taupunkttemperatur

Nach erfolgter Aushärtung des Epoxylebers konnte mit einem neuerlichen Versuchsaufbau für die Versuchsreihe „2“ begonnen werden. Der Aufbau wurde, im Bezug auf die Positionierung der Wegaufnehmer, leicht verändert und ist in Abb. 5.30 dargestellt.

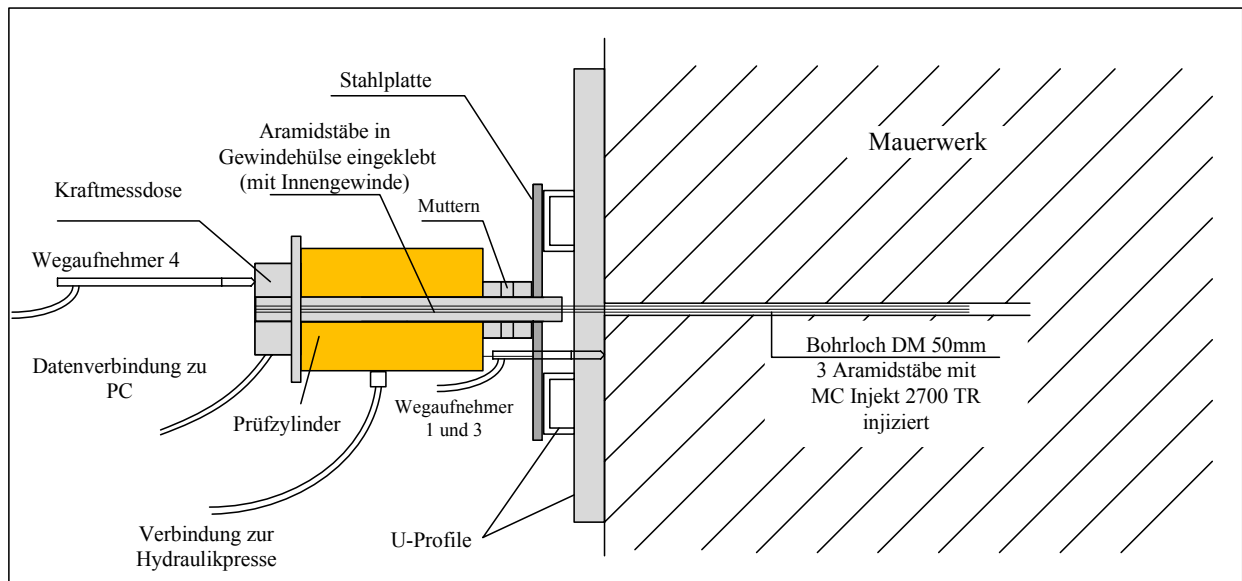


Abb. 5.30: Schema des Versuchsaufbau, Versuchsreihe „2“

Die Anordnung der Versuchsgeräte war bei allen drei Proben gleich, daher zeigt Abb. 5.31 nur eine Auswahl von Fotos des Versuches.



Abb. 5.31: Fotos des Versuchsaufbau

Wegaufnehmer:

Insgesamt wurden drei Wegaufnehmer verwendet, wobei zwei im direkten Kontakt zum Mauerwerk und einer im Kontakt zur Kraftmessdose platziert wurde.

Abb. 5.32 zeigt die genaue Distanzierung der Wegaufnehmer mit der Nummer „1“ und „3“ im Bezug auf die Aramidstäbe.

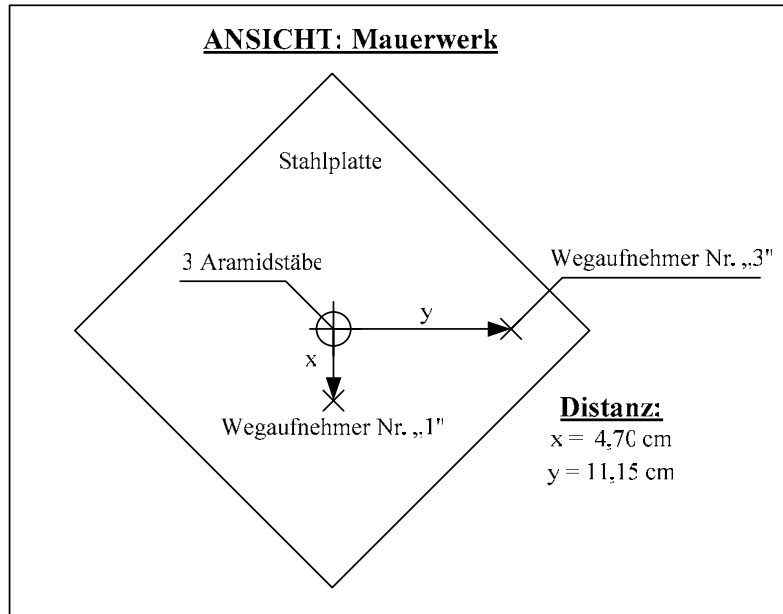


Abb. 5.32: Anordnung der Wegaufnehmer mit Angabe der Distanzen zu den Aramidstäben

5.4.4. Auswertung der Versuchsreihe „2“

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Versuchsreihe „2“ mithilfe von Diagrammen und Tabellen ausgewertet. Zu Beginn gibt es einen Überblick der Ergebnisse aller drei Proben, wobei die jeweiligen Ergebnisse auch miteinander verglichen werden. Im Anschluss daran folgen detaillierte Erläuterungen zu den einzelnen Versuchen.

Nachfolgend sind noch einmal die, für diesen Versuch wesentlichen, mechanischen Eigenschaften lt. [29] der Aramidstäbe mit der Stärke 5,5 mm zusammengefasst. Insgesamt wurden je Bohrloch drei Aramidstäbe injiziert und anschließend durch einen Ausziehversuch getestet.

Arapree Rod 5,5

Durchmesser	5,5mm
Fläche	23mm ²
Bruchlast	32 kN

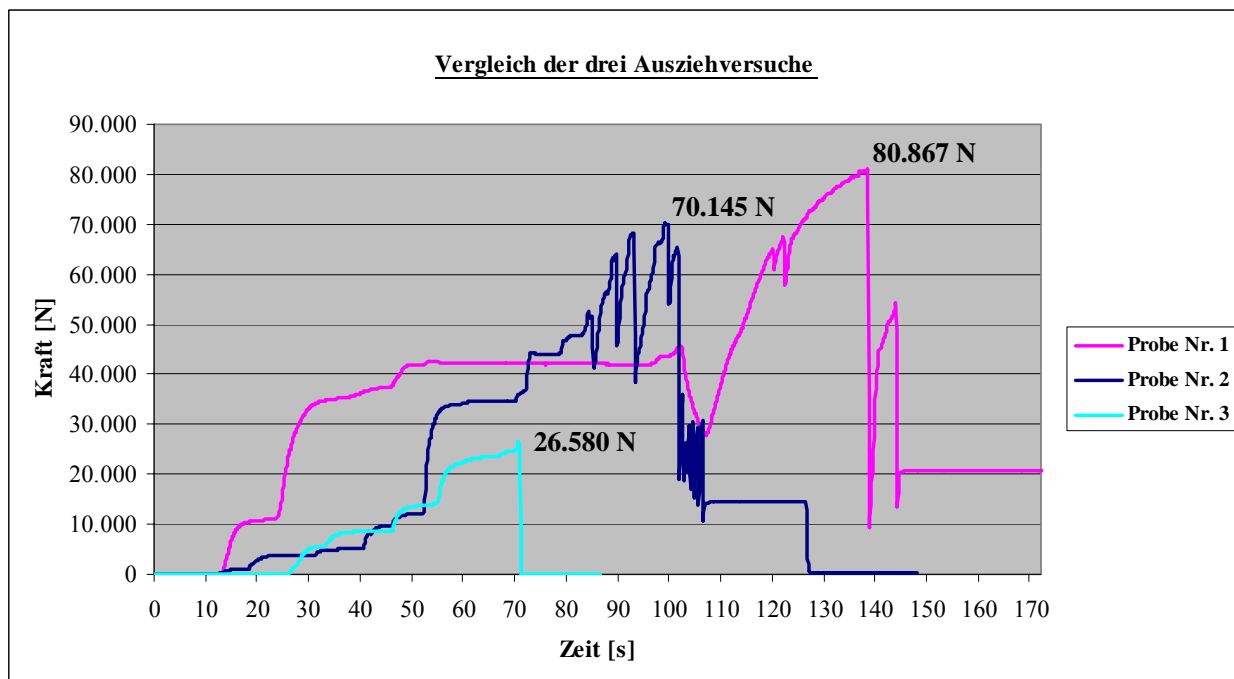


Abb. 5.33: Vergleich der drei Ausziehversuche

Dieses Diagramm (Abb. 5.33) stellt die Versuchsverläufe der drei Proben dar, wobei auf der x- Achse die Zeit und auf der y- Achse die aufgebrauchte Kraft dargestellt wird. Des Weiteren wird je Ausziehversuch die maximale Bruchkraft im Diagramm angegeben, um einen besseren Vergleich der drei Proben durchführen zu können. Erst dadurch werden die unterschiedlichen Versuchsergebnisse der drei Proben deutlich, wodurch eine Verallgemeinerung bei der Interpretation der Ergebnisse nicht möglich ist. Auch die Tatsache, dass es unterschiedliche Versagensmechanismen der einzelnen Proben gegeben hat, lässt eine Zusammenfassung der drei Ergebnisse nicht zu. Definitiv anzumerken ist, dass die Probe Nr. 3 auf jeden Fall ein Ausreißer sein muss, da hier alle drei Stäbe bei einer Kraft von nur ~ 27 kN gerissen sind.

Tab. 5.10: Überblick der Ergebnisse der drei Ausziehversuche

ÜBERBLICK DER ERGEBNISSE DER DREI AUSZIEHVERSUCHE				
Probe		Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3
Bruchkraft		80.867 N	70.145 N	26.580 N
Versagen	Ziegel	ja	ja	-
	Verklebung in der Gewindehülse	ja	ja	-
	Aramidstab	-	beginnendes Versagen eines Stabes	alle drei Aramidstäbe

Tab. 5.10 gibt einen Überblick der Ergebnisse der drei Ausziehversuche. Auch in dieser Tabelle wird deutlich, dass eine Verallgemeinerung nicht möglich ist, da es drei unterschiedliche Versagensarten bei den Versuchen gegeben hat. Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse und die Versagensarten der einzelnen Proben mittels Fotos und Diagrammen näher beschrieben.

5.4.4.1. Ausziehversuch Probe Nr. 1

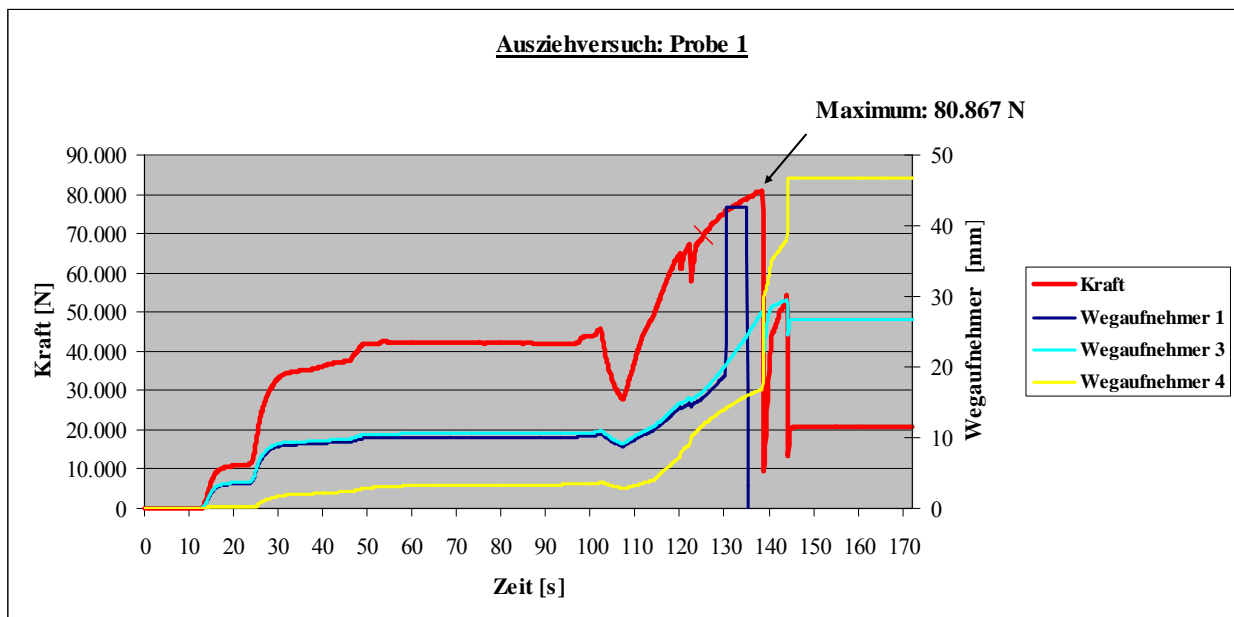


Abb. 5.34: Diagramm Ausziehversuch: Probe Nr.1

In Abb. 5.34 wird der erste Ausziehversuch mittels Diagramm analysiert. Dabei werden auf der x- Achse die Zeit und auf den y- Achsen, jeweils einmal die aufgebrachte Kraft und einmal die absolute Längenänderung der angebrachten Wegaufnehmer dargestellt.

Die Anordnung der Wegaufnehmer erfolgte lt. Abb. 5.32, wobei aus dem Diagramm deutlich wird, dass die Wegaufnehmer mit direktem Kontakt zum Mauerwerk (Nr. 1 und Nr. 3) von Beginn an größere Verformungen erfahren, als der Wegaufnehmer Nr. 4 mit Kontakt zur Kraftmessdose. Der Wegaufnehmer Nr. 1 war in der kürzesten Distanz zu den Aramidstäben angeordnet und erfährt bei etwa 70 kN eine deutliche Verformung. Dies ist möglicherweise darauf zurückzuführen, dass zu dieser Zeit der Beginn des Ziegelversagens eingesetzt haben dürfte.

Ebenfalls aus dem Diagramm ablesbar ist die Tatsache, dass die Wegaufnehmer immer die gleichen Änderungen (Anstieg – Abfall) erfahren, wie die aufgebrachte Kraft. Dies geht zum Beispiel deutlich aus dem Abfall Kraft bei etwa 105 sec. hervor. In diesem Bereich nehmen auch die gemessenen Verformungen deutlich ab. Der Anstieg des Wegaufnehmer Nr. 4 beim Versagen auf etwa 47mm kann nicht als die größte Verformungen angesehen werden, da es hier auch zu einer Verschiebung der Anordnung des Wegaufnehmers gekommen sein kann. Auch die Wegaufnehmer Nr. 1 und Nr. 3 sind nur bis zum Bereich von etwa 130 sec. aussagekräftig, danach kam es zum Versagen und möglicherweise auch zu einer Verschiebung der Wegaufnehmer.

Dokumentation der Versagensart:



Abb. 5.35: Zwei Darstellungen der Versagensart des Ausziehversuches: Probe Nr. 1

Mit dem ersten Ausziehversuch konnte die höchste Kraft, von etwa 80 kN, bei der Versuchsreihe „2“ erreicht werden.

Versagensarten:

1. Ziegel
Das Ziegelversagen beim Ausziehversuch Nr. 1 ist deutlich in Abb. 5.35 zu erkennen. In Bild [A] ist der Ausbruch des Ziegels an den Fugen deutlich zu erkennen. Der Ziegel ist dabei laut den Messungen der Wegaufnehmer, etwa 2 cm aus der Wand gezogen worden, was auch im Bild [B] leicht zu erkennen ist.

2. Epoxykleber in der Gewindehülse
Ein weiteres Versagen bei diesem Ausziehversuch war das Versagen des Epoxyklebers. Dabei wurde, wie bei der Versuchsreihe „1“, die Gewindehülse vom Aramidstab um etwa 4cm abgezogen.

5.4.4.2. Ausziehversuch Probe Nr. 2

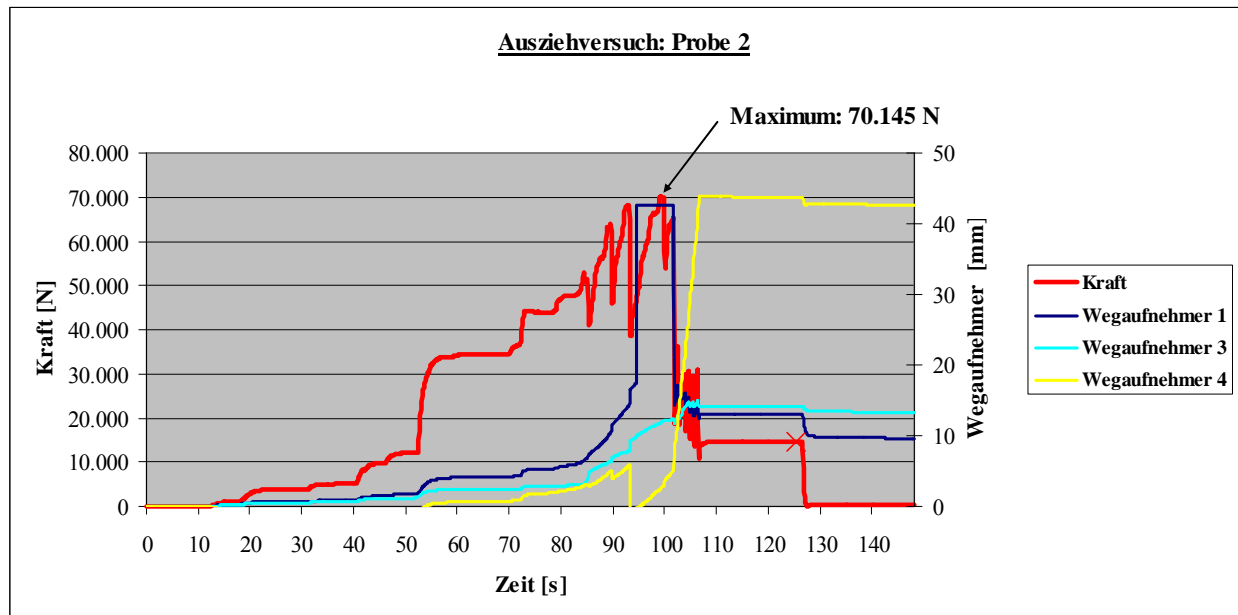


Abb. 5.36: Diagramm Ausziehversuch: Probe Nr. 2

Der zweite Ausziehversuch wird mithilfe von Abb. 5.36 analysiert. Die maximale Kraft bis zum Versagen beträgt in diesem Versuch nur mehr ca. 70 kN. Auch bei diesem Beispiel zeigt sich, die von Beginn an größere Verformung der Wegaufnehmer mit direktem Kontakt zum Mauerwerk. Bei der Probe Nr. 2 ist anzumerken, dass die Verformungen vor dem Versagen geringer ausfallen, als bei der Probe Nr. 1. Dies lässt sich aus der Tatsache erkennen, dass bei der Probe Nr. 2 in Bereich zwischen 40 - 45 kN eine Verformung von knapp über 5mm und bei der Probe Nr. 1 in diesem Bereich bereits eine Verformung von 10 mm am Mauerwerk gemessen wurde. Auch bei diesem Diagramm wird die Affinität, was Anstieg und Abfall der Kurven betrifft, zwischen der aufgebrachten Kraft und der gemessenen Verformung deutlich. Grundsätzlich kann man die Daten der Wegaufnehmer bis zum Bereich von etwa 95 sec. für die Analyse verwenden, danach kam es mit ziemlicher Sicherheit wieder zu einer Verschiebung der Wegaufnehmer, was man aus den plötzlichen und deutlichen Anstiegen ablesen kann.

Dokumentation der Versagensart:



Abb. 5.37: Zwei Darstellungen der Versagensart des Ausziehversuches: Probe Nr. 2

Versagensarten:

1. Ziegel
Auch bei dieser Probe wird der Ziegelausbruch entlang der Fugen deutlich. Wie schon zuvor erwähnt, wurden jedoch bei dieser Probe geringere Verformungen am Mauerwerk gemessen. Bei dieser Probe ist auch ein leichtes Ausbrechen des Injektionsharzes an der Fuge zwischen Bohrlochwand und Mauerwerk zu erkennen.

2. Epoxykleber in der Gewindehülse
Auch bei dieser Probe wurde die Gewindehülse, durch das Versagen der Verklebung mittels Epoxykleber, um einige cm abgezogen.

3. Aramidstab
In Abb. 5.37 [B] ist auch die Ablösung eines Aramidstabes vom Dreierbündel zu erkennen. Bei diesem Aramidstab wurde auch ein beginnendes Faserreißen festgestellt. Eine mögliche Erklärung für dieses beginnende Versagen ist, dass dieser Stab durch die frühzeitige Ablösung aus dem Dreierbündel, mehr Kraft als die anderen erhalten haben muss.

5.4.4.3. Ausziehversuch Probe Nr. 3

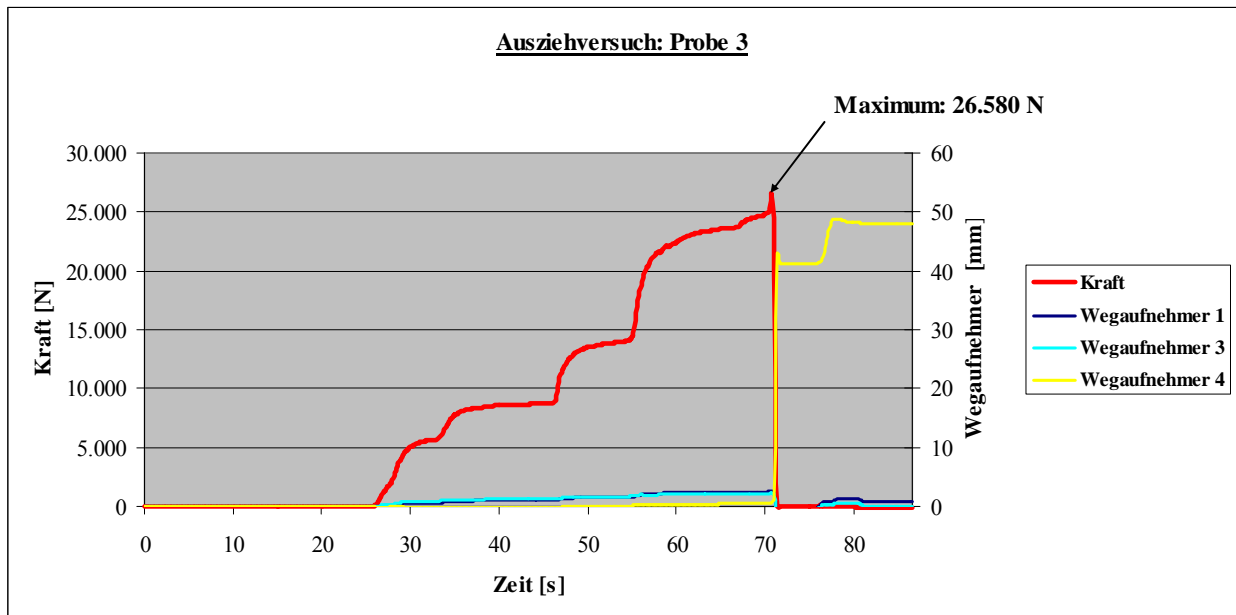


Abb. 5.38: Diagramm Ausziehversuch: Probe Nr. 3

Dieser Ausziehversuch der Probe Nr. 3 lieferte ein außergewöhnliches und nicht erwartetes Ergebnis. Statistisch gesehen muss es sich bei dieser Probe definitiv um einen Ausreißer handeln, da alle drei Aramidstäbe bei einer Kraft von nur ~ 26 kN gerissen sind. Laut den Firmenangaben [31] müsste jedoch nur ein Stab alleine schon eine Kraft von 32 kN aushalten können.

Aufgrund dieses geringen Lastbereiches sind auch die gemessenen Verformungen am Mauerwerk lt. Abb. 5.38 sehr gering.

Eine weitere Analyse dieser Probe wäre wenig sinnvoll, weil man dieses Ergebnis ohne weitere Tests nicht auf alle Aramidstäbe beziehen kann. Daher wird an dieser Stelle auf weitere Vergleiche, bezüglich Wegaufnehmer und aufgebrachte Kraft, mit den anderen Proben verzichtet.

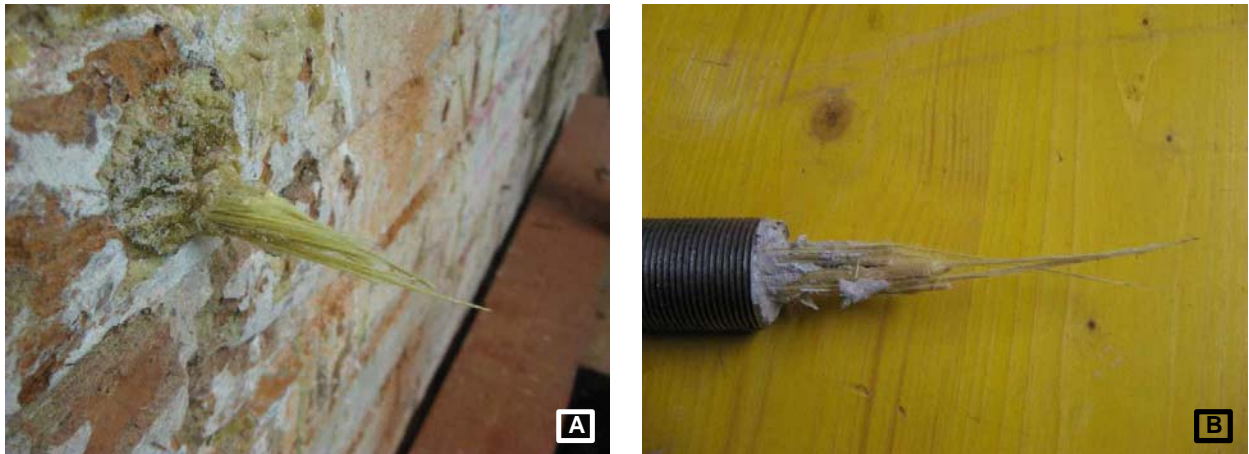
Dokumentation der Versagensart:

Abb. 5.39: Zwei Darstellungen der Versagensart des Ausziehversuches: Probe Nr. 3

Versagensarten:

1. alle drei Aramidstäbe

Wie bereits erwähnt, muss es sich bei dieser Probe um einen Ausreißer handeln. Dennoch wird hier kurz der Versagensmechanismus dieser Probe dokumentiert. Nur bei einer Kraft von ~ 26 kN kam es zum Bruch der drei Aramidstäbe. Der Bruch folgte dem Schema, wie er schon im Kap. 5.3.4.2 bei der Dokumentation des Versagens vom Zugversuch Nr. 2 dargestellt wurde. In der Abb. 5.39 wird wieder der faserige Bruch, wie beim Zugversuch deutlich.

Wie es zu diesem plötzlichen Versagen bei dieser geringen Laststufe kommen konnte, ist schwer zu erklären. Eine mögliche Erklärung wäre, dass das Abziehen der Gewindehülse bei der Versuchsreihe „1“ zu einer Schädigung der Aramidstäbe geführt haben könnte. Außerdem könnten bereits vor der Versuchsdurchführung einzelne Stäbe des Dreierbündels Schädigungen erfahren haben, die zu diesem frühen Versagen geführt haben könnten.

Die Tatsache, dass bei dieser Probe kein Entschäumer verwendet wurde (siehe Kap. 5.4.2, Arbeitsschritt 2), hat, aufgrund des vorzeitigen Versagens der drei Aramidstäbe, keinen Einfluss auf die Auswertung des Versuches bzw. die Versagensart.

5.5. Gesamtinterpretation der durchgeführten Forschungsarbeit

Dieser Abschnitt der Diplomarbeit widmet sich der Gesamtinterpretation der durchgeführten Forschungsarbeit an der TU- Wien. Dabei werden die wichtigsten Ergebnisse und die daraus gewonnenen Erkenntnisse, der vorangegangenen Dokumentation und Auswertung der Versuche, angeführt. Einen Überblick über alle Ergebnisse der Versuchsarbeit liefert Tab. 5.11.

Tab. 5.11: Zusammenfassung der Ergebnisse der Forschungsarbeit

ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE DER FORSCHUNGSARBEIT						
ZUGVERSUCHE		Probe	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3	
		Bruchkraft [N]	43.820	46.479	36.693	
		Bruchspannung [N/mm²]	995,91	1.056,34	833,93	
		Bruchdehnung [%]	6,44	4,78	5,41	
		Elastizitätsmodul [N/mm²]	24.400	19.000	29.300 28.600	
	Versagen		Verklebung in der Gewindehülse	ja	-	ja
			Aramidstab	-	ja	-
AUSZIEHVERSUCHE		Probe	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3	
		Bruchkraft	80.867 N	70.145 N	26.580 N	
	Versagen		Ziegel	ja	ja	-
			Verklebung in der Gewindehülse	ja	ja	-
			Aramidstab	-	beginnendes Versagen eines Stabes	alle drei Aramidstäbe

5.5.1. Zugversuche

Generell kann angemerkt werden, dass die Zugversuche nicht die Ergebnisse lieferten, die erwartet wurden. So kam z.B. die Auswertung des Elastizitätsmoduls bei keiner Probe an die lt. Firmenangaben [29] angeführten Werte heran. Jedoch führte die Auswertung unserer Versuche immer auf Elastizitätsmodule im Bereich von ~ 20.000 N/mm². Die Bruchkraft kann bei dieser Versuchsauswertung nicht auf alle Stäbe verallgemeinert werden, da es nur bei Versuch Nr. 2 zu einem Versagen des Stabes gekommen ist und bei den beiden anderen Versuchen jeweils die Verklebung im Gewindestab versagt hat.

5.5.2. Ausziehversuche

Bei den Ausziehversuchen wurden, aufgrund von Problemen mit der Verklebung der Gewindehülsen, insgesamt zwei Versuchsreihen durchgeführt. Ergebnisse zum Auswerten lieferte nur die Versuchsreihe „2“, bei der die Gewindehülsen mit einem Innengewinde versehen und mit Epoxykleber verklebt wurden. Bei diesen Versuchen wurden jeweils drei Aramidstäbe pro Bohrloch injiziert und anschließend durch

einen Ausziehversuch getestet. Erwartet wurde, dass es erst bei einer Kraft von etwa der dreifachen Bruchkraft eines Aramidstabes, zum Bruch kommt. Da aber der Epoxyleber und der Ziegel bei den Ausziehversuchen Nr. 1 und Nr. 2 zuvor versagte, kann keine Verallgemeinerung auf alle Aramidstäbe gezogen werden. Der Ausziehversuch Nr. 3 stellt statistisch gesehen auf jeden Fall einen Ausreißer dar, da dieses Dreierbündel aus Aramidstäben nicht einmal die Bruchkraft eines Aramidstabes erreichte.

5.5.3. Erkenntnisse und Empfehlungen für zukünftige Anwendungen

In diesem abschließenden Teil des Kapitels 5 wird versucht die wichtigsten Erkenntnisse der Forschungsarbeit sowie Empfehlungen für zukünftige Anwendungen der Vorspannung von Mauerwerk darzustellen.

- Wichtiger Faktor bei der Vorspannung von Mauerwerk bildet die Verklebung / Injektion der Aramidstäbe
- Empfehlung für zukünftige Anwendung wäre, die Auslastung der Stäbe auf 50 % der angegebenen Bruchkräfte zu begrenzen
- die Injektionslänge der Stäbe im Mauerwerk lag bei etwa 1,0 m; aus den Versuchen geht hervor, dass die Injektionslänge keinen Einfluss auf die Versagensart hat
- aus den durchgeführten Versuchen, unter den angegebenen Bedingungen, liegt der Elastizitätsmodul unter 50 % der angegeben Firmendaten. Im Mittel liegt der Wert bei ca. 1/3, das entspricht 20.000 N/mm², der Firmendaten.

6. Zusammenfassung und Ausblick

In der Altbausanierung ist die Vorspannung von Mauerwerk eine wesentliche Instandsetzungsmaßnahme bei schwerwiegender Beschädigung bzw. um die Tragfähigkeit des Bestandsmauerwerks zu erhöhen. Aufgrund dieser Tatsache bzw. der Verwendung neuartiger Spanngliedmaterialien kam die Anregung zur Verfassung einer wissenschaftlichen Arbeit auf diesem Fachgebiet. Dem allgemeinen Teil zur Vorspanntechnologie von Mauerwerk wird ein Teil mit Versuchsdurchführungen angeschlossen.

Ganz allgemein gesehen, kann man Vorspannung von Mauerwerk in zwei Bereiche gliedern:

- Vorspannung als Instandsetzungs- / Verstärkungsmaßnahme ⇒ Kernbereich der Diplomarbeit
- Vorspannung von Ingenieurmauerwerk unmittelbar bei Errichtung des Mauerwerks

In der Denkmalpflege unterscheidet man bei der Instandsetzung von Mauerwerk, je nach Schwere der Schädigung drei verschiedene Verfahren:

1. Injizieren
2. Vernadeln
3. Vorspannen

Dabei wird die Vorspannung von Mauerwerk überwiegend bei schwerwiegender Schädigung eingesetzt. Aus denkmalpflegerischer Sicht bildet Tab. 3.1 einen sehr guten Überblick über alle drei Sicherungstechniken in der Altbausanierung.

Um eine Instandsetzung von Mauerwerk mittels Vorspannung durchführen zu können, sind Kenntnisse über die mechanischen Eigenschaften des Bestandsmauerwerks sowie der Spanngliedmaterialien entscheidend.

Bestandsmauerwerk

Grundlage jeder Vorspannung ist eine sorgfältige Bauaufnahme des Ist-Zustandes eines Bauwerks. Eine mögliche Ablaufgliederung einer Bestandserkundung ist in Abb. 3.1 dargestellt. Diese weist wesentliche Elemente wie die Bauaufnahme, Strukturerkundung oder die Bestimmung der Materialkennwerte auf. Weiters sind Kenntnisse über allgemeine mechanische Eigenschaften wie z.B. der Elastizitätsmodul von Mauerwerk oder Kenntnisse über die wichtigsten Versagenskriterien von Mauerwerk (einachsig und zweiachsig) von Bedeutung, welche im Kap. 3.2.1 ausführlich beschrieben werden. Interessant sind auch die Einwirkungen auf Mauerwerkskonstruktionen, welche sich in die Lasteinwirkungen und die Verformungseinwirkung einteilen lassen. Durch Verformungseinwirkungen, im speziellen durch Kriechverformungen, auf Mauerwerkskonstruktionen können, bei der Vorspannung von Mauerwerk, Spannkraftverluste über die Jahre entstehen, die bei der Dimensionierung der Vorspannkraft zu berücksichtigen sind. Mögliche Anregungen und Modellbildungen sind in Kap. 4.4 zusammengefasst.

Spanngliedmaterialien:

Das Kapitel 3.2.2 widmet sich den Spanngliedmaterialien, wobei der herkömmliche Spannstahl kurz gestreift wird und der neuartige Faserverbundwerkstoff „Aramid“ detailliert betrachtet wird. Faserverbundwerkstoffe bestehen aus zwei grundlegenden Komponenten, einerseits den Fasern und andererseits der Matrix. Mögliche Fasermaterialien sind z.B. Glasfasern, Kohlenstofffasern, Polymerfasern. Die Aramidfasern, welche zur Gruppe der Polymerfasern zählen, haben eine sehr ausgeprägte Anisotropie. Was soviel bedeutet, dass die Fasern in Kettenrichtung, im Vergleich zur Querrichtung, eine sehr hohe Zugfestigkeit besitzen. Die Eigenschaften von Faserverbundwerkstoffen hängen sehr stark vom Fasergehalt und von der Art der Matrix ab.

Vorteile (siehe Kapitel 3.2.2.2) von Faserverbundwerkstoffen ganz allgemein gesehen sind:

- hohe Zugfestigkeit und Elastizität (abhängig vom Fasergehalt)
- hohe Korrosionssicherheit
- geringe Dichte
- antimagnetisch, elektrisch nicht leitend (außer Kohlenstofffasern)

Ein nicht zu vernachlässigender Nachteil sind die relativ hohen Anschaffungskosten im Vergleich zu gewöhnlichen Spannstahl.

Vorspannung von Mauerwerk:

Grundgedanke bei der Vorspannung von Mauerwerk ist, ins nicht zugfeste Material gezielt Druckkräfte einzuleiten. Dadurch können Risse im Mauerwerk verschlossen oder auch die Lastabtragung im Mauerwerk verändert werden. [8] [20] [34]

Eine erste mögliche Klassifizierung (siehe Abb. 3.11) der Vorspanntechnologie von Mauerwerk ist die Einteilung:

- nach der Vorspannmethode
- nach der Anordnung der Spannglieder

Für diese Arbeit von Bedeutung ist die Vorspannung mit Aramidstäben durch Verbundkraftübertragung. Der Vollständigkeit halber werden aber auch die anderen Begriffe in dem Kap. 3.3 behandelt.

Bevor eine Vorspannung von Mauerwerk durchgeführt werden kann, ist eine sorgfältige Bauaufnahme unerlässlich. Andernfalls kann es zu einer massiveren Zerstörung des Mauerwerks nach vollendeter Vorspannungsmaßnahme kommen. Beispiele für solche Fehler bei der Bauaufnahme sind im Kap. 3.3.4.1 angegeben.

Ein wichtiger Aspekt für die Denkmalpflege ist die Spanngliedverankerung. Große Ankerbereiche, wie dies bei Stahlbeton oder Stahlverankerungen der Fall ist, sind aus ästhetischen Gründen unerwünscht. Diese großen Ankerbereiche fallen bei Spanngliedverankerung durch Verbundkraftübertragung weg, was den wesentlichsten Vorteil dieser Methode bedeutet.

Modellbildungen bei der Vorspannung von Mauerwerk:

Grundlagen der Modellbildungen werden im Kap. 4 behandelt, wobei die nachfolgenden Punkte behandelte werden:

- Krafteinleitung
- Druckausbreitung im Mauerwerk
- Teilflächenpressung
- Spaltzug- Randzugkräfte
- Verbundkraftübertragung – Verbundversagen.

Dabei werden die einzelnen Modelle beschrieben und mit Grafiken analysiert. Die wissenschaftlichen Arbeiten zu diesem Themenbereich stammen hauptsächlich von Haller [9], Wenzel [34],[35] und Nietzold [25].

Forschungsarbeit mit dem Faserverbundwerkstoff „Aramid“

Das Kap. 5 widmet sich der Dokumentation der durchgeführten Versuche an der TU- Wien. Dabei werden zu Beginn die messtechnischen Grundlagen, welche für die Versuchsdurchführung notwendig sind, erläutert. Hauptbestandteil dabei ist sicherlich die Dehnungsmessstreifentechnik, welche zum Teil bei Versuchen zur Anwendung kam.

Zweiter wichtiger Bestandteil sind die drei Zugversuche, welche an Aramidstäben der Stärke 7,5 mm der Firma Sireg durchgeführt wurden.

Kernbereich der Diplomarbeit bilden die drei Ausziehversuche an einem Kellermauerwerk der TU- Wien.

Wichtige Erkenntnisse aus den Zugversuchen und Ausziehversuchen:

- Die Werte des Elastizitätsmoduls kamen nicht an die Firmenangaben der verwendeten Stäbe heran.
- Die Bruchkraft kann bei beiden Versuchsarten nicht verallgemeinert werden, da es meistens zuvor zu einem Versagen der Verklebung gekommen ist.
- Empfehlung für ausführende Firmen: die Auslastung der Stäbe nur auf etwa 50 %, der laut Firmendatenblatt angegebenen Werte, zu begrenzen.
- Die Injektionslänge (bei unseren Ausziehversuchen: 1,0 m) im Mauerwerk hat wenig Einfluss auf die Versagensart.

Ausblick und mögliche Anregungen für zukünftige Arbeiten auf diesem Fachgebiet:

Aus den zum Teil nicht erwartenden Ergebnissen, kann man neue Anregungen für wissenschaftliche Arbeiten auf diesem Gebiet ableiten.

So wären zum Beispiel folgende Arbeiten interessant:

- Verwendung anderer Kleber bei der Verklebung der Gewindehülsen
- evtl. Versuchsaufbau mit einer Spannvorrichtung, sodass keine Verklebung in den Gewindehülsen notwendig ist.
- weitere Versuche mit den Stäben der Firma SIREG, um die Versuchsergebnisse zu bestätigen bzw. genauere Aussagen treffen zu können.
- weitere Zugversuche, mit geeigneter DMS- Applikation zum Messen der Dehnungen

7. Literaturverzeichnis

- [1] Al Bosta: Risse im Mauerwerk, Werner Verlag, 2. Auflage, 1999
- [2] Ashby Michael F.: Werkstoffe Band 2: Metalle, Keramiken und Gläser, Kunststoffe und Verbundwerkstoffe, 3. Auflage, Deutsche Ausgabe herausgegeben von Michael Heinzlmann, Spektrum Akademischer Verlag Elsevier GmbH München, 2007
- [3] Avak et. al.: Spannbetonbau, Theorie Praxis Berechnungsbeispiele, Bauwerk, 1. Auflage, Berlin 2005
- [4] Böge Alfred: Technische Mechanik, 27. Auflage, Vieweg & Sohn Verlag, Wiesbaden, 2006
- [5] Giesecke Peter: Dehnungsmeßstreifentechnik, Grundlagen und Anwendungen in der industriellen Messtechnik, Vieweg, Braunschweig, Wiesbaden, 1994
- [6] Gigla Birger: Verbundfestigkeit von Verpressankern im Mauerwerk, Dissertation aus Forschung und Lehre 38, Institut für Tragkonstruktionen, Universität Karlsruhe (TH), 1999
- [7] Gross Dietmar et. al.: Technische Mechanik 1, Band 1: Statik, 8., erweiterte Auflage, Springer Berlin Heidelberg New York, 2004
- [8] Gunkler Erhard, Detmold: Vorgespanntes Mauerwerk, in: Mauerwerk- Kalender 2000. Ernst & Sohn.2000, 333-359
- [9] Haller Jürgen: Untersuchungen zum Vorspannen von Mauerwerk historischer Bauten, Dissertation, aus Forschung und Lehre 9, Institut für Tragkonstruktionen, Universität Karlsruhe (TH), 1982
- [10] HBM Messtechnik: Montageanleitung, Kraftaufnehmer U10M
- [11] Hellerich et al.: Werkstoff- Führer Kunststoffe, Eigenschaften – Prüfungen Kennwerte, Carl Hanser Verlag München Wien, 8. Auflage, 2001
- [12] Hoffmann Karl: Eine Einführung in die Technik des Messens mit Dehnungsmeßstreifen, Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt, 1987
- [13] IBMB- Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz: Skriptum Werkstoffverhalten, TU- Braunschweig, Stand Sommersemester 2003, <http://www.ibmb.tu-braunschweig.de/baustoffe/lehre/Download>, download 01.10.2007
- [14] Jäger et. al.: Mauerwerksbau aktuell, Praxishandbuch 2005 für Architekten und Bauingenieure, Bauwerk Verlag, Berlin 2005
- [15] Keil Stefan: Beanspruchungsermittlung von Dehnungsmeßstreifen, Cuneus Verlag, 1995
- [16] Kolbitsch, Andreas: Bestandsmauerwerk – eine Übersicht, TU- Wien, Institut für Hochbau und Technologie, Zentrum für Hochbaukonstruktionen und Bauwerkserhaltung, Vortrag: Weiterbildungs- und Diskussionsveranstaltung, Linz (eingeladen); 06.10.2005; in: "Bestandsmauerwerk, Prüfung- Bemessung- Verfestigung", Tagungsbandeintrag (2005), S. 1 - 18.
- [17] Kolbitsch Andreas: Altbaukonstruktionen, Springer-Verlag Wien New York, 1989

- [18] Kollegger: Skriptum zur Vorlesung Betonbau I, Spannbeton, 3. Auflage, Institut für Stahlbeton und Massivbau, Mai 2001
- [19] Krüger et. al.: Spannbetonbau – Praxis mit Berechnungsbeispiel, Bauwerk, 1. Auflage, Berlin 2003
- [20] Maier Josef: Handbuch Historisches Mauerwerk – Untersuchungsmethoden und Instandsetzungsverfahren, Birkhäuser, 2002
- [21] Mang Herbert et. al.: Festigkeitslehre, Springer-Verlag Wien New York, 2000
- [22] MC- Bauchemie: MC-Injekt 2700 TR, technisches Merkblatt, www.mc-bauchemie.de , download 01.10.2007
- [23] Menges et al.: Werkstoffkunde Kunststoffe, Carl Hanser Verlag München Wien, 5. Auflage, 2002
- [24] Nabil A. Foud et. al: Verstärkungsmöglichkeiten für Mauerwerk in stark erdbebengefährdeten Gebieten, in: Mauerwerk – Kalender 2005, Ernst & Sohn 2005, 185-208
- [25] Nietzold Andreas: Vorspannen ohne Verbund im Mauerwerk historischer Bauten, Dissertation aus Forschung und Lehre 39, Institut für Tragkonstruktionen, Universität Karlsruhe (TH), 2001
- [26] Pfeifer et al.: Mauerwerk Atlas, Birkhäuser Verlag für Architekten, Basel – Boston – Berlin, 2001, S. 119
- [27] Pieper Klaus: Sicherung von historischen Bauten, Verlag Ernst & Sohn, Berlin München, 1983
- [28] Schneider et al.: Mauerwerksbau, Werner Verlag, 6. Auflage, 1999
- [29] SIREG S.p.A: Advanced FRPs for Civil Engineering, Arapree Rod, www.sireg.net/Arapree_Rod.pdf , download 21.08.2007
- [30] Stiesch Gerhard: Gedanken zur Anwendung der Vorspanntechnik in historischem Mauerwerk, in Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke, Erhaltungskonzepte, „Methoden und Maßnahmen zur Sicherung historischer Gebäude, Sonderforschungsbereich 315, Universität Karlsruhe, Ernst & Sohn Sonderband 1990, 119-124
- [31] S&P Clever Reinforcement GmbH: Datenblatt: S&P Resin 220 Epoxykleber, Stand 07/07, http://frp.at/pdf_daten/de_produkts/resin-220-epoxykleber_de.pdf, download 11.12.2007
- [32] Ullrich M: Instandsetzung von Mauerwerk durch Anker, Vernadelung und Injektionen; in WTA- Schriftenreihe Heft 17, Verfahren zur Bauwerksinstandsetzung Gestern- Heute- Morgen, Hrsg. Werner Leschnik, AEDIFICATIO Verlag, 1998
- [33] Wallasch Sven: Instandsetzung von Ziegelmauerwerk, Reihe Altbaumodernisierung, Hrsg. Manfred Gerner, Deutsche Verlags- Anstalt Stuttgart, 1999
- [34] Wenzel, Fritz et al.: Historisches Mauerwerk – Untersuchen, Bewerten und Instandsetzen, Sonderforschungsbereich 315, Universität Karlsruhe (TH), 2000
- [35] Wenzel, Fritz: Mauerwerksinstandsetzung bei historische bedeutsamen Bauwerken, in: Mauerwerk – Kalender 1995. Ernst & Sohn 1995, S. 613-622

8. Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1:	Wirkungsweise einer Vorspannung (nach [18])	3
Abb. 2.2:	Anwendungsgebiete der Vorspannung von Mauerwerk.....	5
Abb. 3.1:	Schema zur Organisation von Bestandserkundungen und Zustandsanalysen;(nach [34], Seite 6).....	7
Abb. 3.2:	Übersicht der Einwirkungen auf Mauerwerkskonstruktionen (nach [16], Seite 8 und [28], Seite 147).....	11
Abb. 3.3:	Versagenseinhüllende für das Mauerwerk, [Dhanasekar et al., 1985] (aus [1], Seite 50).....	16
Abb. 3.4:	Hüllkurve für die Schubtragfähigkeit von Mauerwerk nach DIN 1053(aus [1], Seite 54).....	17
Abb. 3.5:	Vergleich der Resultate von Dhanasekar und Thürlimann/Ganz für $\vartheta = \pi/8$ (aus [1], Seite 52)	18
Abb. 3.6:	Zur Definition des E-Moduls von Mauerwerk E_{MW} (aus [28], Seite 54).....	19
Abb. 3.7:	Rissarten im Mauerwerk (schematisch) (aus [1], Seite 10)	20
Abb. 3.8:	Eigenschaften von Verstärkungsfasern und Metallen (aus [23], Seite 226).....	23
Abb. 3.9:	E- Modul von Faserverbundwerkstoffen (aus [2], Seite 223).....	25
Abb. 3.10:	Ermüdungsfestigkeit bei Schwellbeanspruchung (aus [23], Seite 233).....	26
Abb. 3.11:	Klassifizierung von vorgespanntem Mauerwerk	27
Abb. 3.12:	Beispiel einer Vorspannung in Mauersollachse (nach [30], Seite 120).....	30
Abb. 3.13:	Korrekturmaßnahme: Versatz der Ankerachse um 10cm (nach [30], Seite 120).....	31
Abb. 3.14:	Verlauf der Randspannungen im Mauerwerk bei einer Bohrlochabweichung von 1% von der Sollachse (nach [30], Seite 124)	31
Abb. 3.15:	Ankerkörper aus Stahlbeton (aus [34], Seite 108).....	34
Abb. 3.16:	Ankerkörper aus Stahl (aus [34], Seite 111).....	35
Abb. 4.1:	Spaltzug- und Randzugkräfte für homogenes Material (aus [9], Seite 27).....	40
Abb. 4.2:	Krafteinleitung in den Verpresskörper über den „Haftungsstreifen“ (aus [6], Seite 49).....	43
Abb. 5.1:	Übersicht der drei Kernbereiche der Versuchsdokumentation	47
Abb. 5.2:	Schema eines Folien-DMS (aus [15], Seite 17).....	50
Abb. 5.3:	WHEATSTONE'sche Brückenschaltung (aus [15], Seite 160)	51

Abb. 5.4:	Möglichkeiten der Brückenschaltung beim Messen mit Dehnungsmessstreifen (aus [15], Seite 165).....	52
Abb. 5.5:	Schema einer Messkette zur Messung von Dehnungen mit DMS. (aus [12], Seite 17)	52
Abb. 5.6:	Probekörper aus Stahl	55
Abb. 5.7:	Detaillierte Darstellung der zwei applizierten DMS auf dem Stahlprobekörper	55
Abb. 5.8:	Druckversuch am Stahlprobekörper	56
Abb. 5.9:	Schema des Biegeversuchs	57
Abb. 5.10:	Darstellung des eingeklebten Gewindestabes	61
Abb. 5.11:	Schema sowie Foto des Versuchsaufbau	62
Abb. 5.12:	Vergleich der drei Zugversuche.....	63
Abb. 5.13:	Spannungs- Dehnungs- Diagramm: Vergleich der drei Zugversuche	65
Abb. 5.14:	Spannungs- Dehnungs- Diagramm: Zugversuch 1	66
Abb. 5.15:	Spannungs- Dehnungs- Diagramm: Zugversuch 2	67
Abb. 5.16:	Darstellungen des gerissenen Aramidstabes	68
Abb. 5.17:	Spannungs- Dehnungs- Diagramm: Zugversuch 3	69
Abb. 5.18:	Spannungs- Dehnungs- Diagramm: Zugversuch , zweiter Belastungszyklus	70
Abb. 5.19:	Spannungs- Dehnungs- Diagramm: Zugversuch , dritter Belastungszyklus	71
Abb. 5.20:	Probe Nr. 3; Versagen des Epoxylebers in der Gewindehülse	71
Abb. 5.21:	Ablauf der Vorbereitungen für den Ausziehversuch	72
Abb. 5.22:	Kernbohrungen; Nummerierung der drei Bohrlöcher.....	73
Abb. 5.23:	detaillierte Darstellung des Bohrloches Nr.“3“	73
Abb. 5.24:	[A] Zwei – Komponenten Injektionsharz; [B] Injizieren der Bohrlöcher.....	75
Abb. 5.25:	Darstellung des schäumenden Injektionsharzes.....	75
Abb. 5.26:	[A] Befüllen der Gewindehülse mit Injektionsmaterial; [B] Darstellung der drei nachträglich angebrachten Gewindehülsen	76
Abb. 5.27:	Schema des Versuchsaufbau; Versuchsreihe „1“	78
Abb. 5.28:	Zwei Darstellungen vom Versuchsaufbau	78
Abb. 5.29:	Poröse Struktur des Injektionsharzes	79
Abb. 5.30:	Schema des Versuchsaufbau, Versuchsreihe „2“	81

Abb. 5.31: Fotos des Versuchsaufbau	81
Abb. 5.32: Anordnung der Wegaufnehmer mit Angabe der Distanzen zu den Aramidstäben.....	82
Abb. 5.33: Vergleich der drei Ausziehversuche	83
Abb. 5.34: Diagramm Ausziehversuch: Probe Nr.1	85
Abb. 5.35: Zwei Darstellungen der Versagensart des Ausziehversuches: Probe Nr. 1	86
Abb. 5.36: Diagramm Ausziehversuch: Probe Nr. 2	87
Abb. 5.37: Zwei Darstellungen der Versagensart des Ausziehversuches: Probe Nr. 2	88
Abb. 5.38: Diagramm Ausziehversuch: Probe Nr. 3	89
Abb. 5.39: Zwei Darstellungen der Versagensart des Ausziehversuches: Probe Nr. 3	90

9. Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1:	Denkmalpflegerische Bewertung der Verfahren (nach [34], Seite 64-65)	6
Tab. 3.2:	Festigkeitsangaben zu Mauersteinen um 1900, nach [16]	10
Tab. 3.3:	Versagenskriterien von Mauerwerk für einachsige Beanspruchung nach [1] [28].....	14
Tab. 3.4:	Spannstähle zur Mauerwerksinstandsetzung (nach [34], Seite 100).....	21
Tab. 3.5:	Eigenschaften verschiedener Fasern (aus [11], Seite 196)	24
Tab. 3.6:	Vergleich der E – Module der Fasern mit den E – Modulen der Matrix (nach [2], [11]).....	24
Tab. 3.7:	Eigenschaften von Verbundwerkstoffen im Vergleich zu Metallen (nach [2], Seite 223)	25
Tab. 3.8:	Anordnung der Spannglieder in der Querschnittsebene (Abbildung aus [24], Seite 201).....	29
Tab. 3.9:	Korrosionsschutz von Spanngliedern aus Spannstahl nach [34]	33
Tab. 4.1:	Krafteinleitung und Druckausbreitung nach [9]; (Grafiken aus [9], Seite 39)	38
Tab. 4.2:	Verbund als Kraftübertragung nach [4][6][7].....	42
Tab. 4.3:	Zwei Methoden der Krafteinleitung nach [6] (Grafik aus [6], Seite 52)	44
Tab. 4.4:	Modelle für Verbundversagen bei Zugversuchen nach [6] (Grafiken aus [6], Seite 54).....	45
Tab. 5.1:	Auswertung des Druckversuchs.....	57
Tab. 5.2:	Auswertung des Biegeversuchs	58
Tab. 5.3:	Kraftaufnehmer Typ U10M – Messbereich 125 kN lt. [10]; (Grafik aus [10], Seite 8)	59
Tab. 5.4:	Arapree Rod; Überblick der Eigenschaften laut Firmendatenblatt [29]	60
Tab. 5.5:	Applikation der Dehnungsmessstreifen auf dem Aramidstab.....	61
Tab. 5.6:	Überblick 1: Ergebnisse der drei Zugversuche	64
Tab. 5.7:	Überblick 2: Ergebnisse der drei Zugversuche	65
Tab. 5.8:	MC- Injekt 2700 TR; Überblick der Eigenschaften laut Firmendatenblatt [22].....	74
Tab. 5.9:	S&P Resin 220 Epoxykleber; Überblick der Eigenschaften laut Firmendatenblatt [31].....	80
Tab. 5.10:	Überblick der Ergebnisse der drei Ausziehversuche	84
Tab. 5.11:	Zusammenfassung der Ergebnisse der Forschungsarbeit	91