



**Lehr und Forschungsgebiet**

**Massivbau und tragkonstruktionen**

**Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Held**

**Diplomarbeit zum Thema:**

**Verhalten und Vergleich von ausgefachten Stahlrahmen  
mit unterschiedlichen Mauerwerkmaterialien**

**Betreuer: Dipl.-Ing. Pejman Peyvandi**

**cand.-ing. Bahram Abbasmaneshchaleshtori**

**Matrikelnummer: 237496**

**Wuppertal, den 13.08.09**

## Diplomarbeit

### Fachgebiet:

Massivbau & Tragkonstruktionen

### Thema:

Verhalten und Vergleich von ausgefachten Stahlrahmen mit unterschiedlichem Mauerwerksmaterial

### Aufgabestellung:

1. Einarbeitung in die Problematik der Interaktion zwischen Stahlrahmen und Ausfachungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit.
2. Untersuchung von in der Praxis üblichen Systemen von Ausfachungsmaterialien in Industrieländern wie Deutschland und Schwellenländern wie Iran. Ermittlung der dazu gehörigen Parameter für nichtlineare Berechnung mittels der FEM- Methode.
3. Einarbeitung in die Problematik des Mauerwerks im Hinblick auf die Aspekte des Wärme-, Frost-, Feuchtigkeits- und Brandschutzes. Zusammenstellung mit vergleichender Bewertung zu den jeweiligen normativen Regelungen für Mauerwerk in den Ländern Deutschland und Iran
4. Betrachtung des nichtlinearen Verformungsverhalten eines ausgefachten Fachwerkes mit Variation der Ausfachung hinsichtlich E-Modul, Druckfestigkeit und Zugfestigkeit unter Verwendung des Programms SAP 2000.
5. Vergleich der EDV-Berechnungen mit den Ergebnissen aus der durchgeführten Versuchsreihe.

## Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Held für die Erstellung des interessanten Diplomarbeitsthemas.

Für die immer freundliche Unterstützung bei der Anfertigung und Betreuung dieser Arbeit bedanke ich mich beim Herrn Dipl.-Ing. Pejman Peyvandi.

Ich bedanke mich herzlichst die Friedrich Ebert Stiftung für die finanzielle Unterstützung Während meines Studiums, ohne die es mir nicht gelungen wäre, mein Studium so zu beenden, wie ich es letztendlich getan habe.

Ich bedanke mich auch für die stetige Bereitschaft des gesamten Lehrstuhls zu wissenschaftlichen Diskussionen bezüglich meines Themas. Außerdem bedanke ich mich beim Herrn Dipl.-Ing. Alireza Eghdam.

## Inhaltverzeichnis

Inhaltverzeichnis.....	1
Abbildungsverzeichnis.....	4
Bildverzeichnis.....	6
Tabellenverzeichnis.....	7
Einleitung.....	8
1 Mauerwerk.....	9
1.1 Allgemeiner Einsatz vom Mauerwerk.....	9
1.1.1 Mauerwerksarten.....	9
1.1.2 Mauerwerksverband.....	11
1.2 Eigenschaften vom Mauerwerk.....	13
1.2.1 Druckfestigkeit beim Mauerwerk.....	13
1.2.2 Zugfestigkeit beim Mauerwerk.....	14
1.2.3 Biegezugfestigkeit beim Mauerwerk.....	15
1.3 Ringanker / Ringbalken.....	16
1.4 Bauphysik beim Mauerwerk.....	17
1.4.1 Wärme- und Feuchtigkeitsschutz bei dem Mauerwerk.....	17
1.4.2 Klassifizierung von Baustoffen und Bauteilen bei Brandverhalten.....	18
1.4.3 Ausführung von Mauerwerk bei Frost.....	20
1.5 Mauermörtel.....	21
1.6 Mechanische Formänderungswerte vom Mauerwerk.....	22
1.6.1 Spannungs-Dehnungslinie für Mauerwerk bei Druckbeanspruchung.....	22
1.6.2 Nichtlineare Verformungswerte beim Mauerwerksteine.....	22
1.7 Steinformate und Steinabmessungen.....	23
2 Interaktion zwischen Mauerwerk und Stahlrahmen.....	26
2.1 Allgemein.....	26
2.2 Steifigkeit, Duktilität und Dämpfung.....	26
2.3 Ermittlungen von Steifigkeiten bei den ausgefachten Stahlrahmen.....	27
2.4 Verhalten vom Mauerwerk im Stahlrahmen.....	28
2.4.1 Stahlrahmen unter Last.....	28
2.4.2 Mauerwerk unter Last.....	28
2.4.3 Ausgefachte Stahlrahmen unter Last.....	29
2.5 Spannungsverteilung im Stahlrahmen mit Ausfachung.....	29
2.6 Versagen von Stahlrahmen mit Ausfachungen.....	30
2.6.1 Grenzrisse.....	30
2.6.2 Kreuzrisse.....	30

2.6.3 Eckversagen.....	31
3 Mauersteine in Deutschland.....	32
3.1 Ziegelstein.....	32
3.1.1 Druckfestigkeit.....	32
3.1.2 Rohdichte.....	32
3.1.3 Wärmeleitfähigkeit.....	32
3.1.4 Wasseraufnahmekoeffizient.....	33
3.1.5 Wasserdampfdurchlässigkeit.....	33
3.1.6 Frostbeständigkeit.....	33
3.1.7 Zugfestigkeit.....	33
3.1.8 Ziegelarten.....	33
3.2 Kalksandstein.....	35
3.3 Porenbetonstein.....	36
3.4 Leichtbeton- und Betonstein.....	38
3.5 Hüttensteine.....	39
3.6 Natursteine.....	40
4 Iranische Mauersteine.....	42
4.1 Allgemein.....	42
4.2 Khesht.....	43
4.3 Ajour.....	43
4.4 Block simani.....	48
4.5 Block ghachi.....	50
5 Verformungsverhalten eines ausgefachten Stahlrahmens.....	51
5.1 Modellierung / Stahlrahmen mit Ausfachung.....	51
5.2 Lasteinwirkungen.....	51
5.3 Lastfallkombinationen.....	53
5.4 Versuch / ausgefachter Stahlrahmen.....	54
5.4.1 Randbedingungen / Eigenschaften des Systems.....	54
5.4.2 Stahlrahmen unter Last.....	55
5.4.3 Ausgefachter Stahlrahmen unter Last.....	56
6 Vergleich der EDV-Berechnungen und der durchgeführten Versuchsreihe.....	60
6.1 Laboruntersuchungen.....	60
6.2 Druckfestigkeit beim iranischen Ajour und deutschen Kalksandstein.....	60
6.3 Druckfestigkeit beim Lehmstein.....	61
6.4 Druckfestigkeit beim Lehmmauerwerk.....	62
6.5 Stahlrahmen mit Lehmausfachung.....	64
6.5.1 Vorbereitung, Verdichtung und Ausfachung des Lehmsteins.....	64

6.5.2 Lasteinwirkung des Systems.....	65
6.5.3 Modellierung mit Programm.....	67
7 Zusammenfassung.....	68
8 Anhang 1.....	70
9 Literaturverzeichnis.....	71
10 Bestätigung.....	73

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1 : horizontale- und vertikale Bewehrung im Stein.....	10
Abbildung 1.2 : Begriffsbestimmungen des Mauerwerks.....	11
Abbildung 1.3 : Überbindemaß beim Mauerwerk.....	11
Abbildung 1.4 : häufige Mauerwerksverbände in Deutschland.....	12
Abbildung 1.5 : Kombinierte Beanspruchung einer Schubwand.....	14
Abbildung 1.6 : Zugbeanspruchung parallel zu den Lagerfugen.....	15
Abbildung 1.7 : Biegebeanspruchung des Mauerwerks.....	16
Abbildung 1.8 : Ringankerkonstruktion im Mauerwerk.....	16
Abbildung 1.9 : Spannungs-Dehnungslinie für Mauerwerk bei Druckbeanspruchung....	22
Abbildung 1.10 : Mauersteine im Dünformat und Normalformat.....	24
Abbildung 2.1 : Verhalten von Ausfachung.....	27
Abbildung 2.2 : Verformungsverhalten vom Stahlrahmen.....	28
Abbildung 2.3 : Verformungsverhalten der Wand.....	28
Abbildung 2.4 : Spannungsverteilung des ausgefachten Stahlrahmens.....	29
Abbildung 2.5 : Spannungsverteilung im Stahlrahmen mit Ausfachung.....	29
Abbildung 2.6 : Grenzzisse zwischen Wand und Rahmen.....	30
Abbildung 2.7 : Diagonalschraube in einer eingefassten Wand.....	31
Abbildung 2.8 : Eckversagen in einer eingefassten Wand.....	31
Abbildung 4.1 : Prozentsatz an Rissen bei der Mischung von Lehmstein.....	44
Abbildung 5.1 : Dachlastflächenteil.....	52
Abbildung 5.2 : Windlastenverteilung.....	52
Abbildung 5.3 : Lastfallkombinationsfigur des Systems.....	53
Abbildung 5.4 : Randbedingungen, Kontaktelemente beim ausgefachten Stahlrahmen.	54
Abbildung 5.5 : Kopfverschiebung beim Stahlrahmen ohne Ausfachung.....	55
Abbildung 5.6 : Kopfverschiebung beim Stahlrahmen mit Beton C20/25 als Ausfachung	56
Abbildung 5.7 : Kopfverschiebung beim Stahlrahmen mit Lehm als Ausfachung.....	56
Abbildung 5.8 : Schubspannung in der Wand mit Beton C20/25 als Ausfachung.....	57
Abbildung 5.9 : Schubspannung in der Wand mit Lehm als Ausfachung.....	57
Abbildung 5.10 : Schubspannung in der Wand mit Ziegel als Ausfachung.....	58
Abbildung 5.11: Kopfverschiebung beim Stahlrahmen mit Beton 40/50 als Ausfachung	58
Abbildung 5.12 : Schubspannung in der Wand mit Beton C40/50 als Ausfachung.....	59
Abbildung 6.1 : Spannung-Dehnungsdiagramm vom Lehmstein.....	62
Abbildung 6.2 : Mauerwerksmaße für den Druckversuch.....	62
Abbildung 6.3 : Spannung- Dehnungsdiagramm vom Lehmmauerwerk.....	63
Abbildung 6.4 : Kraft-Verschiebungsdiagramm vom Weg 100.....	65

---

Abbildung 6.5 : Kraft-Verschiebungsdiagramm vom Weg 50.....	66
Abbildung 6.6 : Kraft-Verschiebungsdiagramm des Systems.....	66
Abbildung 6.7 : Kraft-Verschiebungsdiagramm mithilfe SAP 2000.....	67

## **Bildverzeichnis**

Bild 3.1 : häufige LD- Ziegelsteine.....	34
Bild 3.2 : häufige HD Ziegelsteine.....	35
Bild 3.3 : Kalksandstein.....	35
Bild 3.4 : Porenbetonstein.....	37
Bild 3.5 : Leichtbetonsteine.....	38
Bild 3.6 : Hüttensteine.....	40
Bild 3.7 : Natursteinmauerwerk.....	41
Bild 4.1 : Herstellung und Wand-, Dachkonstruktion von Khesht.....	45
Bild 4.2 : Dachkonstruktion mit Ajour- ausgefachten Stahlprofil.....	47
Bild 4.3 : handgemachte und maschinelles Ajourstein.....	48
Bild 4.4 : Block simani.....	49
Bild 4.5 : Block ghachi.....	50
Bild 5.1 : Tragkonstruktion von ausgefachtem Stahlrahmen.....	51
Bild 6.1 : Druckversuche beim iranischen Ajour und deutschen Kalksandstein.....	60
Bild 6.2 : Druckversuch beim Lehmstein.....	61
Bild 6.3 : Druckversuch beim Lehmmauerwerk.....	63
Bild 6.4 : Vorbereitung, Verdichtung und Ausfachung vom Lehmstein.....	64

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.1 : Feuchtigkeitsgehalt bei den Mauersteinen.....	18
Tabelle 1.2 : Brandverhaltensklassifizierung von Bauteilen.....	19
Tabelle 1.3 : Grundwerte der zulässigen Druckspannungen bei Mauerwerk mit Normalmörtel, Dünnbettmörtel und Leichtmörtel.....	21
Tabelle 1.4 : Verformungskennwerte für Kriechen, Schwinden, Elastizitätsmodul und Temperaturänderung.....	23
Tabelle 1.5 : Abmessungen von Mauerwerkssteinen.....	24
Tabelle 3.1 : Hüttensteinarten mit ihren Eigenschaften.....	39
Tabelle 3.2 : Die mechanischen Eigenschaften von den Natursteinen.....	41
Tabelle 4.1 : Druckfestigkeit, Rohdichteklasse vom Lehmstein.....	45
Tabelle 4.2 : Maße und Preise von iranischem, maschinellem Ajor.....	46
Tabelle 4.3 : Maße und Preise von iranischem, handgemachtem Ajor.....	47
Tabelle 4.4 : Maße und Druckfestigkeit von iranischem Block simani.....	49
Tabelle 5.1 : Stahlrahmen- und Ausfachungseigenschaften.....	54
Tabelle 6.1 : Druckfestigkeit beim iranischen Ajor und deutschen Kalksandstein.....	60

## **Einleitung**

Im Rahmen dieser Diplomarbeit soll Verhalten und Vergleich von ausgefachten Stahlrahmen mit unterschiedlichen Mauerwerksmaterialien unter Verwendung des Programms SAP 2000 durchgeführt werden.

Die Arbeit ist in sechs Kapitel gegliedert. Zunächst werden die Eigenschaften vom Mauerwerk und Mauerstein beschrieben. Im Kapitel 2 wird die Interaktion zwischen dem Stahlrahmen als Konstruktion und dem Mauerwerk als Ausfachung erläutert.

Nach diesem Kapitel werden zuerst die genormten Steinarten in Deutschland mit ihren Eigenschaften aufgelistet, im Anschluss erfolgt die Auflistung der genormten Steinarten im Iran.

Im Kapitel 5 wird das nichtlineare Verformungsverhalten eines ausgefachten Fachwerks mit verschiedenen Mauerwerksarten unter Verwendung des Programms SAP2000 erklärt. Abschließend werden die Versuchsreihen geschildert, die im Labor der bergischen Universität in Wuppertal durchgeführt worden sind, sowie ein Vergleich der Ergebnisse aus dem Programm SAP2000 und der Versuchsergebnisse aus dem Labor.

# 1. Mauerwerk

## 1.1 Allgemeiner Einsatz vom Mauerwerk

Der häufige Einsatz von Mauerwerksbau im Wohnungsbau ist mit kostengünstigen, flexiblen und bauphysikalischen Vorteilen gegenüber anderen Bauarten zu erklären. Das Mauerwerk ist eines der ältesten Bauelemente, das aus dem Mauerstein und dem Mauermörtel besteht. Beim Mauerwerk wird das Tragverhalten bestimmt durch die Eigenschaften der Steinprodukte (d.h. Druckfestigkeit etc.) und des Verbundmaterials (Mörtel).

Das Mauerwerk wird im Baubereich wie folgt benutzt:

- als Ausfachung im Stahl-, Stahlbeton-, Holzrahmen
- als Aussteifung im Zusammenwirken mit Deckenscheiben
- als allein tragende Wand
- als raumabschließende Wand.

Die Berechnung, Konstruktion und Ausführung vom Mauerwerk wird in der DIN 1053 geregelt. Es ist im Allgemeinen ein Verbundwerkstoff aus Mauersteinen und Mauermörtel. Mauerwerk kann auch ohne Mörtel als Trockenmauerwerk (nur mit Zulassung) hergestellt werden. Die Natursteine werden häufig im Trockenmauerwerk verwendet.

### 1.1.1 Mauerwerksarten

Mauerwerke werden nach ihrer Funktion und Forderung in Abhängigkeit von der Konstruktionsweise in mehrere Arten aufgeteilt:

- Gebrauchsfähiger Raumabschluss
- Lastabtragung
- bauphysikalische Erfordernisse
- Wirtschaftlichkeit
- Erscheinungsbild.

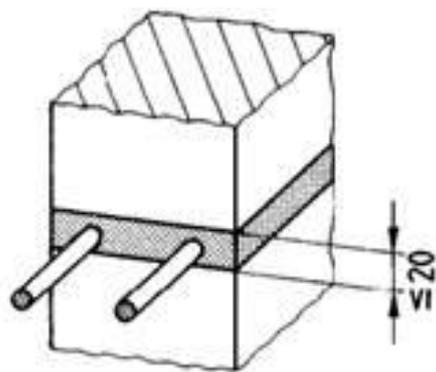
Eine der wichtigsten Mauerwerksarten ist das bewehrte Mauerwerk. Neben dem bewehrten Mauerwerk gibt es auch unbewehrtes und eingefasstes Mauerwerk. Durch die Kombination von Mauerwerk und Bewehrungsstahl können die Eigenschaften des Mauerwerks optimiert werden. Mauerwerk wird für die Erhöhung der Widerstandsfähigkeit gegenüber stoßartigen und horizontalen Belastungen (z.B. Erdbeben) bewehrt. Die Bewehrung verhindert größere Risse und nimmt die Spannungen infolge von Kriechen, Schwinden und Temperaturdehnungen auf. Vor allem werden die unterschiedlichen Verformungen der benachbarten Bauteile ausgeglichen. Durch die Bewehrung verbessert sich die Zug- und Biegefestigkeit des Mauerwerks erheblich. Das bewehrte Mauerwerk wird in der DIN 1053-3 behandelt. Die Hauptaufgabe des bewehrten Mauerwerks ist die Verhinderung von Rissen.

Risse können vermieden werden durch:

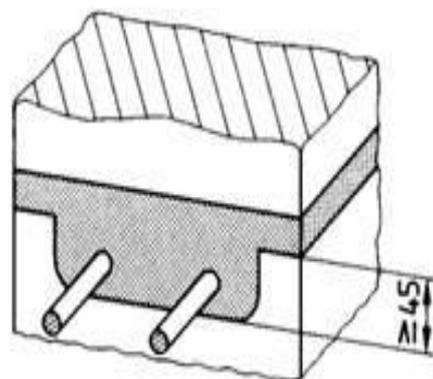
- Die Verwendung der abgelagerten und getrockneten Steinmaterialien
- Die Verwendung von steiferen Deckplatten.

Auch bei Ringbalken und Ringankern wird infolge von bewehrtem Mauerwerk die Rissbildung verringert. Beim bewehrten Mauerwerk braucht die Bewehrung unbedingt einen Korrosionsschutz, da sonst Feuchtigkeit und Sauerstoff an die Bewehrung gelangen können. Verzinken, Kunststoffbeschichtung gelten als besonderen Maßnahmen gegen Korrosionsschutz. Hierfür ist eine bauaufsichtliche Zulassung erforderlich. In einem ständig trockenen Raumklima kann auf Korrosionsschutz der Bewehrung verzichtet werden.

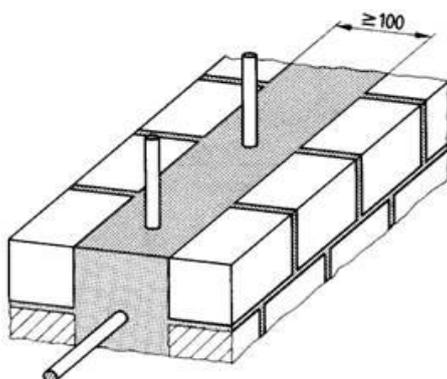
Die Bewehrung kann horizontal, vertikal oder beides zugleich (also horizontal und vertikal) eingebaut werden. Die Bewehrung muss vollständig im Mörtel eingebettet sein, so dass der Korrosionsschutz gewährleistet ist. Der Stabdurchmesser soll in den Fugen  $\leq 8$  mm und in den mörtelverfüllten Aussparungen bis 14 mm stark sein. In der Abbildung 1.1 sind die möglichen Formen von bewehrten Mauersteinen abgebildet.



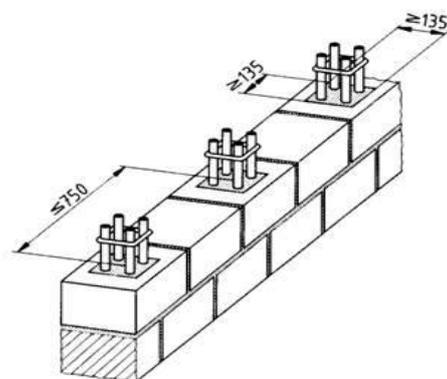
Bewehrung in den Lagerfugen



B. in tragförmigen Formsteinen



B. in durchgehenden Aussparungen



B. in Formsteinen mit großer Aussparung<sup>1</sup>

Abbildung 1.1: horizontale und vertikale Bewehrung im Stein [1]

<sup>1</sup>) Vertiefung oder Einschnitt in einer oder mehreren Oberflächen des Mauersteins

## 1.1.2 Mauerwerksverband

Ein Mauerwerksverband ist eine Anordnungsart von Mauersteinen innerhalb des Mauerwerks. Die Stoßfugen werden im Verband versetzt, damit eine optimale Verbundwirkung erreicht wird. Die Stoß- und Längsfugen der übereinander liegende Schichten müssen versetzt sein. Neben den Stein- und Mörtel Eigenschaften beeinflusst die Verbandart auch die Tragfähigkeit des Mauerwerks. Erst durch eine vernünftige Zusammensetzung von den Steinen und dem Mörtel kann ein widerstandsfähiges Mauerwerk errichtet werden. In der Abbildung 1.2 sind die Bestandteile einer Mauerwerkswand dargestellt.

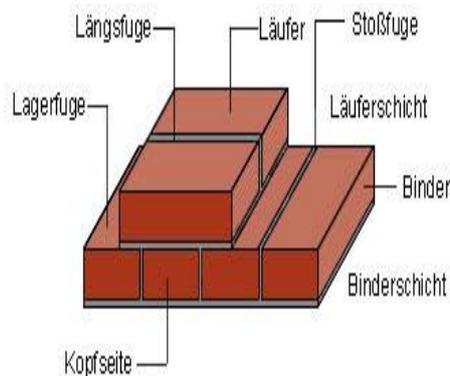


Abbildung 1.2: Begriffsbestimmungen des Mauerwerks [2]

Die Steine in einer Schicht sollten die gleiche Höhe haben. Die unterschiedlichen Steinhöhen führen dagegen zu einer zusätzlichen Lagerfuge und sind aus diesem Grund unzulässig. An Wandenden und unter Stürzen ist ausnahmsweise eine zusätzliche Lagerfuge pro Schicht als Höhenausgleich auf einer Länge von mindestens 115 mm möglich. Allerdings können für das gesamte Mauerwerk verschiedene Steingrößen verwendet werden. Dabei kann es auch zu einem Wechsel von verschiedenen Steinhöhen kommen.

Nach der DIN 1053-1 muss das Überbindemaß  $\ddot{u} \geq 0,4 \cdot h \geq 45$  mm betragen (siehe Abbildung 1.3).

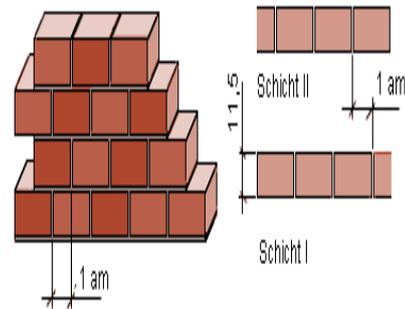


Abbildung 1.3: Überbindemaß beim Mauerwerk [3]

Es gibt in der Praxis viele verschiedene Mauerwerksverbände. Die wichtigsten Arten, die in Deutschland und im Iran verwendet werden, sind in der Abbildung 1.4 dargestellt.

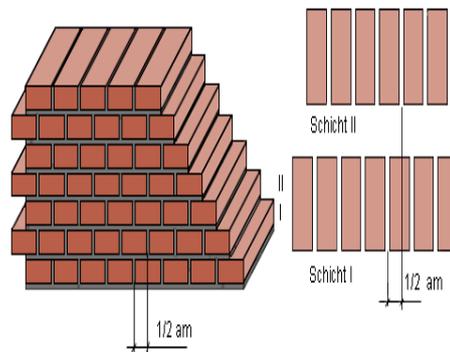
## 1. Läuferverband:

- Steinlänge verläuft in Wandrichtung
- Stoßfuge versetzt eine halbe Steinlänge
- Großes Überbindemaß
- Zugfester Verband
- Beste Festigkeitseigenschaften
- Bei Wänden ohne Längsfuge
- Überbindemaß =  $\frac{1}{2}$  Stein



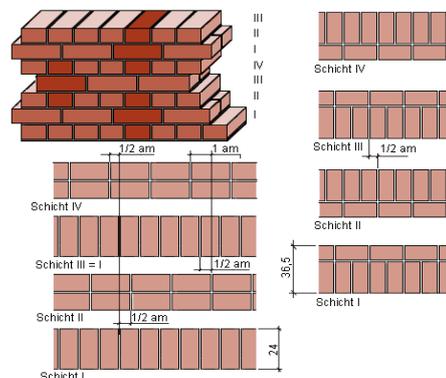
## 2. Binderverband:

- Steinlänge verläuft in Wanddickrichtung
- Überbindemaß geringer als Läuferverband
- Überbindemaß beträgt 52,5 mm > 45 mm
- Geringe Zugfestigkeit des Verbands
- Ohne Längsfuge ausführbar



## 3. Kreuzverband:

- Läufer- und Bindersteine in jeder Schicht
- Schichtweise Überkreuzung
- Anwendbar für Wanddicke mit mehr als einer Steinlänge



## 4. Blockverband:

- Abwechselnd aus Läufer- und Bindersteine
- Überbindemaß und Zugfestigkeit entsprechen Binderverband
- Überbindemaß =  $\frac{1}{4}$  Stein

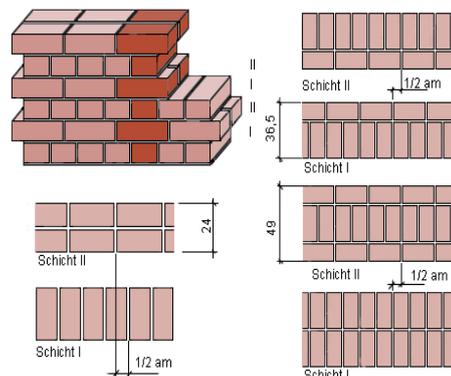


Abbildung 1.4: häufige Mauerwerksverbände in Deutschland [2]

### 1.2 Eigenschaften vom Mauerwerk

Die Grundlagen der Bemessung bei dem Mauerwerk erfolgt nach den europäischen und den nationalen Normen. Unter Berücksichtigung dieser Normen werden die Schnittgrößen aus Lasten ermittelt. Die Anwendung ist durch die DIN Norm 1053 geregelt.

Die Eigenschaften von Mauersteinen und Mauermörtel, der Feuchtigkeitsgehalt von Mauerwerk und die Dicke der Lagerfugen haben einen großen Einfluss auf Mauerwerkeigenschaften.

Die bauphysikalischen Eigenschaften des Mauerwerks, einfache und flexible Bauweisen ermöglichen dem Fachmann viele Anwendungsmöglichkeiten in konstruktiver Hinsicht. Das Mauerwerk wird im Baubereich wegen seiner hohen Drucksteifigkeit vorwiegend zur vertikalen Lastabtragung verwendet.

Die Beanspruchungen von Mauerwerkskonstruktionen infolge äußerer Einwirkungen wie Verkehrslasten, Eigengewicht und Zwang führen zu den folgenden Schnittgrößen:

- Normalkräfte (Druck bzw. Zug)
- Querkräfte (Schubbeanspruchung)
- Biegemomente.

Das Mauerwerk als tragende und nichttragende Wandkonstruktion wird aus Mauersteinen und Mauermörtel hergestellt. Mauermörtel hat die Aufgabe, Mauersteine miteinander zu verbinden. Die Lasten auf Mauerwerkswänden wirken in der Ebene und senkrecht zur Ebene der Wand.

Eigengewicht, Verkehrslast, Wind, Schnee, Erdbeben und Erddruck (in den Kellerwänden) sind die möglichen Kräfte, die auf das Mauerwerk wirken. Die tragenden Wände müssen vertikale und horizontale Kräfte aufnehmen und sie sicher in den Baugrund weiterleiten. Die nicht tragenden Wände, die sogenannten raumabschließenden Wände, sind nur unter eigenem Eigengewicht belastet und dürfen nicht mehr belastet werden.

Die tragenden Wände können als Gebäudestabilisierung oder aussteifende Wände bezeichnet werden. Sie müssen eine ausreichende Steifigkeit besitzen, um alle auf sie wirkenden horizontalen Lasten aufnehmen und in die Lager weiterleiten zu können. Als Außenwände oder Kellergeschosswände eines Gebäudes werden sie neben den vertikalen Lasten auch die Lasten wie Wind oder Erddruck aushalten. Diese eben erwähnten Wände verhalten sich wie eine Platte.

#### 1.2.1 Druckfestigkeit beim Mauerwerk

Vereinfacht kann gesagt werden, dass die Druckfestigkeit des Mauerwerks von dem Verformungsverhalten der Steine und des Mauermörtels abhängig ist. Es wird im Körper in Rich-

tung der Druckkraft die Druckspannung und in Richtung der Schubkraft die Schubspannung erzeugt.

Wegen größerer Verformbarkeit des Mauermörtels und infolge des vollen Verbundes zwischen Stein und Mörtel ist eine freie Verformbarkeit der Einzelkomponenten nicht möglich. Die beiden Komponenten Mörtel und Stein verformen sich in gleichem Maß. Es entstehen Querkzugspannungen im Stein und Querdruckspannungen im Mörtel.

Die Querkzugfestigkeit der Steine ist ein wichtiger Faktor für die Druckfestigkeit des Mauerwerks. Im Falle einer Querkzugfestigkeit zeigen sich Steinrisse. Die zunehmende Lasterhöhung führt hier zu einem Versagen des Mauerwerkskörpers.

Die Druckfestigkeit des Mauerwerks wird nach der DIN 18554 an einem genormten Prüfkörper durchgeführt. (Abbildung 1.5)

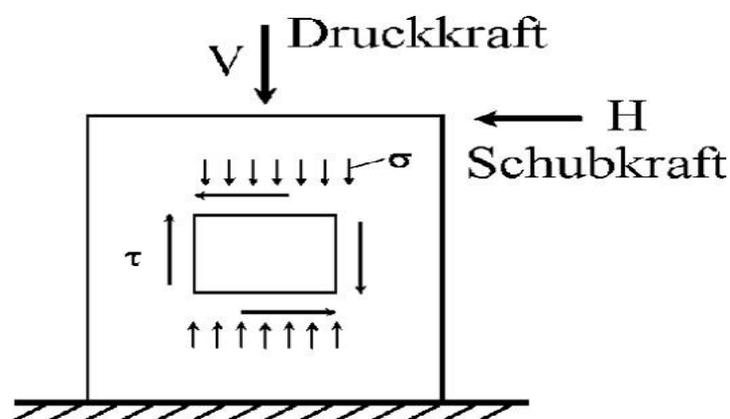


Abbildung 1.5: Kombinierte Beanspruchung einer Schubwand [4]

### 1.2.2 Zugfestigkeit beim Mauerwerk

Im Vergleich mit der Druckfestigkeit hat das Mauerwerk keine wesentliche Zugfestigkeit bzw. Biegezugfestigkeit. Aus diesem Grund muss das Mauerwerk in einem Stahl-, Holz- oder Betonrahmen ausgefacht werden.

Die Zugspannung des Mauerwerks wird durch Hinderung der Formänderungen wie z.B. das Schwinden, Kriechen und Abkühlen entstehen. Diese Spannungen können senkrecht oder parallel zur Lagerfuge sein. Bei tragenden Wänden wird die Zugfestigkeit senkrecht zur Lagerfuge bei Null angesetzt. Parallel zur Lagerfuge entsteht eine Zugfestigkeit bedingt durch die Zugfestigkeit des Steins und des Verbands.

Die Arten des Versagens aufgrund Zugbeanspruchung bei dem unbewehrten Mauerwerk sind in der Abbildung 1.6 zu sehen. Je nach Größe der eingefügten Kraft werden in einer unbewehrten Mauerwerkswand die Steinzugfestigkeiten im Stein oder die Haftzugfestigkeiten zwischen dem Stein und der Fuge beansprucht. Beim Versagen der Lagerfugen wird die

Reibungskraft in den Lagerfugen zu groß. Ohne die Steine zu zerstören wird der Verband einen zahnartigen Riss bekommen. Dies kommt insbesondere dann vor, wenn der Stein zu fest und die vorhandene Reibungskraft gering ist. Die 2. Art kommt bei jenen Steinen vor, die eine geringe Zugfestigkeit und eine große Reibungskraft haben.

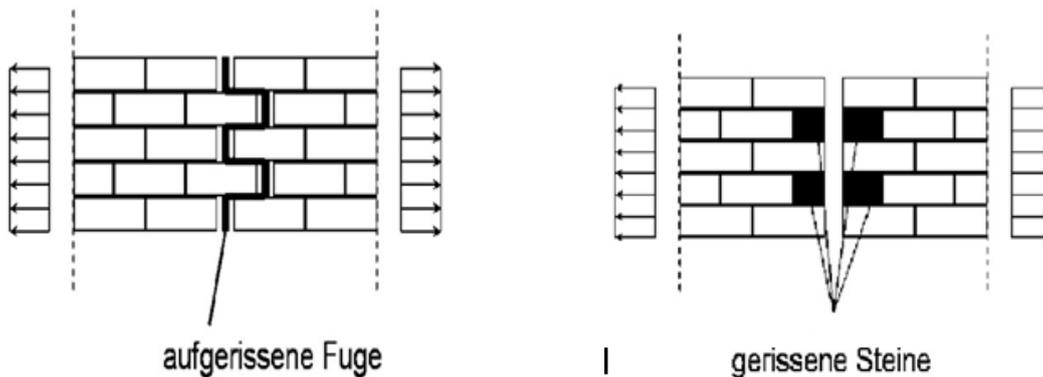


Abbildung 1.6: Zugbeanspruchung parallel zu den Lagerfugen [44][45]

### 1.2.3 Biegezugfestigkeit beim Mauerwerk

Wenn horizontale Lasten zusätzlich auf das Mauerwerk wirken, dann nimmt das Mauerwerk ein Scheibenverhalten an. Bei der Beschreibung dieses Verhaltens muss man immer die gegenseitige Beeinflussung der Mauersteine und dem Mauermörtel berücksichtigen.

Die Biegezugbeanspruchungen treten vor allem bei einer horizontalen Belastung des Mauerwerks auf, wie z.B. in den Ausfachungswänden, den freistehenden Wänden und den Kellerwänden unter Erddrucklasten.

Neben den Vertikallasten werden Kellerwände auch horizontal durch Erddruck und gegebenenfalls durch Grundwasser belastet. Beim Standsicherheitsnachweis müssen deshalb nicht nur Normalkräfte, sondern auch Querkkräfte und Biegemomente berücksichtigt werden. Die Querkkräfte beanspruchen das Mauerwerk auf Schub.

Die Haftzugfestigkeit zwischen den Mauersteinen und dem Mauermörtel beeinflusst die Zug- und Biegezugfestigkeit der Wand. Sie ist abhängig von:

1. Den Steineigenschaften (wie z.B. Oberflächenbeschaffenheit, Wasseraufnahmefähigkeit und Feuchtigkeitsgehalt)
2. Den Mörtleigenschaften (wie z.B. Zusammensetzung, Sandanteile, Wassergehalt und Wasserrückhaltevermögen)
3. Den Mauerwerksausführungen (wie z.B. Erschütterung während des Prozesses des Abbindens und die Nachbehandlung).

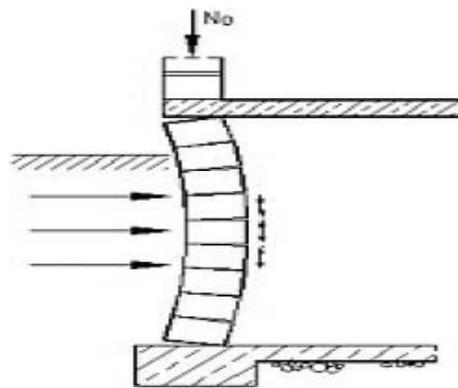


Abbildung 1.7: Biegebeanspruchung des Mauerwerks [43]

## 1.3 Ringbalken / Ringanker

Wegen der geringen Zugfestigkeit (besonders bei langen Wänden) des Mauerwerks werden die Wände in Höhe der Geschossdecke horizontal gehalten. Dies kann mithilfe des Ringankers erfolgen. Der Ringanker ist in einer Wandebene ein horizontaler Balken, der Biegemomente infolge Wind oder Erdbeben aufnehmen kann.

Die beste Ringankerkonstruktion ist ein Ringanker aus bewehrtem Mauerwerk oder aus Stahlbeton, der im Gebrauchszustand eine Zugkraft aufnehmen kann. Holzbalken und Stahlträger sind die anderen Ausführungsmöglichkeiten.

Der Ringanker kann:

- als Scheibenbewehrung in den vertikalen Mauerwerksscheiben
- als Teil der Scheibenbewehrung der Decke und
- als umlaufender Ring zum Zusammenhalten gebraucht werden.

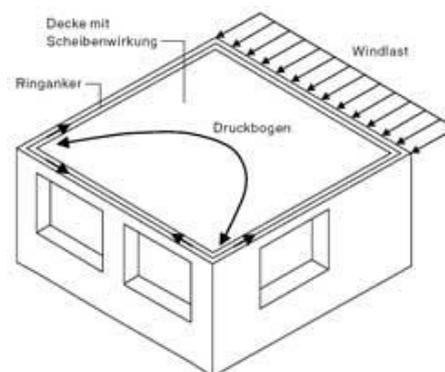


Abbildung 1.8: Ringankerkonstruktion im Mauerwerk [46]

Der Ringanker wird benutzt, wenn Bauten mit mehr als zwei Vollgeschossen aufgeführt sind oder bei Wänden, die länger als 18 Meter sind.

Bei vielen oder besonders großen Wandöffnungen ist eine Anordnung eines Ringankers sinnvoll. Die Ringanker sind in der Deckenhöhe oder darunter anzuordnen. [5]

### 1.4 Bauphysik beim Mauerwerk

#### 1.4.1 Wärme- und Feuchtigkeitsschutz bei dem Mauerwerk

Der bauliche Wärme- und Feuchtigkeitsschutz ist ein Teil der Bauphysik, um ein angenehmeres Raumklima zu schaffen, um Baukonstruktionen vor Klima- und Feuchtigkeitseinwirkungen zu schützen und um den Energieverbrauch zu reduzieren.

Die Wärmeleitfähigkeit ist ein Wärmeaustausch zwischen benachbarten Teilen und sie wird durch zwischenmolekulare Kräfte erzeugt.

Bei den Metallen und deren Legierungen (Baustoffe mit sehr dichten Gefügen) ist die Wärmeleitfähigkeit sehr groß [ $\lambda=40$  bis  $380 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{k})$ ], bei den Wärmeleitstoffen dagegen sehr gering [ $\lambda= 0,028$  bis  $0,10 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{k})$ ]. Dies liegt an den großen Porenräumen, die mit Luft gefüllt sind. Die Metalle erwärmen sich sehr schnell und werden bei direkter Sonneneinstrahlung sehr heiß. Diese Temperaturveränderungen haben einer erheblichen Längenänderung zufolge, was bei Mauersteinen nicht passieren kann.

Es gibt einen Zusammenhang zwischen Wärmeleitfähigkeit und Rohdichte der Baustoffe. Je mehr Porenraum sich im Stein befindet, umso geringer ist die Rohdichte. Die Porenräume sind für die Feuchtigkeitsspeicherung und den Feuchtigkeitstransport maßgeblich verantwortlich. In den grobporigen Mauersteinen kann Wasser leichter bewegt werden als in feinporigen Mauersteinen.

Daraus resultiert aber eine höhere Wärmeleitfähigkeit. Eine zusätzliche Wärmedehnung ist abhängig von der Mauerdicke bzw. Rohdichte. Diese Wärmedehnung hängt von der Wärmeleitfähigkeit der Wandelemente ab.

Luft und Feuchtigkeit, die in Porenräumen enthalten sind, beeinflussen die thermischen Eigenschaften der Konstruktion. Mit

$\lambda= 0,56 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{k})$  für Wasser und

$\lambda= 0,022$  bis  $0,028 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{k})$  für Luft. [6]

Der Feuchtigkeitsgehalt eines Baustoffes zeigt die enthaltene Wassermenge im Bauteil.

Die Wärmeleitfähigkeit des Mauerwerks wird durch die Feuchtigkeit beeinflusst. Die Mauerwerksmaterialien können Wasser in flüssiger Form aufnehmen, speichern und wiederabgeben. Bei dem ausgefachten Stahlrahmen mit Mauerwerk ist ein Korrosionsschutz für den

Stahlrahmen notwendig. Der Feuchtigkeitsgehalt von verschiedenen Steinen ist in Tabelle 1.1 aufgelistet.

Stein	Ziegel	Kalksandstein	Leichtbeton	Porenbeton
Feuchtegehalt	1,5%	5%	5%	4%

Tabelle 1.1: Feuchtigkeitsgehalt bei den Mauersteinen [6]

Es gibt beim Mauerwerk einen Unterschied zwischen lastabhängigen und lastunabhängigen Formänderungen. Die lastunabhängigen Formänderungen entstehen teilweise infolge von Feuchtigkeit und Wärme. Die Feuchtigkeits- und Wärmedehnung ruft im Bauteil Risse hervor, die durch Verkürzung oder Verlängerung des Bauteils zustande kommen. Durch Austrocknung der Steine (Feuchtigkeitsabgabe) entsteht eine Schwinddehnung. Die Schwindkennwerte von Mauersteinen sind in der Tabelle 1.4 aufgeführt.

Im Allgemeinen hängt Trocknungsschwinden des Mauerwerks von der stofflichen Zusammensetzung, dem Porenanteil der Steine, den mechanischen Eigenschaften der Mauersteine, vom Mauermörtel, von der Anfangsfeuchtigkeit des Mauerwerks, der Dicke und dem Alter des Mauerwerks ab. Bei bindemittelgebundenen Mauersteinen wie Kalksandstein, Porenbetonstein und Leichtbetonstein kann Schwinden durch Reaktion der kalkhaltigen Verbindungen mit Luftkohlendioxid entstehen.

Der Einfluss des Mauermörtels auf das Schwinden ist relativ groß. Besonders wenn Leichtmörtel statt Normalmörtel benutzt wird, da die leichten Zusatzstoffe im Mörtel ein höheres Schwinden aufweisen. Bei den modernen Mauerwerkssystemen, die mit großen Mauersteinen gebaut werden, verringert sich der Einfluss vom Mauermörtel auf das Schwinden.

Der andere wichtige Punkt bei Außenwänden ist die Schlagregensicherheit vom Mauerwerk. Die Außenwände müssen auf jeden Fall wasserundurchlässig sein, weil das Wasser durch das Porensystem aufgesogen wird.

Für Mauerwerksbauteile ist das Feuchtigkeitsverhalten des Mauerwerks bezüglich der unterschiedlichen Materialkombinationen zu berücksichtigen. Dies trifft auch auf klimatische Veränderungen zu.

Wärme und Feuchtigkeitsgehalt sind entscheidend für die Schimmelpilzbildung.

### 1.4.2 Klassifizierung von Baustoffen und Bauteilen bei Brandverhalten

Die erreichte Feuerwiderstandsdauer wird in DIN 4102-2 durch die Feuerwiderstandsklasse gekennzeichnet. Die Feuerwiderstandsdauer ist die Mindestdauer in Minuten für ein Bauteil, das nach der DIN4102 Versuchsbränden widersteht, ohne seine Tragfähigkeit zu verlieren.

Bei den Baustoffen wird zwischen

1. Nicht brennbar A<sub>1</sub>(ohne Nachweis) und A<sub>2</sub>(mit Nachweis) und
2. Brennbar B<sub>1</sub>(schwerentflammbar), B<sub>2</sub>(normalentflammbar) und B<sub>3</sub>(leichtentflammbar) unterschieden.

Mineralische Baustoffe sind von Natur aus nicht brennbar.

Brandverhaltensklassifizierung von Bauteilen erfolgt wie unten aufgeführt:

Feuerwiedestandsklassen	F30 feuerhemmend	F60 hochfeuerhemmend	F90 feuerbeständig	F120 mittelfeuerbeständig	F180 hochfeuerbeständig
Feuerwiederstandsdauer in Minuten	≥30	≥ 60	≥ 90	≥120	≥ 180

Tabelle 1.2: Brandverhaltensklassifizierung von Bauteilen [7]

Das Mauerwerk ist ein schlechter Wärmeleiter im Gegensatz zu Stahl. Beim Brand werden die Randzonen erwärmt und verbrannt, während im Kernbereich nur eine geringe Temperaturerhöhung erfolgt. Deswegen verändert sich die mechanischen Eigenschaften in den Randbereichen schnell, während sie im Kernbereich nahezu unverändert bleiben.

Bei den Stahlrahmen mit Ausfachungen verhält es sich ebenso. Rahmenkonstruktionen aus Stahl erwärmen sich sehr schnell und die mechanischen Eigenschaften (z.B. Festigkeit und E-Modul) nehmen ab. Ein tragender Stahlrahmen verliert seine Tragfähigkeit bereits bei 500 bis 600 °C nach 10 bis 15 Minuten Branddauer.

Mauerwerk versagt demgegenüber erst dann, wenn die Randzonen soweit erwärmt sind, sodass im Kernbereich kritische Temperaturen erreicht werden. [8]

Das Brandverhalten vom Mauerwerk ist allgemein abhängig von:

- Der Mauersteinart
- Der Steinsorte (gelocht oder ungelocht)
- Der Mörtelart
- Der Schlankheit der Wand
- Der Lastexzentrizität
- Der Trockenrohddichte der Steine
- Der Art der Wandkonstruktion
- Der Wandoberfläche.

Das Mauerwerk ist in der Regel ein sehr brandbeständiges Bauelement. Es hängt natürlich von den Einzelkomponenten des Mauerwerks ab, ob die eine gute Temperaturbeständigkeit

und geringe Wärmeleitung haben. Als am besten geeignetes Material eignet sich Porenbetonstein, weil es eine sehr geringe Wärmeleitung aufweist.

Die Mauerwerkswände werden im Brandschutz in tragende und nichttragende, sowie raumabschließende und nichtraumabschließende Wände aufgeteilt. Die Mindestdicke von den obengenannten Wänden sind in der DIN EN 1996-1-2 angegeben.

### 1.4.3 Ausführung von Mauerwerk bei Frost

Die kalten Temperaturen verhindern bzw. verzögern das Abbinden des Mörtels und gefährden so die Qualität des Haftverbunds zwischen Stein und Mörtel. Der starke Frost führt zu einer schnellen Gefrierung des Anmachwassers, das im frisch verarbeiteten Mörtel enthalten ist. Gefrieren kann durch Wind noch beschleunigt werden. Wenn diese Bedingungen längere Zeit anhalten, kann kein Erhärtungsprozess stattfinden und eine feste Verbindung des Mörtels mit dem Stein kommt nicht zustande.

Aus diesem Grund darf nach DIN 1053-1, Abschnitt 9.4 das Mauerwerk nur unter besonderen Maßnahmen ausgeführt werden. Die Mindesttemperatur soll in der Regel +5°C sein. Bis -5°C kann mit Schutzmaßnahmen wie Abdecken gemauert werden. Als Ursachen für Frostschäden am Mauerwerk kommen auch die folgenden Faktoren infrage:

1. Mangelnde Frostbeständigkeit des Materials
2. Äußere Feuchtigkeitsquellen (z.B. Niederschlag, Spritzwasser)
3. Innere Feuchtigkeitsquellen (z.B. Baufeuchtigkeit, Raumlufffeuchtigkeit)
4. Ungünstige Trocknungsbedingungen.

Die allgemeinen Maßnahmen für den Frostschutz beim Mauerwerk sind:

1. Gefrorene Baustoffe dürfen nicht verwendet werden
2. Auf gefrorenem Untergrund darf nicht gemauert werden
3. Frisches Mauerwerk muss geschützt werden
4. Eine Anforderung für Frosttauwasserwiderstand besteht mehr für Vormauersteine und Putzmörtel.

Die Mauersteine sollen auf jeden Fall frostfrei verwendet werden. Für die besonders beanspruchten Bauteile wie Kellerwände oder massive Stützmauern, müssen die Steine eine höchste Frostwiderstandsfähigkeit beweisen. Das Mauern bei Frost bedarf nach DIN 18330 grundsätzlich die Zustimmung des Auftraggebers.

## 1.5 Mauermörtel

Die DIN EN 998-1, 998-2 und der DIN 18555 Teil 1 bis 8 behandeln und regeln die Eigenschaften vom Mauermörtel. Mauermörtel ist ein Gemisch aus einem oder mehreren mineralischen Bindemitteln, wie z.B. Sand, Zusatzmittel und Wasser. Die verschiedenen Mörtelgruppen haben unterschiedliche Anforderungen an die Mörteldruckfestigkeit.

Es gibt 3 Formen von Mauermörtel:

- Normalmörtel mit einem Minimum an Trockenrohichte von 1,5 Kg/dm<sup>3</sup>
- Leichtmörtel mit einer Trockenrohichte geringer als 1,5 Kg/dm<sup>3</sup>
- Dünnbettmörtel mit einem Minimum an Trockenrohichte von 1,5 Kg/dm<sup>3</sup>.

Die Normalmörtel werden in die Gruppen I, II, IIa, III, IIIa, die Leichtmörtel in die Gruppen LM 21 und LM 36, Und Dünnbettmörtel in die Gruppe III eingeteilt [5].

**Tabelle 4a: Grundwerte  $\sigma_0$  der zulässigen Druckspannungen für Mauerwerk mit Normalmörtel**

Steinfestigkeitsklasse	Grundwerte $\sigma_0$ für Normalmörtel Mörtelgruppe				
	I MN/m <sup>2</sup>	II MN/m <sup>2</sup>	IIa MN/m <sup>2</sup>	III MN/m <sup>2</sup>	IIIa MN/m <sup>2</sup>
2	0,3	0,5	0,5 <sup>1)</sup>	-	-
4	0,4	0,7	0,8	0,9	-
6	0,5	0,9	1,0	1,2	-
8	0,6	1,0	1,2	1,4	-
12	0,8	1,2	1,6	1,8	1,9
20	1,0	1,6	1,9	2,4	3,0
28	-	1,8	2,3	3,0	3,5
36	-	-	-	3,5	4,0
48	-	-	-	4,0	4,5
60	-	-	-	4,5	5,0

<sup>1)</sup>  $\sigma_0 = 0,6 \text{ MN/m}^2$  bei Außenwänden mit Dicken  $\geq 300 \text{ mm}$ . Diese Erhöhung gilt jedoch nicht für den Nachweis der Auflagerpressung nach 6.9.3.

**Tabelle 4b: Grundwerte  $\sigma_0$  der zulässigen Druckspannungen für Mauerwerk mit Dünnbett- und Leichtmörtel**

Steinfestigkeitsklasse	Grundwerte $\sigma_0$ für		
	Dünnbettmörtel <sup>1)</sup> MN/m <sup>2</sup>	Leichtmörtel	
		LM 21 MN/m <sup>2</sup>	LM 36 MN/m <sup>2</sup>
2	0,6	0,5 <sup>2)</sup>	0,5 <sup>2),3)</sup>
4	1,1	0,7 <sup>4)</sup>	0,8 <sup>5)</sup>
6	1,5	0,7	0,9
8	2,0	0,8	1,0
12	2,2	0,9	1,1
20	3,2	0,9	1,1
28	3,7	0,9	1,1

<sup>1)</sup> Anwendung nur bei Porenbeton-Plansteinen nach DIN 4165 und bei Kalksand-Plansteinen. Die Werte gelten für Vollsteine. Für Kalksand-Lochsteine und Kalksand-Hohlblocksteine nach DIN 106-1 gelten die entsprechenden Werte der Tabelle 4a bei Mörtelgruppe III bis Steinfestigkeitsklasse 20.

<sup>2)</sup> Für Mauerwerk mit Mauerziegeln nach DIN 105-1 bis DIN 105-4 gilt  $\sigma_0 = 0,4 \text{ MN/m}^2$ .

<sup>3)</sup>  $\sigma_0 = 0,6 \text{ MN/m}^2$  bei Außenwänden mit Dicken  $\geq 300 \text{ mm}$ . Diese Erhöhung gilt jedoch nicht für den Fall der Fußnote<sup>2)</sup> und nicht für den Nachweis der Auflagerpressung nach 6.9.3.

<sup>4)</sup> Für Kalksandsteine nach DIN 106-1 der Rohdichteklasse  $\geq 0,9$  und für Mauerziegel nach DIN 105-1 bis DIN 105-4 gilt  $\sigma_0 = 0,5 \text{ MN/m}^2$ .

<sup>5)</sup> Für Mauerwerk mit den in Fußnote<sup>4)</sup> genannten Mauersteinen gilt  $\sigma_0 = 0,7 \text{ MN/m}^2$ .

Tabelle 1.3: Grundwerte der zulässigen Druckspannungen bei Mauerwerk mit Normalmörtel, Dünnbettmörtel und Leichtmörtel [3]

In der Tabelle 1.3 sind die Druckspannungen vom Mauerwerk mit allen möglichen Mauermörteln aufgeführt. Die Druckfestigkeit des Mauerwerks wird durch die Grundwerte der zulässigen Druckspannungen festgelegt. Die Steifigkeit, die Mörtelart und die Mörtelgruppe bestimmen die Druckfestigkeit des Mauerwerks.

## 1.6 Mechanische Formänderungswerte vom Mauerwerk

### 1.6.1 Spannung-Dehnungslinie für Mauerwerk bei Druckbeanspruchung

Die Spannung-Dehnungs-Linie für das Mauerwerk bei Druckspannung hängt von dem Herstellungsverfahren und von der Druckfestigkeit ab. Sie ist unter Druckbeanspruchung nicht linear. Für die Bemessung darf sie als linear, parabelförmig, parabelrechteckförmig oder als Rechteck (siehe Abbildung 1.9) angenommen werden. Von der Spannung-Dehnungs-Linie wird das Druck-E-Modul berechnet. Es lässt sich bei  $\frac{1}{3}$  der Höchstspannung (Druckspannung senkrecht zur Lagerfuge) in Abhängigkeit von der Längsdehnung berechnen.  $E = \sigma_{\max} / (3 * \epsilon_{\text{ges}})$ .

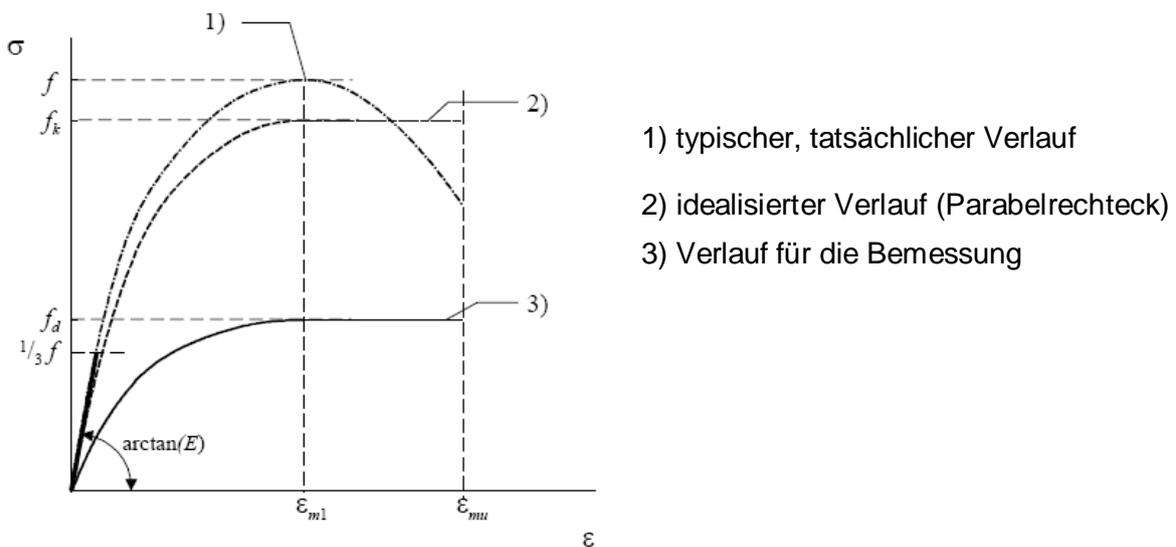


Abbildung 1.9: Spannungs-Dehnungslinie für Mauerwerk bei Druckbeanspruchung<sup>2</sup>

### 1.6.2 Nichtlineare Verformungswerte bei Mauerwerksteinen

Für die Berechnung von Schnittgrößen, Verformungen und Spannungsnachweisen wird ein linear-elastisches Werkstoffverhalten angenommen. Der Elastizitätsmodul für die Verformungsnachweise im Gebrauchszustand wird in der Tabelle 1.4 errechnet. Die Werte in der

<sup>2</sup>) DIN EN 1996-1

## 1. Mauerwerk

Tabelle 1.4 dürfen für die Verformungseigenschaften der Mauerwerksarten aus künstlichen Steinen verwendet werden.<sup>3</sup>

Mauersteinart	Endwert der Feuchtedehnung (Schwinden, chemisches Quellen) <sup>1)</sup>		Endkriechzahl		Wärmedehnkoeffizient		Elastizitätsmodul	
	$\varepsilon_{ps}$ <sup>1)</sup>		$\varphi_{\infty}$ <sup>2)</sup>		$\alpha_t$		$E$ <sup>3)</sup>	
	Rechenwert	Wertebereich	Rechenwert	Wertebereich	Rechenwert	Wertebereich	Rechenwert	Wertebereich
	mm/m				10 <sup>-4</sup> /K		MN/m <sup>2</sup>	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Mauerziegel	0	+ 0,3 bis - 0,2	1,0	0,5 bis 1,5	6	5 bis 7	3500 · $\sigma_0$	3000 bis 4000 · $\sigma_0$
Kalksandsteine <sup>4)</sup>	- 0,2	- 0,1 bis - 0,3	1,5	1,0 bis 2,0	8	7 bis 9	3000 · $\sigma_0$	2500 bis 4000 · $\sigma_0$
Leichtbetonsteine	- 0,4	- 0,2 bis - 0,5	2,0	1,5 bis 2,5	10 8 <sup>5)</sup>	8 bis 12	5000 · $\sigma_0$	4000 bis 5500 · $\sigma_0$
Betonsteine	- 0,2	- 0,1 bis - 0,3	1,0	-	10	8 bis 12	7500 · $\sigma_0$	6500 bis 8500 · $\sigma_0$
Porenbetonsteine	- 0,2	+ 0,1 bis - 0,3	1,5	1,0 bis 2,5	8	7 bis 9	2500 · $\sigma_0$	2000 bis 3 000 · $\sigma_0$

<sup>1)</sup> Verkürzung (Schwinden): Vorzeichen minus; Verlängerung (chemisches Quellen): Vorzeichen plus  
<sup>2)</sup>  $\varphi_{\infty} = \varepsilon_{\infty} / \varepsilon_{0t}$ ;  $\varepsilon_{0t}$  Endkriechdehnung;  $\varepsilon_{0t} = \sigma / E$   
<sup>3)</sup>  $E$  Sekantenmodul aus Gesamtdéhnung bei etwa 1/3 der Mauerwerksdruckfestigkeit;  $\sigma_0$  Grundwert nach Tabellen 4a, 4b und 4c.  
<sup>4)</sup> Gilt auch für Hüttensteine  
<sup>5)</sup> Für Leichtbeton mit überwiegend Blähton als Zuschlag

Tabelle 1.4: Verformungskennwerte für Kriechen, Schwinden, Elastizitätsmodul und Temperaturänderung [3]

Für den Knicknachweis der schlanken Wände müssen für alle Mauerwerksarten der Elastizitätsmodul  $E_t = 1100 \cdot \sigma_0$  angewendet werden.

### 1.7 Steinformate und Steinabmessungen

Eine Klassifizierung von Mauersteinen erfolgt in geometrischer Hinsicht über Steinformate. Die Steinformate sind genormt und auf die Achtmeter Maßordnung abgestimmt. Die Steine können gelocht oder ungelocht sein. Ihre Maße in mm sind in der Abbildung 1.10 dargestellt.

<sup>3)</sup>  $\sigma_0$  (Grundwert der zulässigen Druckspannung) wird nach Tabelle 1.3 gerechnet

# 1. Mauerwerk

Dabei bedeutet:

- DF – Dünnsformat
- NF – Normalformat

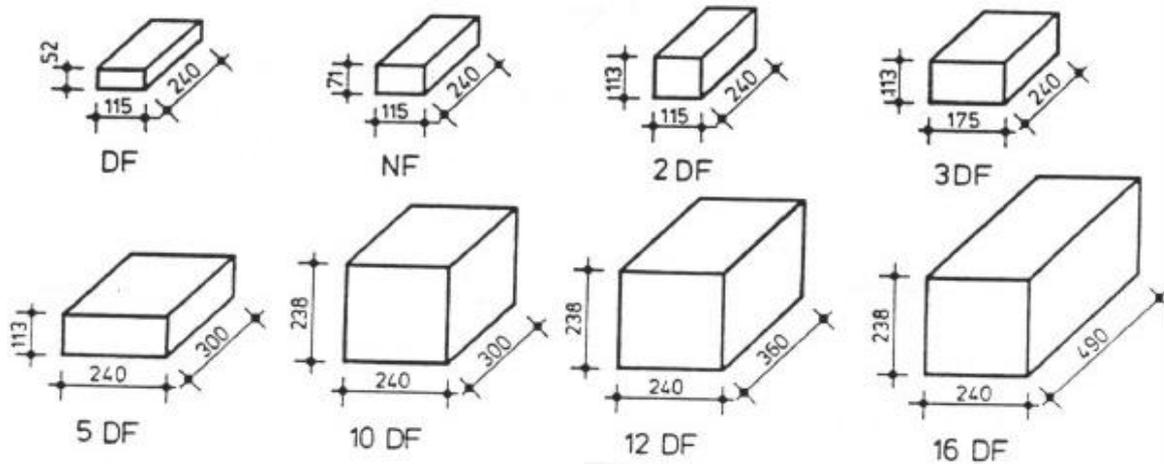


Abbildung 1.10: Mauersteine im Dünnsformat und Normalformat [9]

Die Werte in der Tabelle 1.5 sind die Steinabmessungen:

Format- kurzzeichen	Maße (mm)		
	l	b	h
1 DF	240	115	52
NF	240	115	71
2 DF	240	115	113
3 DF	240	175	113
4 DF	240	240	113
5 DF	240	300	113
6 DF	240	365	113
8 DF	240	240	238
10 DF	240	300	238
12 DF	240	365	238
15 DF	365	300	238
18 DF	365	365	238
16 DF	490	240	238
20 DF	490	300	238

Tabelle 1.5: Abmessungen von Mauerwerkssteinen [9]

Die Wahl der Steinformate wird durch arbeitstechnische, wirtschaftliche und gestalterische Überlegungen bestimmt.

Kleinformatige Steine werden verwendet für:

- Wände mit komplizierten Grundrissformen, Pfeilern, Stürzen und Bögen, aber auch für unverputztes Sichtmauerwerk
- Ziegel und Kalksandsteine für Mauerwerk mit höheren Festigkeitsanforderungen.

Großformatige Steine werden verwendet für:

- Die Rationalisierung der Arbeitsabläufe für einfache, großflächige Innen- und Außenwände
- Porenbeton und Leichtbetonsteine.

Folgende Abkürzungen werden für den Mauerstein verwendet:

KS-Norm	Steinart	Druckfestigkeitsklasse	Rohdichteklasse	Format
<b>DIN 106</b>	<b>KS L</b>	<b>12</b>	<b>1,2</b>	<b>2 DF</b>
	Kalksand-Lochstein	mind. 12 N/mm <sup>2</sup>	1,01 bis 1,20 kg/dm <sup>3</sup>	240x115x113

## 2. Interaktion zwischen Mauerwerk und Stahlrahmen

### 2.1 Allgemein

Die Konstruktion mauerwerksausgefachter Stahlrahmen ist ein häufig anzutreffendes Bauelement im Bauingenieurbereich. Zur Verstärkung des Mauerwerks und zur Verbesserung der Biegezugfestigkeit wird Mauerwerk in Stahlrahmen ausgefacht. Die Stahlstützen und Stahlriegel werden als Hauptkonstruktion in einem quadratischen Rahmenprofil aufgestellt, sodass die Wände keine vertikaltragende Funktion haben. Es ermöglicht dem Bauherrn seine Räume großzügig und unabhängig zu entwerfen. Da die Wände keine tragende Funktion haben, kann jede Grundrissaufteilung optimal und individuell geplant werden. Auch hier können die Baustoffe und Wandsysteme frei gewählt werden.

Die Kräfte, die ein System belasten, sind horizontale und vertikale Kräfte. Ein schweres Erdbeben ist eine horizontale Naturkraft, was für die Baukonstruktion der schlimmste Fall wäre. Wegen dem Gesamteigengewicht werden die seitlichen Kräfte, insbesondere die Erdbebenkräfte, zunehmen. Durch den Einbau von Stahlrahmen oder Stahlfachwerken mit Ausfachung werden die Horizontalkräfte aufgenommen. Obwohl die Ausfachung im Allgemeinen als nichttragendes Element betrachtet wird, ist beim Erdbeben ein deutlicher Einfluss der Ausfachung auf das Trag- und Verformungsverhalten zu erkennen.

### 2.2 Steifigkeit, Duktilität und Dämpfung

Steifigkeit, Duktilität und Dämpfung sind Eigenschaften, die für Aufnahmekräfte im Bauelement interessant sind. Die Steifigkeit hat besonderen Einfluss auf das Bauelement, im Hinblick auf die Aufnahme der Kräfte. Ein Material mit größerer Steifigkeit hat eine geringere Verformung und lässt daher die größeren Kräfte auf die Konstruktion wirken.

Die Duktilität eines Elements beeinflusst das Erdbebenverhalten und beschreibt die Fähigkeit des Elements bei den mechanischen Lasteinwirkungen. Die lokale Duktilität bezieht sich auf einzelne Bauteile. Die globale Duktilität auf die Gesamtkonstruktion.

Die Duktilität ist eine große plastische Verformung, eine der Eigenschaften des Stahls, die von der Ausfachung im Stahlrahmen beeinflusst wird.

Dritter wirksamer Parameter ist die Dämpfung, also der Verzehr von ankommender Energie durch die Verformungsarbeit. In den Bauwerken mit großen Dämpfungen werden die Schwingungen schneller unter dynamische Lasten zum Stillstand gebracht.

Mit der Ausfachung im Stahlrahmen wird einerseits die Festigkeit von dem Stahlrahmen gesteigert und andererseits das elastische Verhalten des Rahmens verringert. Deshalb wird das mechanische Verhalten des Rahmens bei normalen und dynamischen Belastungen verändert. Die großen Steifigkeitsunterschiede zwischen beiden Tragelementen führen zu einer sehr ungeeigneten Konstruktion, was die Lastenabtragung betrifft. Ein wesentlicher Nachteil

besteht darin, dass die Horizontalkräfte im Mauerwerk durch Bildung einer Druckdiagonale abgeleitet werden und diese meist unter einem großen Neigungswinkel als Horizontalkräfte reagieren. Somit kommt es zu einem sehr raschen Versagen der Ausfachung.

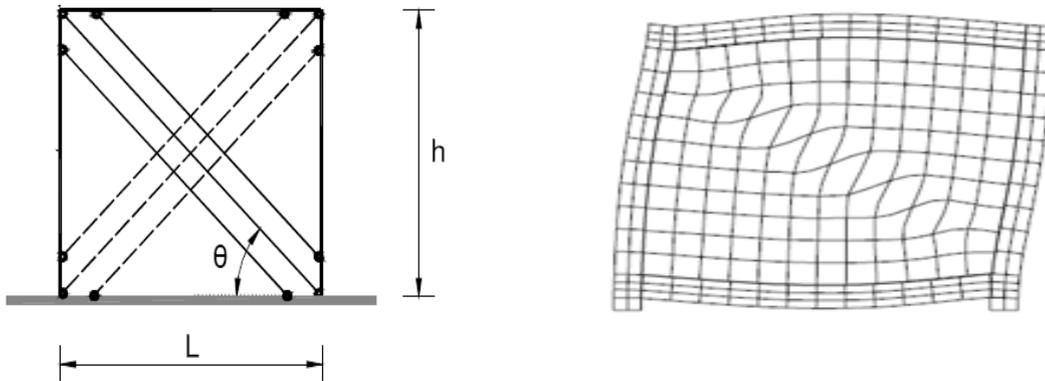


Abbildung 2.1: Verhalten von Ausfachung [10]

### 2.3 Ermittlungen von Steifigkeiten bei den ausgefachten Stahlrahmen

In den ausgefachten Stahlrahmen sollte die Steifigkeit von Stahlrahmen und Ausfachung ermittelt werden, damit das ganze System gleiches Verformungsverhalten aufweisen kann. Hierzu ist eine Verbundwirkung zwischen Stahlträger und Ausfachung für alle Grenzzustände herzustellen. Man kann mithilfe von Stahlstab die Stahlträger und die Ausfachungen verbinden. Wenn miteinander verbundene Stahlrahmen und Ausfachung nicht das gleiche Verformungsverhalten aufweisen, müssen die Verbundmittel die vorhandenen Verformungsunterschiede aufnehmen.

Die Möglichkeit von Formänderungen im Mauerwerk müssen so berücksichtigt werden, dass diese Formänderungen keinen negativen Einfluss auf die Gebrauchstauglichkeit des Mauerwerks haben. Man kann auch mithilfe vom Anker die Bewegungen zwischen dem Mauerwerk und den Stahlstrukturen aufnehmen.

Die wichtigen Punkte, die man beim ausgefachten Stahlrahmen beachten muss, sind:

- Stahl dehnt sich bei Temperaturunterschieden sehr stark aus, dagegen ist die Ausdehnung beim Mauerwerk sehr gering.
- Stahl erfordert dauerhaften Korrosionsschutz, dagegen ist das Mauerwerk korrosionsbeständig.
- Stahl hat einen sehr hohen Schmelzpunkt, und ändert rapide seine Eigenschaften bei Temperatureinwirkungen, er muss dauerhaft geschützt werden; das Mauerwerk ist temperaturunempfindlicher, feuerbeständiger und im Brandfall besser geeignet.
- Mauerwerk hat im Gegensatz zum Stahl gute bauphysikalische Eigenschaften. Es kann als guter Wärmespeicher, besonders mit Lochsteinen dienen.

### 2.4 Verhalten vom Mauerwerk im Stahlrahmen

Für das Mauerwerksverhalten im Stahlrahmen wurden 3 verschiedene Modelle analysiert:

- a) Ein Stahlrahmen
- b) Ein elastisches Mauerwerk
- c) Ein Stahlrahmen mit einem elastischen Mauerwerk als Ausfachung.

#### 2.4.1 Stahlrahmen unter Last

Das Verhalten von einem Rahmen ohne Ausfachung wird in Abbildung 2.2 gezeigt. Ein Rahmen wird unter Vertikal- und Horizontalkraft belastet.

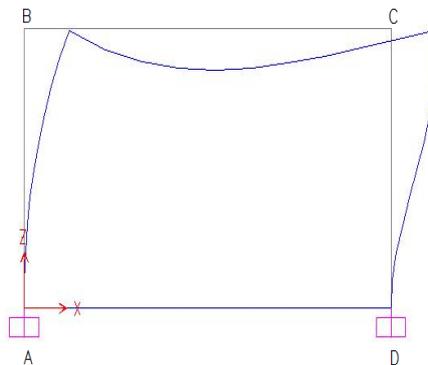


Abbildung 2.2: Verformungsverhalten vom Stahlrahmen [11]

Wie in der Abbildung 2.2 dargestellt, ändert sich der Abstand zwischen Punkten B & D (der Abstand wird kleiner). Hingegen wird der Abstand zwischen Punkten C & A größer. Es gibt hier keine Hindernisse, um die Verformung von Stahlrahmen zu verhindern.

#### 2.4.2 Mauerwerk unter Last

In der Abbildung 2.3 soll sich eine Wand unter gleicher Belastung verformen. Sie wird sich wie ein Kragarm verhalten. Die Linie AB wird länger und aufgrund mangelnder Zugsteifigkeit im Stein entstehen Risse im Punkt A. Gleichzeitig werden in den Punkten B und D Druckspannungen erzeugt.

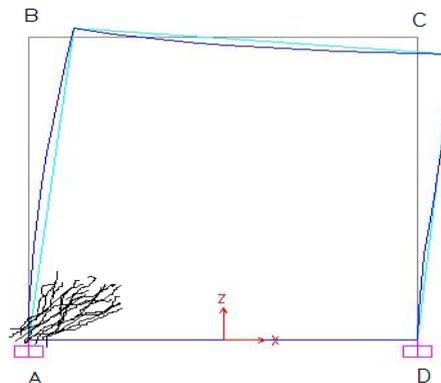


Abbildung 2.3: Verformungsverhalten der Wand [11]

### 2.4.3 Ausgefachte Stahlrahmen unter Last

Bei dem Rahmen mit Ausfachung wird das Verhalten der Wand und des Stahlrahmens verändert. Die beiden Punkte B&D befinden sich unter Druckspannung. Die Horizontalkräfte werden durch Bildung einer Druckdiagonale im Mauerwerk abgeleitet. Unsere Versuchswand im Rahmen funktioniert wie ein Druckdiagonal und verhindert die Verkürzung von Linie BD. Der Rahmen funktioniert wie ein Fachwerk. Wie zu sehen ist, haben die beiden Punkte B&D mehr Druckspannung.

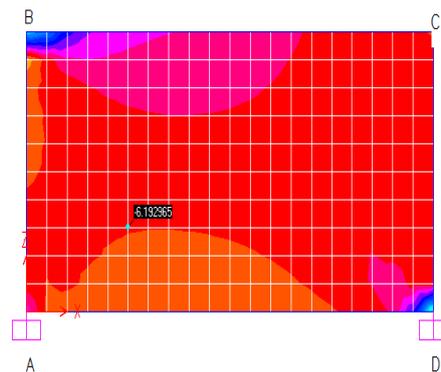


Abbildung 2.4: Spannungsverteilung des ausgefachten Stahlrahmens [11]

### 2.5 Spannungsverteilung im Stahlrahmen mit Ausfachung

Wie die Abbildung 2.5 zeigt, befindet sich im ausgefachten Stahlrahmen die maximale Zugspannung in der Mitte der Zugdiagonale, und die Maximale Druckspannung in den Eckpunkten der Druckdiagonalen. Die Längsdehnung der Zugdiagonale ist ungefähr ein Zehntel der Verkürzung der Druckdiagonale, da die mittlere Zugspannung viel kleiner als die Druckspannung im Mauerwerk ist. Es steht fest, dass das Querversagen von der Mitte aus beginnt und die Biegefestigkeit keinen Einfluss auf die Spannungen in der Mitte und auf das Querversagen hat.

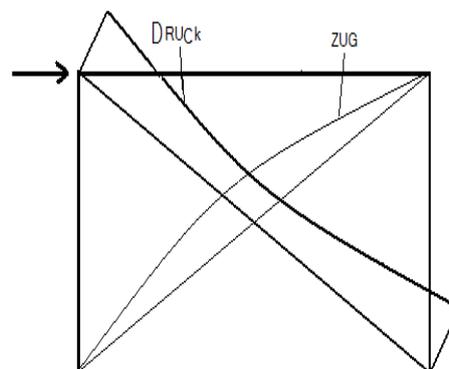


Abbildung 2.5: Spannungsverteilung im Stahlrahmen mit Ausfachung

### 2.6 Versagen von Stahlrahmen mit Ausfachungen

Hier wird ein ausgefachter Stahlrahmen unter horizontaler Kraft belastet. Die horizontale Kraft wird mithilfe einer Druckpumpe im Laufe des Prozesses gesteigert. Die vertikalen Kräfte wie Eigengewicht und Verkehrslast bleiben konstant und sind im Vergleich zur horizontalen Kraft zu vernachlässigen. Die mögliche Entstehung von Rissen bis hin zum Bruch der Ausfachung werden hier erklärt.

#### 2.6.1 Grenzrisse

Im ausgefachten Stahlrahmen werden Stahlrahmen und Ausfachung bei Beginn der Belastung zusammengehalten. Die Ausfachung wird an zwei Ecken (B&D) unter Druck und an zwei Ecken unter Zug (A&C) belastet. Mit der Steigerung der Belastung entstehen im Laufe der Zeit Risse, an den unter zugbelastenden Ecken, sogenannte Grenzrisse (siehe Abbildung 2.6). Die Grenzrisse haben keinen großen Einfluss auf die Festigkeit. Nach Entstehung der Grenzrisse bleibt immer noch das Verhalten des Systems linear.

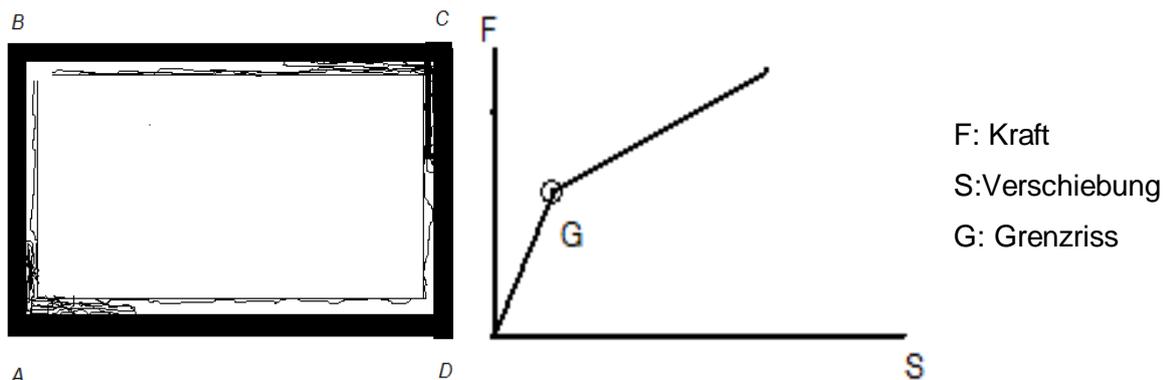


Abbildung 2.6: Grenzrisse zwischen Wand und Rahmen

#### 2.6.2 Kreuzrisse

Bei weiterer Steigerung der Belastung entstehen zusätzlich Risse längs der Diagonale BD. Bei Änderung der Krafrichtung entstehen Risse in der Diagonale AC. Deswegen nennt man sie Kreuzrisse. Bis zu ihrer Entstehung ist das Verhalten des Systems linear. Danach geht das System in ein nicht linear-elastisches Verhalten über.

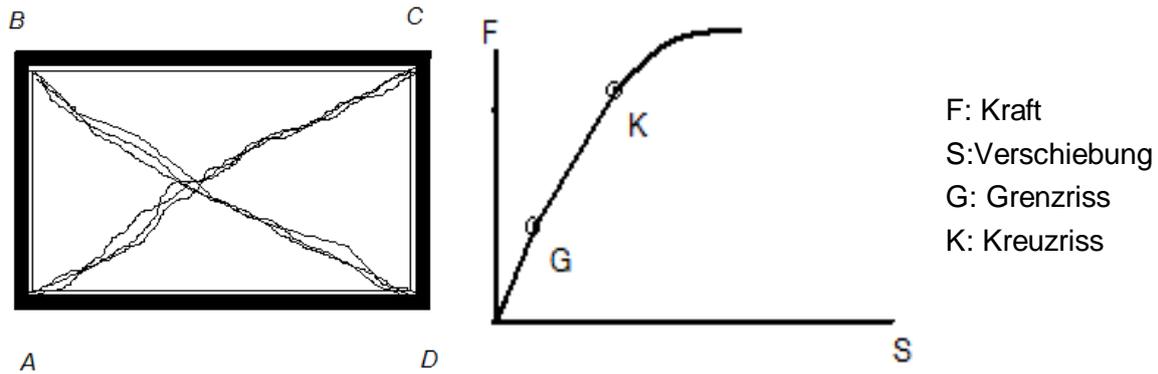


Abbildung 2.7: Diagonalrisse in einer eingefassten Wand

### 2.6.3 Eckversagen

Mit zunehmender Krafteinwirkung entsteht Eckversagen in den Eckpunkten B&D, sodass die Wand an den Eckpunkten zerspringt. Das Eckversagen in der Ausfachung folgt nach Entstehung der Kreuzrisse. Infolge der großen Druckspannungen in den Ecken B&D wird das Verhalten des Systems nicht linear und bleibt nach dem Versagen weiterhin nichtlinear. Nach dem Eckversagen geht das System mit zunehmender Kraft in den Bruchzustand über.

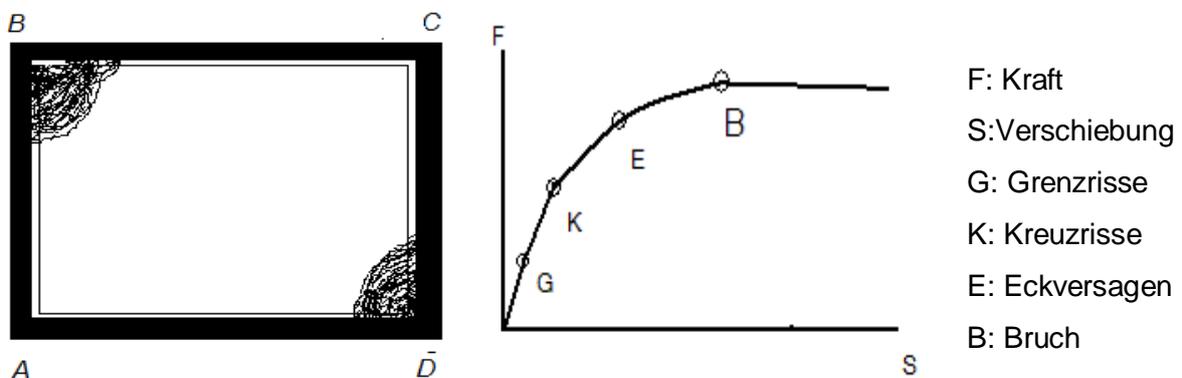


Abbildung 2.8: Eckversagen in einer eingefassten Wand

Im Allgemeinen sind die Gründe des Versagens bei dem ausgefachten Stahlrahmen abhängig von:

- Den Spannungen in der Mitte
- Dem Baumaterial
- Dem Verhältnis von Höhe und Breite des Stahlrahmens
- Dem homogenen oder nicht homogenen Ausfachungsmaterial.

### 3. Mauersteine in Deutschland

Die genormten Mauersteine in Deutschland sind:

1. Ziegelstein
2. Kalksandstein
3. Porenbetonstein
4. Leichtbeton und Betonstein
5. Hüttenstein
6. Naturstein

#### 3.1 Ziegelstein

Die Eigenschaften und Abmessungen des Mauerziegels sind in den DIN Normen 105-1 bis 5, 105-100 und EN 771-1 festgelegt. Mauerziegel wird aus Ton oder anderen tonhaltigen Mitteln, mit oder ohne Sand, Wasser und anderen Zusatzmitteln hergestellt. Nach der Mischung wird geformt und gebrannt. Anschließend erhält der Mauerziegel die endgültige Festigkeit.

##### 3.1.1 Druckfestigkeit

Die Benennung der Festigkeitsklasse erfolgt nach Einzelwerten einer Prüfserie. In der Regel wird die Prüfung an sechs luftgetrockneten Proben mit senkrechter Belastung zur Lagerfläche durchgeführt. Beim Mauerziegel liegt die Druckfestigkeit zwischen 2.5 bis 75.0 N/mm<sup>2</sup>. [12]

##### 3.1.2 Rohdichte

Die Ziegelrohndichte wird aus Maße des getrockneten Ziegels und dem äußeren Volumen einschließlich aller Hohlräume (Löcher, Grifflöcher, Mörteltaschen) bestimmt. Durch den Flächenanteil der Löcher und den Porenanteil der Zusatzstoffe im Ziegel erreicht man eine geringere Rohdichte. Die Lochflächen sind bei jedem Ziegel unterschiedlich. Nach Angaben der DIN Normen sind Löcher von 15 % bis 52 % der Lagerfläche erlaubt. Die Löcher sind so anzuordnen, dass viele senkrechte Kanäle in der Wand, nach dem die Mauerziegel vermauert sind, entstehen. Die Rohdichte von Mauerziegel ist zwischen 510 bis 2400 kg/m<sup>3</sup>. Nach der Faustformel gilt: je schwerer der Stein, desto höher die Druckfestigkeit; je höher der Schalldämmwert, desto weniger die Wärmeleitfähigkeit und umgekehrt. [12]

##### 3.1.3 Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit beschreibt, wie viel Wärme durch einen Stoff hindurchgeht. Mit geringer Wärmeleitfähigkeit wird weniger Wärme durch einen Stoff hindurch gelangen. Die DIN 4108-4 beinhaltet wärme- und feuchtigkeitsschutztechnische Bemessungswerte für die Bau-

stoffe in Gebäuden. Die Wärmeleitfähigkeit des Mauerziegels nach DIN 4108-4 liegt zwischen 0.19 bis 1.40 W/(m.k).

#### 3.1.4 Wasseraufnahmekoeffizient

Der Wasseraufnahmekoeffizient  $\omega$  ist die kapillare Wasseraufnahme vom Stein.

Der Wasseraufnahmekoeffizient ( $\omega$ ) vom Mauerziegel liegt bei den 36 Versuchswerten zwischen 4 bis 16 Kg/(m<sup>2</sup>.√h). [13]

#### 3.1.5 Wasserdampfdurchlässigkeit

Die Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl ( $\mu$ ) zeigt die Wasserdampfdurchlässigkeit. Der wert  $\mu$  gibt an, um wie viel Mal größer der Diffusionswiderstand eines Materials als der einer gleichdicken Luftschicht ist.

Für Vollklinger und Hochlochklinker ist  $\mu = 50/100$ ,

Für Vollziegel und Hochlochziegel ist  $\mu = 5/10$ .<sup>4</sup>

#### 3.1.6 Frostbeständigkeit

Die Frostbeständigkeit wird vor allem bei Klinker und Vormauerziegel gefordert. Das Prüfverfahren wird nach der DIN 52 252, Prüfung der Frostwiderstandsfähigkeit von Vormauerziegel und Klinker, durchgeführt.

#### 3.1.7 Zugfestigkeit

Die Mauersteinzugfestigkeit wird für die Beurteilung der Mauerwerkstragfähigkeit vor allem bei Zugbeanspruchung benötigt. Die Prüfung der Zugfestigkeit ist relativ schwer. Sie kann aus der Normdruckfestigkeit abgeleitet werden.

Berechnung der Zugfestigkeit beim Mauerziegel:  $\beta_z = 0,026 \cdot \beta_D$ .<sup>5</sup>

Kriechen, Schwinden, Elastizitätsmodul und Temperaturänderung beim Mauerziegel können nach der Tabelle 1.4 im Kapitel 1 ausgerechnet werden.

#### 3.1.8 Ziegelarten

Die mittlere Druckfestigkeit, wärmeschutztechnische Eigenschaften, Dauerhaftigkeit und Brandwiderstandsklasse von Mauerziegeln müssen vom Hersteller angegeben werden.

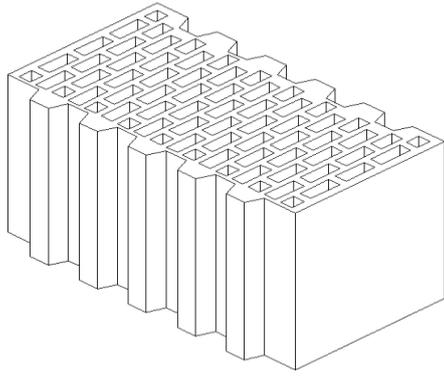
Die DIN EN 771-1 hat die Mauerziegel in zwei Gruppen aufgeteilt:

- LD-Ziegel:  
Mauerziegel mit einer Brutto-Trockenrohdichte kleiner als 1000 kg/m<sup>3</sup> zur Verwendung in geschütztem Mauerwerk.

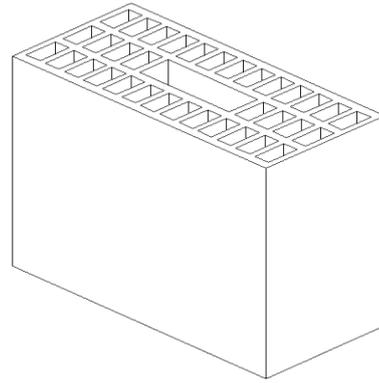
---

<sup>4</sup>) Nach DIN 4108- 6

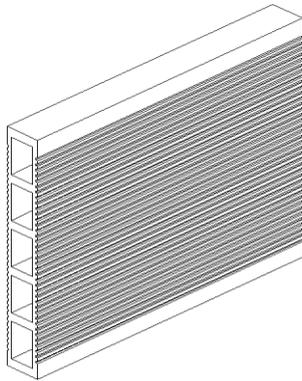
<sup>5</sup>)  $\beta_z$  Zugfestigkeit,  $\beta_D$  Druckfestigkeit



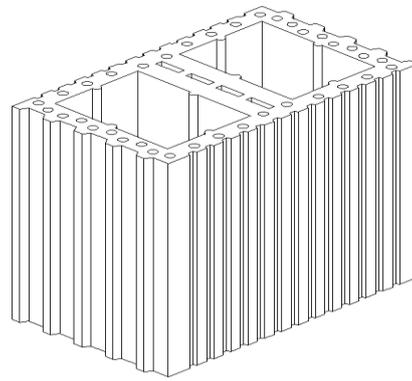
Hochlochziegel mit Nut- und Feder



Hochlochziegel



Langlochziegel für Trennwände

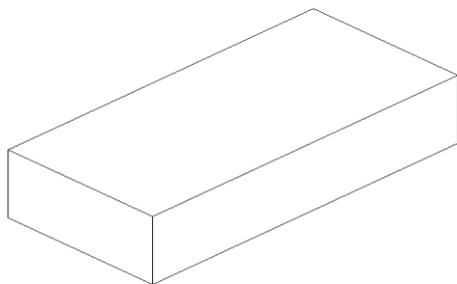


Füllziegel

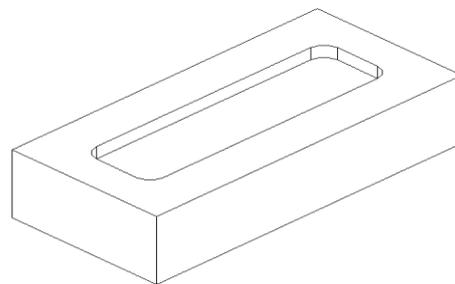
Bild 3.1: häufige LD- Ziegelsteine [14]

- HD-Ziegel

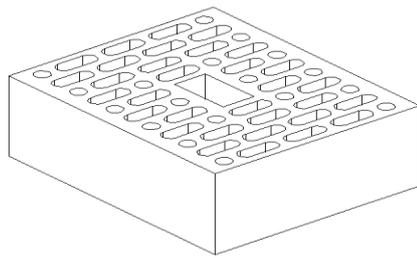
Mauerziegel mit einer Brutto-Trockenrohichte größer als  $1000 \text{ kg/m}^3$  zur Verwendung in geschütztem Mauerwerk.



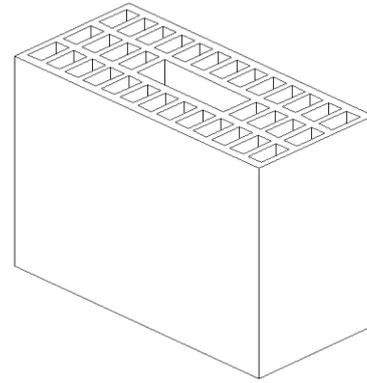
Vollziegel



Mauerziegel mit Mulde



Hochlochziegel



Hochlochziegel

Bild 3.2: häufige HD Ziegelsteine [14]

Auf dem deutschen Markt kostet ein Stück Ziegel zwischen 62 bis 92 Cent.<sup>6</sup>

### 3.2 Kalksandstein

Die Eigenschaften und Abmessungen der Kalksandsteine sind in den DIN EN 771-2, 772-1-20 festgelegt. Die zusätzlichen Anforderungen der Kalksandsteine beinhalten die DIN 106-1, 106-2, DIN V 20000-402.

Der Kalksandstein ist ein massiver, schwerer Stein, der aus gemahlenem Kalk, kieselsäurehaltigen Stoffen (wie z.B. Sand) und wenig Wasser besteht. Nach der Mischung wird er verdichtet und unter Dampfdruck erhärtet. Der Kalksandstein erhält seine Festigkeit durch die Reaktion zwischen Kalkhydrat und Sand. Werden überwiegend andere kieselsäurehaltigen Stoffe zur Herstellung von Kalksandsteinen verwendet, dürfen sie die Eigenschaften der Produkte nicht ungünstig beeinflussen.



Bild 3.3: Kalksandsteine [15][35]

---

<sup>6</sup> ) Nach aktuellen Angaben von Berg und Mark Firma in Wuppertal.

Die Rohdichte von KS-Steinen ist zwischen 500 bis 2200 kg/m<sup>3</sup> und die Druckfestigkeit liegt zwischen 5 bis 75 N/mm<sup>2</sup>. Die Prüfung wird an sechs Probekörpern durchgeführt.

Die Kalksandsteine sind in ihren Eigenschaften dem Schwerbeton sehr ähnlich. Das Kapillarsystem fehlt bei den Kalksandsteinen. Deshalb nehmen sie Wasser langsam auf und geben es erst spät wieder ab. Die Wärmeleitfähigkeit wegen der Rohdichte liegt zwischen 0.5 bis 1.3 W/(m.k). Kalksandsteine werden für mehrschichtige Außenwände verwendet. Im Vergleich zu den Ziegelsteinen sind Kalksandsteine hinsichtlich der Herstellung und Verarbeitung relativ günstig. Hohe Formbeständigkeit ist ein weiterer Vorteil der Kalksandsteine. Sie werden als Vollsteine, Lochsteine, Blocksteine, Hohlblocksteine, Verblender und als Vormauersteine verwendet. Die Frostbeständigkeit wird nur an KS-Vormauersteinen und KS-Verblendern getestet. Wasseraufnahmekoeffizient  $\omega$  liegt bei den 42 Versuchswerten von Kalksandsteinen zwischen 1,5 bis 20 Kg/(m<sup>2</sup>.√h). [13], [16].

Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl ist nach der DIN 4108- 6:

$\mu=5/10$  für die Rohdichte von 1000 bis 1400 kg/m<sup>3</sup> des Steins und

$\mu= 15/25$  für die Rohdichte von 1600 bis 2200 kg/m<sup>3</sup>.

Bei zentrischer bzw. nahezu zentrischer Beanspruchung können Wände aus Kalksandstein relativ hohe Normalkräfte aufnehmen, sodass der Standsicherheitsnachweis in vielen Fällen problemlos erbracht werden kann. Kalksandsteine sind nach der DIN 4102-4 der Baustoffklasse A1 zuzuordnen, ebenso Mörtel nach der DIN 1053. Ein Brandverhalten mit der Klassifizierung F 90 A ist bereits mit einer massiven, 11,5 cm starken Kalksandsteinwand zu erreichen. Auf dem deutschen Markt kostet ein Stück Kalksandstein z.Z. zwischen 58 bis 94 Cent.<sup>7</sup>

Kriechen, Schwinden, Elastizitätsmodul und Temperaturänderung des Kalksandsteins werden nach Tabelle 4.1 im Kapitel eins bestimmt.

Die Zugfestigkeit des Kalksandsteins ist:  $\beta_z = 0,04$  bis  $0,06 \cdot \beta_D$ .

### 3.3 Porenbetonstein

Die Normreihen DIN EN 771-4,679, 680, 4166, 4223-1 und DIN V 4165-100 beschreiben die Eigenschaften und Leistungsanforderungen für dampfgehärteten Porenbetonstein.

Für den Herstellungsprozess von Porenbetonstein werden Quarzsand als Zuschlagstoff, Kalk und Zement als Bindemittel, Anhydrit oder Gips zur Verbesserung der Materialeigenschaften und Wasser verwendet. Als Porenbildner kommt Aluminiumpulver in die Mischung. Die Kombination von niedriger Rohdichte und hoher Festigkeit ist eine besondere Eigenschaft des Porenbetons. Die Porenbetonsteine werden zu den besten Steinen gezählt. weitere Vorteile von Porenbetonsteinen sind geringe Maßtoleranzen, geringe Wärmeleitung und

---

<sup>7</sup>) Nach aktuellen Angaben von Berg und Mark Firma in Wuppertal.

### 3. Mauersteine in Deutschland

---

geringes Steingewicht. Die Stoßfugen mit Nut, Feder oder Glatt und Griffhilfen sind besondere Merkmale bei diesem Stein.

Die Rohdichte liegt zwischen 350 und 800 Kg/m<sup>3</sup>. Die Druckfestigkeit variiert zwischen 2 bis 8 N/mm<sup>2</sup>.

Die Zugfestigkeit ist für Porenbetonsteine:  $\beta_z = 0,09$  bis  $0,118 \cdot \beta_D$ .

Die Wärmeleitfähigkeit beträgt 0.11 bis 0.25 W/(m.k). Mit dieser Wärmeleitfähigkeit entfällt ein zusätzlicher Wärmeschutz. Im Falle erheblicher Wasseraufnahme aufgrund der Porenstruktur wird die Wasserdampfdiffusion beim Porenbetonstein verzögert. Deshalb können bei einem Neubau besonders in der kalten Jahreszeit gelegentlich Feuchtigkeitsprobleme entstehen. In der Regel muss bei den Außenwänden aus Porenbeton eine Putzschicht vorgesehen werden. Porenbetonsteine können per Hand oder mit einer Säge halbiert werden. Sie sind besonders geeignet für die Anwendung im Fachwerkbau.

Die Abmessungen von Porenbetonsteinen sind in vielen Formaten möglich. Die gängigen Abmessungen sind:

Länge l (mm): 332, 399, 499, 599, 624

Höhe h (mm): 249

Dicke d (mm): 175 bis 365

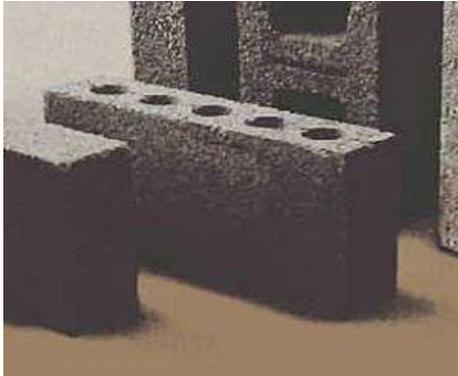


Bild 3.4: Porenbetonsteine [17][36]

Wasseraufnahmekoeffizient  $\omega$  liegt bei 5 Versuchswerten von Porenbetonsteinen zwischen 3 bis 9 Kg/(m<sup>2</sup>·√h). Kriechen, Schwinden, Elastizitätsmodul und Temperaturänderung des Porenbetonsteins können der Tabelle 4.1 im Kapitel 1 entnommen werden. Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl ist nach DIN 4108-6 ungefähr  $\mu=5/10$ . Die Mauersteine aus Porenbeton sind aufgrund ihrer mineralischen Zusammensetzung feuerbeständig. Deswegen sind Porenbetonsteine für die Herstellung der Brand- und Trennwände geeignet. Die Bauteile aus Porenbeton decken alle Feuerwiderstandsklassen bis F 180 ab. [13]

Ein Kubikmeter Porenbetonstein kostet auf dem deutschen Markt z.Z. 95 bis 110 €.<sup>8</sup>

---

<sup>8</sup>) Nach aktuellen Angaben von Berg und Mark Firma in Wuppertal.

#### 3.4 Leichtbeton und Betonstein

Die Leichtbetonsteine sind in den DIN EN 771-3,1520, DIN 18148, 18162, 18151-100, 18152-100 geregelt. Leichtbetonsteine werden aus Zement, Wasser, sowie porigen und mineralischen Zuschlägen hergestellt. Als Zuschläge kommen Bims, Blähton, Blähglas und Steinkohlenschlacke zum Einsatz.

Leichtbetonsteine verfügen über eine gute Putzhaftung und sind aufgrund ihrer z.T. großen Formate schnell und damit wirtschaftlich zu verarbeiten.

Die Rohdichte von Leichtbetonsteinen liegt zwischen 450 bis 2400 kg/m<sup>3</sup>. Die Druckfestigkeit liegt zwischen 2 bis 48 N/mm<sup>2</sup>. Die Zugfestigkeit beträgt:  $\beta_z = 0,086$  bis  $0,105 \cdot \beta_D$ .

Die Wärmeleitfähigkeit ist abhängig von der Rohdichte. Sie ändert sich zwischen 0.16 bis 2.1 W/(m.k). Sie ist höher als die Wärmeleitfähigkeit des normalen Betonsteins. Der Wasseraufnahmekoeffizient  $\omega$  liegt bei 7 Versuchswerten von Leichtbetonsteinen zwischen 1 bis 2 Kg/(m<sup>2</sup>.√h). [13]

Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl ist nach DIN 4108-6 ungefähr  $\mu = 5/10$ .



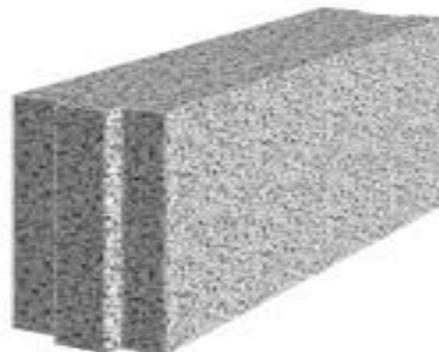
Hohlblöcke aus Leichtbeton (Hbl)



Vollblöcke aus Leichtbeton (Vbl)



Vollsteine aus Leichtbeton (V)



Wandbauplatte (Wpl)

Bild 3.5: Leichtbetonsteine[18]

Die Steinarten und Kurzbezeichnungen des Leichtbetons sind:

- Hohlblöcke aus Leichtbeton (Hbl)
- Vollblöcke aus Leichtbeton (Vbl)
- Vollsteine aus Leichtbeton (V)
- Wandbauplatte (Wpl)[18]

Ein Stück Leichtbetonstein mit den Maßen von 49 x25 cm kostet z.Z. 4,50 € auf dem deutschen Markt.<sup>9</sup>

Kriechen, Schwinden, Elastizitätsmodul und Temperaturänderung des Leichtbetonsteins können nach Tabelle 4.1 im Kapitel 1 entnommen werden.

Im Bild 3.5 sind die Bilder von möglichen Steinarten abgebildet.

### 3.5 Hüttensteine

Die Hüttensteine werden in der Regel aus:

- Hochofenschlacke (zumeist granuliert als Hüttensand),
- Zement nach DIN 1164 oder Kalk nach DIN 1060 als Zuschlag und
- hydraulischem Bindemittel hergestellt.

Die Mischung wird entweder in Stempelpressen gepresst oder in Formen gerüttelt. Die Steine werden an der Luft erhärtet. Man kann auch durch Hinzufügung von CO<sub>2</sub>-haltigen Abgasen oder Dampf den Prozess beschleunigen.

Die Hüttensteine sind in der DIN 398 baustofflich geregelt. Die genormten Hüttensteine sind in der Tabelle 3.1 mit ihren Eigenschaften tabelliert.

Kurzzeichen	Bezeichnung	Rohdichte Kg/m <sup>3</sup>	Festigkeit N/mm <sup>2</sup>	Wärmeleitfähigkeit W/(m.k)
HSV	Hüttenvollsteine	1,6...2,0	12...28	0,76
HSL	Hüttenlochsteine	1,2...2,6	6...12	0,52
HHbL	Hüttenhohlblocks.	1,0...1,6	6...12	0,47

Tabelle 3.1: Hüttensteinarten mit ihren Eigenschaften [19]

Die Hüttensteine sind für den Wohnungsbau aufgrund des hohen Eigengewichts gute Schallschutzsteine. Außerdem besitzen Wände aus Hüttensteinen eine erhöhte Wärmespeicherkapazität.

---

<sup>9</sup>) Nach aktuellen Angaben von Berg und Mark Firma in Wuppertal.

Die Hüttensteine enthalten keine brennbaren Stoffe. Bei einem schnellen Temperaturanstieg ändert sich ihr Volumen deshalb nicht. Sie besitzen einen hohen Feuerwiderstand. Die Feuerwiderstandsklasse F90 wird bei einer Wandstärke von 115 mm erreicht.

Kriechen, Schwinden, Elastizitätsmodul und Temperaturänderung des Hüttensteins können der Tabelle 4.1 im Kapitel 1 entnommen werden.

Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl ist nach DIN 4108-6 für Hüttensteine  $\mu = 70/100$ .



Bild 3.6: Hüttensteine [20][37]

### 3.6 Natursteine

Natursteine werden nach den DIN EN 771-6, 772-4, 772-11, 1926, 1936 und DIN 1053-14 geregelt. DIN 1053-1 gibt auch Hinweise auf Verbandarten, statische Berechnungen und zulässige Spannungen von Natursteinen. Natursteine werden im Bergbau oder im Steinbruch gewonnen. Das Natursteinmauerwerk wird heutzutage weniger für tragende Wände benutzt. Sie werden auch für massive Mauerwerke und Verblendmauerwerke verwendet. Natursteine, die für das Sichtmauerwerk verwendet werden, müssen ausreichenden Widerstand gegen Witterungseinflüsse, besonders bei Frosttauwechsel, besitzen. Natursteinmauerwerk kann auch als Trockenmauerwerk (nur für Schwergewichtmauerwerk und Stützmauer) ohne Benutzung von Mauermörtel durchgeführt werden. Die Rohdichte ist bei den dichten Natursteinen  $2800 \text{ Kg/m}^3$  und bei den porigen Natursteinen  $1600 \text{ Kg/m}^3$ . Die Wärmeleitfähigkeit ist bei den dichten Steinen  $3,50 \text{ W/(m.K)}$  und bei den porigen Steinen  $0,55 \text{ W/(m.K)}$ . [24]

Folgende Gesteinsgruppen werden nach ihrer Entstehung im Baubereich verwendet:

- Magmasteine: sie entstehen durch Abkühlung und Erstarrung des Magmas wie z.B.: Granit, Basalt, Diorit, Porphyrt.
- Sedimentgesteine: die durch Ablagerung von verwitterten Gesteinen entstehen wie z.B.: Kalkstein, Sandstein, Travertin.

### 3. Mauersteine in Deutschland

- Metamorphe Gesteine: eine Gesteinsart, die durch Einwirkung von Wärme und/oder Druck und/oder Temperatur auf andere Gesteine in der Erdkruste entsteht wie z.B.: Schiefer, Gneis, Quarzit, Marmor<sup>10</sup>.

Die mechanischen Eigenschaften von wichtigen Natursteinen sind in der Tabelle 3.2 aufgelistet.

Naturstein	Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Elastizitätsmodul [N/mm <sup>2</sup> ]· (10 <sup>3</sup> )	Biegezugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
Granit, Syenit	160...240	40...60	10...20
Dolomit, Marmor	80...180	60...90	6...15
Sandstein	30...180	20...70	12...20
Basalt	250...400	50...100	15...25
Diabas	180...250	60...120	15...25
Gneise	160...280	30...80	13...25
Travertin	20...60	20...60	4...10

Tabelle 3.2 : Die mechanischen Eigenschaften von Natursteinen [19]

Die oben genannten mechanischen Natursteineigenschaften haben einen Einfluss auf das Tragverhalten und die Druckfestigkeit von Natursteinmauerwerken. Die Druckfestigkeit und das E-Modul steigen mit abnehmender Porosität des Natursteins. Eine große Porosität schwächt die Verwitterungsbeständigkeit der Natursteine. Die Prüfung der Festigkeit von Natursteinen ist in der DIN EN 1926 „Prüfverfahren für Naturstein- Druckfestigkeitsprüfung“ und in der DIN EN 771-6 „Festlegungen für Natursteine“ geregelt. Das Bild 3.7 zeigt Sichtmauerwerk mit Natursteinen.



Bild 3.7: Natursteinmauerwerke [21][38]

<sup>10</sup>) DIN 771-6, Festlegungen für Natursteinen

### 4. Iranische Mauersteine

#### 4.1 Allgemein

Der Iran hat im Jahr 2003 hohe Verluste beim Erdbeben im Bam erlitten. Ungefähr 30.000 Menschen sind gestorben und viele Häuser wurden völlig zerstört. Die konstruktive Ausführung der Häuser in dieser Stadt hat gezeigt, dass die Mauerwerkswände im Iran für eine Erdbebensicherung nicht ausreichen. Die größte Anzahl an Gebäuden im Iran sind nicht Erdbebensicher gebaut, obwohl sich der Iran größtenteils in einer Erdbebenzone befindet.

Um die Zerstörung zu verhindern, müssen die Normen und Bestimmungen für eine erdbebensichere Konstruktion vorgestellt und ausgearbeitet werden. Der wichtigste Punkt ist das Mauerwerk, insbesondere die Mauersteine. Vor allem wird das Mauerwerk in den Gebieten, in der Armut herrscht, unsachgemäß gemauert.

In der vorliegenden Arbeit werden die wichtigen und allgemeinen Mauersteine und deren Eigenschaften erklärt.

Im Iran werden ausschließlich jene Rohstoffe verwendet, die in den jeweiligen Gebieten vorhanden sind, wie z.B.:

1. Khesht
2. Ajor
3. Block simani
4. Block ghachi
5. Naturstein

Das Natursteinmauerwerk wird heute nur selten für tragende Wände benutzt. Aber viele Gebäude im Nord- und Nordwestiran werden mit Natursteinen und Massivholz gemauert. Sie werden je nach Bearbeitungsgrad und Geometrie im Trockenmauerwerk oder im regelmäßigen und unregelmäßigen Schichtenmauerwerk gemauert. Die Natursteine werden auch als Ausfachung in Holz-, Beton-, Stahltragkonstruktionen verwendet. Es dürfen nur Natursteine ohne Struktur oder Verwitterungsschäden verwendet werden.

Es gibt keine einheitlichen Regeln für die Nutzung von Mauersteinen, Mauerwerksverbänden oder Mauerwerksarten im Iran. Besonders in den Dörfern und Kleinstädten werden die Bauwerke lediglich unter Berücksichtigung der Erfahrungen von Maurern gebaut. Besonderes in vielen ländlichen Gebieten des Irans wird die traditionelle Bauweise angewendet, die von den derzeitigen Wetterverhältnissen, den vorhandenen Baumaterialien und der wirtschaftlichen Situation abhängig gemacht wird. Zur Anwendung kommt z.B. eine Stein-auf-Stein-Bauweise.

Im neuzzeitiger Mauerwerksbau des Irans werden alle Steine wie in Deutschland als Ausfachung in der Rahmentragkonstruktion gefüllt. Die Rahmen können aus Stahl-, Stahlbeton- und Holzrahmen bestehen. Manche Steine wie die Natursteine Ajor und Khesht werden als

allein tragendes Mauerwerk in Verbindung mit tonhaltigem Matsch oder Zementmörtel verwendet. Verband, Art, Form und Größe der Steine variieren regional bedingt. Ebenso gibt es auch eine Skelettbauweise, in der die Holzträger die vertikalen Lasten abtragen. Durch die Hilfe von Ajour, Khesht und Naturstein werden Zwischenräume in Verbindung mit Mörtel gefüllt.

Der Stahlrahmen-Skelettbau wurde und wird im Iran als gängige Bauart in vielen Städten benutzt. Zwischenräume sind mit Mauerwerkswänden aus Ajour, Block simani, Block ghachi gefüllt.

Die physikalischen, chemischen und mechanischen Eigenschaften der Mauersteine müssen den iranischen Normen entsprechen, nämlich:

- Der iranischen Standardnummer 7
- Der iranischen Standardnummer 2909
- Der iranischen Standardnummer 991
- Der iranischen Heftnummer 100
- Den iranischen Nationalgesetzen für Gebäude
- Dem Gesetzbuch 2800 für Erdbebengebiete.

Die obengenannten Normen umfassen einfache bauliche Anlagen aus Mauerwerk in Verbindung mit Stahlbeton, Stahl und Holzkonstruktionen. Liegen keine Regeln in den iranischen Normen vor, so kommen der internationale Standard ISO, die deutsche DIN, die amerikanische ASTM, und die britische BS zur Anwendung.

Im Iran werden die Gebäude ähnlich wie in Deutschland entsprechend ihrem Gebrauch und ihrer Wichtigkeit unterteilt. Die Anzahl von Vollgeschossen mit Mauerwerkswänden als Konstruktion wird in Abhängigkeit von der Erdbebenzone bestimmt. Die Häuser im Iran werden vorwiegend mit Keller, jedoch ohne Dachboden gebaut. Die Anforderungen an die Kellerwände sind im iranischen Nationalgesetz für Gebäude ausführlich festgelegt.

### 4.2 Khesht

In der iranischen Bauindustrie ist Khesht (Lehmstein) der meist verwendete Mauerstein. Aufgrund der einfachen Herstellung, der guten wärmedämmenden Eigenschaften und der niedrigen Herstellungskosten, wird er besonders in den ländlichen Gebieten als Baumaterial bevorzugt. Lehmsteine können mittels nassen Lehmbautechniken durch Mischung von Baulehm, Zusätzen und Wasser direkt vor Ort hergestellt werden (Stampf-, Weller-, Stroh- und Leichtlehm sowie Lehmschüttungen) oder durch trockene Lehmbautechniken vorgefertigt werden (Lehmsteine, -platten, -mörtel).

Erde, Wasser, Luft und Feuer sind die einfachsten, billigsten, und überall vorhandenen Materialien zum Bauen. Khesht wurde als Mauerwerkstein oder als Ausfachung im Skelettbau besonders mit Holzkonstruktionen mehr im Osten und Süden und meistens in den Wüsten-

gebieten des Irans verwendet. Die wesentlichen Bestandteile von Khesht sind Ton, Sand, Wasser und Zusatzstoffe, die organisch oder mineralisch sein können. Als Zusatzstoffe kommen am meisten Stroh, und je nach Region Reiskruste, Fasern von Dattelbäumen und Ziegenhaare hinzu.

Für die Herstellung werden sie nach der Mischung in vorgefertigten Holzkästen geformt und durch Pressen verdichtet. Die endgültige Festigkeit des Kheshts wird nach der Trocknung in der Sonne erreicht. Bei der Wassereinwirkung wird Khesht jederzeit weich und formbar. Deswegen müssen die Lehmwände vor Feuchtigkeit beziehungsweise Spritzwasser und vor Frost geschützt werden. Im Iran werden die Lehmwände mit Hilfe von Folien gegen aufsteigende Feuchtigkeit vom Boden her geschützt. Mit der Zugabe von Baukalk verringert sich die Wasseraufnahmefähigkeit des Kheshts.

Für den Verbund der Steine benötigt man Mörtel, der aus sandhaltigem Ton und Wasser zusammengesetzt ist. Während des Trocknungsprozesses im Freien entsteht eine Schrumpfung des Mörtels, wodurch das Wasser verdunstet und letztendlich zu mehrfacher Rissbildung im Mörtel führt. Das Problem taucht auch bei der Kheshtherstellung auf. Um dies zu unterbinden, wird als Zusatzstoffe Stroh hinzugegeben. Für einen Kubikmeter Matsch wird 40 bis 50 kg Stroh verwendet. Um ein Gefrieren des Mörtels im Winter zu verhindern, wird in kalten Gebieten Salz der Mischung hinzugegeben.

Nach einem Versuch wurde festgestellt, dass bei Khesht aufgrund der verschiedenen Mischungsverhältnisse ein abweichender Prozentsatz an Rissen entsteht:

Bei 50 % Sand und 50 % Ton → 11 % Risse

Bei 25 % Sand und 75 % Ton → 3 % Risse

Bei 25 % Sand und 70 % Ton und 5 % Stroh → 0 % Risse

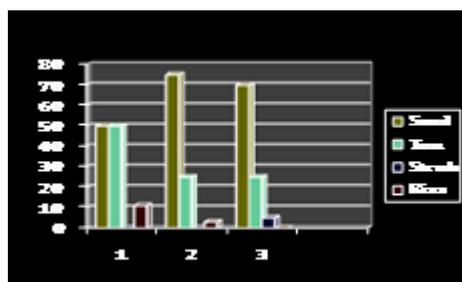


Abbildung 4.1: Prozentsatz an Rissen bei der Mischung vom Lehmstein [25]

Khesht wird im Iran in verschiedenen Maßen hergestellt:

1. Elami Khesht mit den Maßen 38x38x10 cm,
2. Khatai Khesht mit den Maßen 25x25x5 cm und
3. Herkömmliches Khesht mit den Maßen 20x20x4 cm.

Die Wärmeleitfähigkeit bei Khesht ist niedrig. Für den herkömmlichen Khesht kann die Wärmeleitfähigkeit 0,9 w/(m.k) gewählt werden.

#### 4. Iranische Mauersteine

Die Wärmespeicherfähigkeit von Khesht ist sehr gut. Wie ein Speicher kann Khesht die Wärme am Tag speichern und in der Nacht abgeben, damit die Innentemperatur im Gegensatz zur Außentemperatur höher bleibt. Khesht kann relativ schnell Luftfeuchtigkeit aufnehmen und sie bei Bedarf wieder abgeben. Dadurch wird die Feuchtigkeit der Raumluft reguliert und trägt zu einem gesunden Raunklima bei.

Die Rohdichte von Khesht liegt zwischen 1600 bis 2400kg/m<sup>3</sup>. Die Druckfestigkeit von Khesht hat eine direkte Verbindung zu der Rohdichte, dem Mischungsverhältnis, der Art der Körnungen, dem Bindemittel von Ton, der Herstellung und der Verdichtungsmethode. Die Druckfestigkeit wird nach der Rohdichteklasse wie unten tabelliert.

Rohdichte ( kg/m <sup>3</sup> )	1600	1900	2200
Druckfestigkeit ( N/mm <sup>2</sup> )	2,0	3,0	4,0
Tabelle 4.1: Druckfestigkeit, Rohdichteklasse vom Lehmstein			

Die Zugfestigkeit, die vom Feuchtigkeitsgehalt abhängig ist, ist sehr gering. Bei erdfeuchtem Lehm liegt der Wert im Bereich von 0,004 bis 0,08N/mm<sup>2</sup>. Nach der Trocknung liegt der Wert zwischen 0,3 bis 1,0N/mm<sup>2</sup>.

Lehm ist ein elasto- plastischer Baustoff. Für eine gut verdichtete Lehmprobe mit einer Rohdichte von 1700 Kg/m<sup>3</sup> gibt es einen E-Modul von 2950 N/mm<sup>2</sup>.

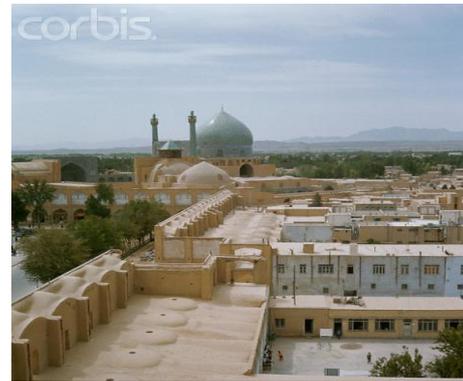


Bild 4.1: Herstellung von Wand-, und Dachkonstruktionen aus Khesht [26][39]

Khesht ist kein brandschutztechnisches und genormtes Material im Iran. Die Wände gelten erst ab einer Wandstärke von 25 cm als feuerbeständige Wand. Eine Ausfachung von Khesht mit Holzkonstruktion darf nicht als Brandwand benutzt werden.

Wegen der Dichte und der Wanddicke ist Khesht ein guter Baustoff für Schallschutz. Obwohl Khesht in Vergleich mit Porenbeton- oder Leichtbetonsteinen weniger Porigkeit hat, ergeben sich aber bessere Schallschutzwerte beim Khesht.

Die Lehmwände kommen ab einer Mindestrohichte von  $900 \text{ Kg/m}^3$  als winddichte Wände zur Verwendung. Der Längsausdehnungskoeffizient von Lehm beträgt  $5 \cdot 10^{-6} (\text{K}^{-1})$ .

Im Iran befinden sich viele alte Häuser, Brücken, Moscheen und Hallen, die mit Khesht gemauert sind. Viele dieser Bauten haben Kuppelgewölbe aus Lehmsteinen, die vor 100 Jahren gebaut worden sind (siehe Bild 4.1). [24][25]

Im Iran kostet ein Stück Khesht zwischen 15 bis 30 Cent. Der gleiche Lehmstein in Deutschland kostet 54 Cent.

### 4.3 Ajour

Ajour ist in der Zusammensetzung dem deutschen Mauerziegel sehr ähnlich. Im Iran besitzt Ajour wie in Deutschland der Mauerziegel ähnliche Formen (gelocht oder ungelocht). Die wesentlichen Bestandteile von Ajour sind Ton, Sand, Kalk und Wasser. Nach der Mischung wird Ajour in der Schalung verteilt und verdichtet. Anschließend werden die Steine im Ofen ca. 40 bis 150 Stunden bei  $1000^\circ\text{C}$  gebrannt. Mit zunehmender Brenntemperatur steigen die Rohdichte und die Druckfestigkeit.

Es gibt zwei genormte Varianten von diesem Ziegel im Iran: maschinelle und handgemachte Ziegel.

Eine aktuelle Veröffentlichung des iranischen Staates legt die Preise wie folgt fest:

Maße(mm)	Preis
Länge: $220 \pm 2$	22,5 € pro $\text{m}^3$ für 35 cm Wandbreite
Breite: $105 \pm 1$	4,92 € pro $\text{m}^2$ für 22 cm Wandbreite
Dicke: $55 \pm 1$	2,52 € pro $\text{m}^2$ für 11 cm Wandbreite

Tabelle 4.2: Maße und Preise von iranischem, maschinellem Ajour [27]

Der derzeitige Marktpreis eines Ajors beträgt 15 bis 25 Cent. [28]

Die maschinellen Steine werden gelocht. Die Löcher müssen 24 % bis 40 % senkrecht der Ziegelfläche bedecken. Die Rohdichte liegt zwischen  $300 \text{ kg/m}^3$  bis  $2000 \text{ kg/m}^3$ . Die Wasseraufnahme von maschinellem Ajour muss in 24 Stunden kleiner als 16 % und von handgemachtem Ajour 5 % vom gesamten Eigengewicht sein. Die Druckfestigkeit beträgt  $35 \text{ N/mm}^2$  und die Wasseraufnahme 15 %. [25]

Die vom iranischen Bauamt festgelegten Maße/Preise sind für handgemachtes Ajour in der Tabelle 4.3 aufgelistet.

#### 4. Iranische Mauersteine

Maße(mm)	Preis
Länge: 210±4	18,8 € pro m <sup>3</sup> für 35 cm Wandbreite
Breite: 100±3	4,1 € pro m <sup>2</sup> für 22 cm Wandbreite
Dicke: 55±2	2,1 € pro m <sup>2</sup> für 11 cm Wandbreite

Tabelle 4.3: Maße und Preise vom iranischen, Hand hergestellten Ajor [27]

Der Preis eines handgemachten Ajors auf dem iranischen Markt liegt z.Z. zwischen 5 bis 15 Cent. [28]

Bei dem handgemachten Ajor ist die Druckfestigkeit 25 N/mm<sup>2</sup>, die Wasseraufnahme beträgt 45 %. Es gibt auch Steine, die speziell für die Außenschale benutzt werden. Sie sind dünner, feiner und ohne Risse an der Oberfläche. Ihre Länge und Breite sind genau wie die beim maschinellen Ajor, aber die Dicke ist 30 oder 40 mm. Die Druckfestigkeit beträgt 12 N/mm<sup>2</sup>, die Wasseraufnahme beträgt 20 %.

Ajor wird für die Dachkonstruktion in Verbindung mit Stahl (I Profil) und dem Gipsmörtel verwendet. Die von Hand hergestellten Ajor werden meistens für die Dachdeckung genutzt. Auch werden sie vorwiegend als Ausfachung im Stahl- und Stahlbetonträger verwendet.



Bild 4.2: Deckenkonstruktion mit Ajor-ausgefachtes Stahlprofil [42]

In der iranischen Bautechnik kann Ajor als allein tragende Wand mit einer Dicken von 35 cm in zwei vollgeschossigen Gebäuden benutzt werden. Die raumabschließenden Wände besitzen eine Dicke von 22 cm oder 11 cm.

Wegen dem salzhaltigen Ton im Ajor werden sich weiße Flecken auf der Oberfläche zeigen. Um solche Flecken zu beseitigen, wird dem Gemisch ein Zusatzstoff gegen die Sulfate zugeben.

Da der Iran ein von Erdbeben häufig betroffenes Land ist, sollten die Häuser/Gebäude mit einer leichten Konstruktion gebaut werden, damit das Eigengewicht geringer ist. Man kann

mithilfe von Holzspänen oder Polymer ein leichtes Ajor herstellen. Die Holzspäne werden im Ofen zu Asche verbrannt und hinterlassen die Porigkeit. Nach einer Untersuchung im Iran wurde festgestellt, dass Ajor bei der Zugabe von 10 % Holzspänen 18 % der Dichte und 73 % der Wärmeleitfähigkeit verlieren kann. [25]



Bild 4.3: handgemachter, maschineller Ajorstein [29],[40]

Eine andere Art des Ajors ist das sogenannte Ajor rosi. Der Stein ist eine Mischung aus Kalk, silicat-und calciumhaltigem Sand (mit dem Verhältnis 1 zu 8 bis 1 zu 12) und Wasser. Mithilfe einer Pressmaschine wird der geformte Stein mit einem Druck von  $40\text{N/mm}^2$  gepresst. Danach wird der Stein ca. 4 bis 8 Stunden in Dampfwater (180 bis  $200^\circ\text{C}$ ) unter Druck belastet. Der Kalk mit Silicat wird hier gekoppelt, woraus Silicat Calcium entsteht. Die Druckfestigkeit beträgt 8 bis  $17,5\text{ N/mm}^2$ . [30]

### 4.4 Block simani

Der Block simani wird nach der iranischen Standard Nummer 70 und dem Heft 100 hergestellt. Block simani wird aus hydraulischen Zementen und mineralischen Steinen (künstlichen oder natürlichen) hergestellt. Die Zugabe von Zusatzstoffen (wie Kalk und Steinpuder) ist auch beim Block simani erlaubt, wenn keine Änderung bei den Eigenschaften entsteht. Für die Abmilderung beim Eigengewicht wird Fabrikasche verwendet.

Die Gruppeneinteilung der Steine ist von der Rohdichte abhängig:

Gruppe 1: Rohdichte von  $500$  bis  $700\text{ kg/m}^3$

Gruppe 2: Rohdichte von  $700$  bis  $1000\text{ kg/m}^3$

Gruppe 3: Rohdichte von  $1000$  bis  $1700\text{ kg/m}^3$

Gruppe 4: Rohdichte von  $1700$  bis  $2000\text{ kg/m}^3$ .

Die Wärmeleitfähigkeit des Block simani liegt bei  $0,1278\text{ W/(m.k)}$ . Die Wasseraufnahme der Steine aus den ersten 3 Gruppen beträgt  $288\text{ kg/m}^3$  und für die letzte Gruppe  $240\text{ kg/m}^3$ . [32]

Die Steinmaße (mm) und die Druckfestigkeit ( $\text{N/mm}^2$ ) sind in der Tabelle 4.3 für verschiedene Steinmaße tabelliert:

#### 4. Iranische Mauersteine

---

Maße				Druckfestigkeit	
	Länge	etierB	Höhe	ein Stein	Mitte von 3 Steinen
orgß	400	300	200	2,0	2,5
mittel	400	200	200	4,0	5,0
lettim	400	150	200	6,0	7,5
klein	400	100	200	8,0	10,0

Tabelle 4.4: Maße und Druckfestigkeit von iranischem Block simani [27]

Der Preis von einer gemauerten Wand mit diesem Stein nach aktuellen Angaben des iranischen Bauamtes beträgt:

34500 Rial (2,3 €) pro m<sup>3</sup> für eine Wand mit 35 cm Breite

75700 Rial (5,05 €) pro m<sup>2</sup> für eine Wand mit 22 cm Breite

38600 Rial (2,57 €) pro m<sup>2</sup> für eine Wand mit 11 cm Breite

Der Preis auf dem iranischen Markt liegt bei 40 bis 80 Cent pro Stück. [28]



Bild 4.4: Block simani [31],[41]

### 4.5 Block ghachi

Block ghachi wird mit Gips, Wasser und Zusatzstoffen hergestellt. Es gibt verschiedene Maße von diesem Stein auf dem iranischen Markt. Der normale Block ist 50x66x6 cm groß. Die Dicke des Block ghachi kann bis zu 12 cm erreichen.

Die Druckfestigkeit beträgt  $4\text{N/mm}^2$ , die Rohdichte ist  $940\text{ kg/m}^3$ , die Wärmeleitfähigkeit liegt bei  $0,027\text{ W/(m.k)}$ .

Der Preis auf dem iranischen Markt liegt zwischen 80 Cent bis 1,50 €.

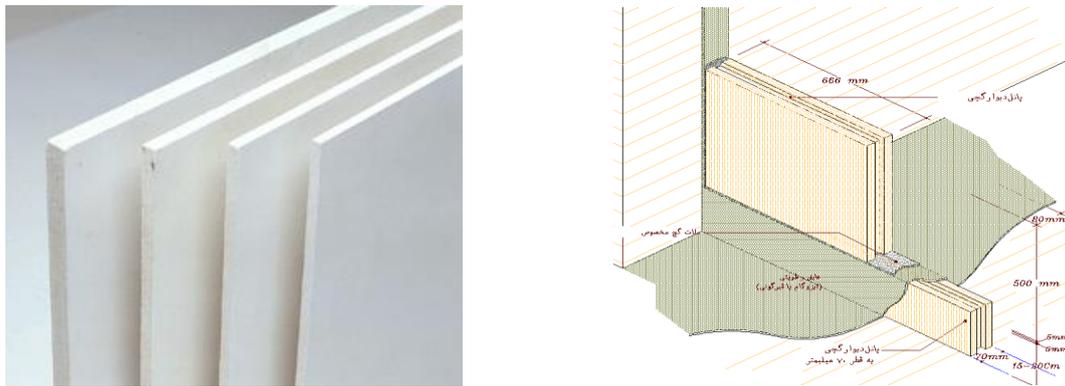


Bild 4.5: Block ghachi [28],[33]

Block ghachi ist nach der Standard Nummer 2786 genormt. Er wird nur bei den raumabschließenden Wänden verwendet. Zur Minderung des Eigengewichts hat Block ghachi in Längsrichtung Löcher. Der Abstand der Löcher voneinander und von den Kanten soll mindestens 15 mm betragen. Das Gesamtvolumen der Löcher soll 40 % vom gesamten Blockvolumen nicht überschreiten. Abdichtungen gegen Bodenfeuchtigkeit müssen beim Block ghachi gegen von außen angreifende Bodenfeuchtigkeit und unterirdische Wandbauteile angebracht werden. Die Abdichtung ist aus mindestens einer Lage Bitumenbahnen herzustellen. Die Bahnen müssen sich an Nähten, Stößen und Anschlüssen überdecken. [34]

### 5. Verformungsverhalten eines ausgefachten Stahlrahmens

#### 5.1 Modellierung/Stahlrahmen mit Ausfachung

Für die Untersuchung einer Mauerwerkswand und ihres Verformungsverhaltens mit einem Stahlrahmen wird das Programm SAP 2000-12 verwendet. Im Bild 5.1 wird die fertige Stahlkonstruktion mithilfe vom BOCAD-3D CAD-Hochleistungssystem dargestellt. Als Ausfachungsmaterialien können Beton, Lehm, Ziegel und Kalksandsteine mit unterschiedlichen Eigenschaften eingesetzt werden. Die Abmessung der Gesamtkonstruktion ist individuell zu gestalten, dabei sind die Abmessungen der einzelnen Rahmen nicht veränderbar. So kann mit wenigen typisierten Grundrahmen eine freie Gestaltung der Gesamtkonstruktion vorgenommen werden.

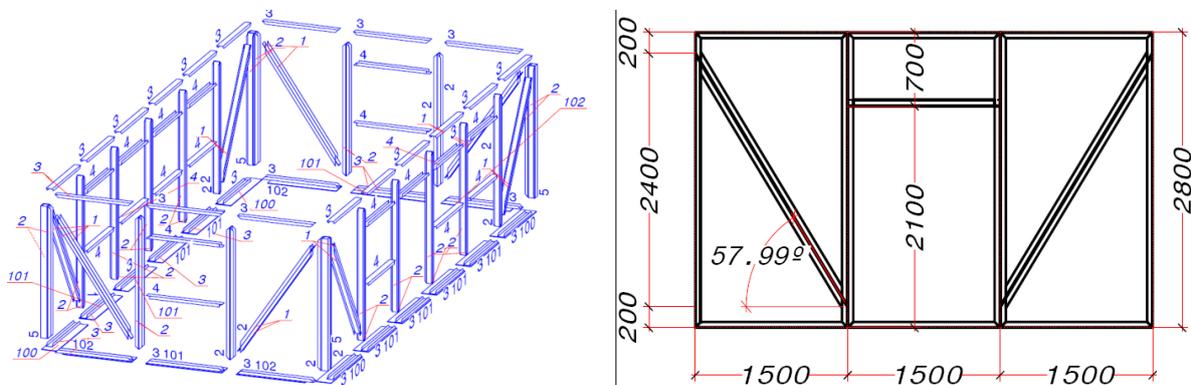


Bild 5.1: Tragkonstruktion von ausgefachtetem Stahlrahmen (Quelle: Alireza Eghdam)

#### 5.2 Lasteinwirkungen

Es werden für die Betrachtung des nichtlinearen Verformungsverhaltens dieses ausgefachten Stahlrahmens folgende Lasteinwirkungen ausgerechnet:

##### Dacheigengewicht

Decke aus Stahlbeton:  $4,5 \cdot 9 \cdot 25 \cdot 0,2 = 202,5 \text{ KN}$

Estrich:  $4,5 \cdot 9 \cdot 1 = 40,5 \text{ KN}$

##### Verkehrslast

$1,5 \cdot 4,5 \cdot 9 = 60,75 \text{ KN}$

##### Schneelast

Nach der Bautabelle von Schneider, 16. Auflage:

Köln, Zone 1, Flachdach mit  $\alpha = 0$ ,  $A = 37,5 - 118,4 \text{ m ü. NN}^{11}$

11 ) <http://de.wikipedia.org/wiki/Köln>, am 23.06.09

## 5. Verformungsverhalten eines ausgefachten Stahlrahmens

Geländehöhe  $\leq 200$  m  $s_0 = 0,75$  KN/m<sup>2</sup>,  $K_s = 1,00$

Schneelast =  $0,75 \cdot 1,0 \cdot 4,5 \cdot 9 = 30,375$  KN

### Verteilung der Decklasten

Flächenanteil:

$$[(4,5+9)/2] \cdot 2,25 = 15,187 \text{ m}^2$$

$15,187/40,5 = 0,375$  % von Deckfläche

Eigengewicht:  $243 \cdot 0,375 = 91,12$  KN/9 =  $10,12$  KN/m

Schnee:  $30,375 \cdot 0,375 = 11,39$  KN/9 =  $1,27$  KN/m

Verkehr:  $60,75 \cdot 0,375 = 22,78$  KN/9 =  $2,53$  KN/m

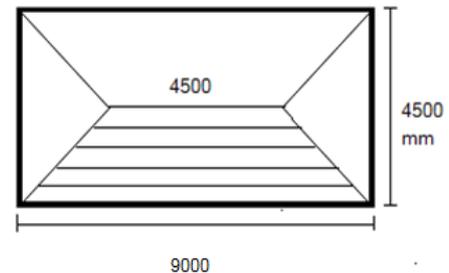


Abbildung 5.1: Dachlastflächenteil

### Windlasten

Windlasten werden als veränderliche Einwirkung nach der DIN 1055-100 betrachtet.

Nach der DIN 1055-4 gilt:

Zone 1, Dachneigung weniger als  $5^\circ$ ,  $h/d \approx 1$ ,

Außendruckbeiwerte für vertikale Wände:

$H = 3$  m,  $b = 9$  m,  $d = 4,5$  m,

$e = \min \{9 \text{ m oder } 2 \cdot 3\} = 6$  m,  $e/5 = 1,2$  m

Nach Tabelle 3:

A:  $C_{Pe,10} = -1,2$  und  $C_{Pe,1} = -1,4$

B:  $C_{Pe,10} = -0,8$  und  $C_{Pe,1} = -1,1$

Nach Tabelle 2:

Geschwindigkeitsdruck  $q = 0,5$  in KN/m<sup>2</sup>

$q_A = -1,4 \cdot 0,5 = 0,7$  KN/m<sup>2</sup>

$q_B = -1,1 \cdot 0,5 = 0,55$  KN/m<sup>2</sup>

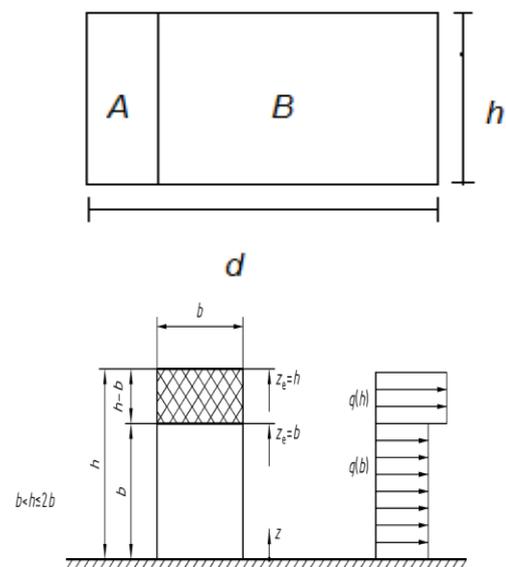


Abbildung 5.2: Windlastenverteilung

Weil  $b (1,5\text{m}) \leq h (2,8\text{m}) \leq 2 \cdot b (3\text{m})$  ist, haben wir zwei Windlastverteilungen in der Höhe. Maßgebende Windlast ist:  $q = 0,7 \cdot 1,5 = 1,05$  KN/m.

### Stahlrahmeneigengewicht

Profil: U 120  $\cdot$  55  $\cdot$  5 mm

Rahmenbreite: 1500 mm, Rahmenhöhe: 2800 mm

Insgesamt wird 238,8 Meter U-Profil mit der Rohdichte =  $78,5$  KN/m<sup>3</sup> gebraucht.

Das Rahmeneigengewicht:  $[0,120 \cdot 0,005 + 2 \cdot (0,050 \cdot 0,005)] \cdot 78,5 \cdot 238,8 = 20,62$  KN

### Ausfachung

Von 18 Trägern sind 15 Träger ausgefacht.

Pro Rahmen wird 1,008 m<sup>3</sup> Ausfachung benutzt.

Nach Anhang 1 ist die Lehmrohddichte:  $\rho = 0,001783 \text{ gr/mm}^3$

Mittleres Ausfachungseigengewicht =  $15 \cdot 1783 \text{ Kg/m}^3 \cdot 1,008 \text{ m}^3 = 26959 \text{ Kg} = 269,6 \text{ KN}$

### Erdbebeneinwirkung

Zugrundeliegende Norm: die DIN EN 1998-1

Köln, Erdbebenzone 1, sowie zur Untergrundklasse T

Bemessungswert der Bodenbeschleunigung  $a_g = 0,4 \text{ m/s}^2$ ,  $T = 0,05 \cdot H^{0,75}$

Nach DIN 4149 Bedeutungsbeiwert  $\gamma_1 = 1,0$

Mit Untergrundverhältnisse B-T:

$0,1 \leq T = 0,1139 \leq 0,3$ ,  $S_e(T) = 0,4 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 2,5 = 1,0$

$F_b = 1,0 \cdot (243 + 20,62 + 269,6 + 0,3 \cdot [60,75 + 30,375]) \cdot 1,0 = 560,6 \text{ KN}$

$560,6 / (12 \cdot 1,5) = 31,1 \text{ KN/m}$

Mit Verhaltensbeiwert nach der Tabelle 9.1:

Erdbebenkraft =  $2,5 \cdot 31,1 = 77,75 \text{ KN/m}$

### 5.3 Lastfallkombinationen

Für die Berechnung der Verformungen und Verschiebungen werden die Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit nachgewiesen. Es werden verschiedene Lastfallansätze unten aufgeführt:

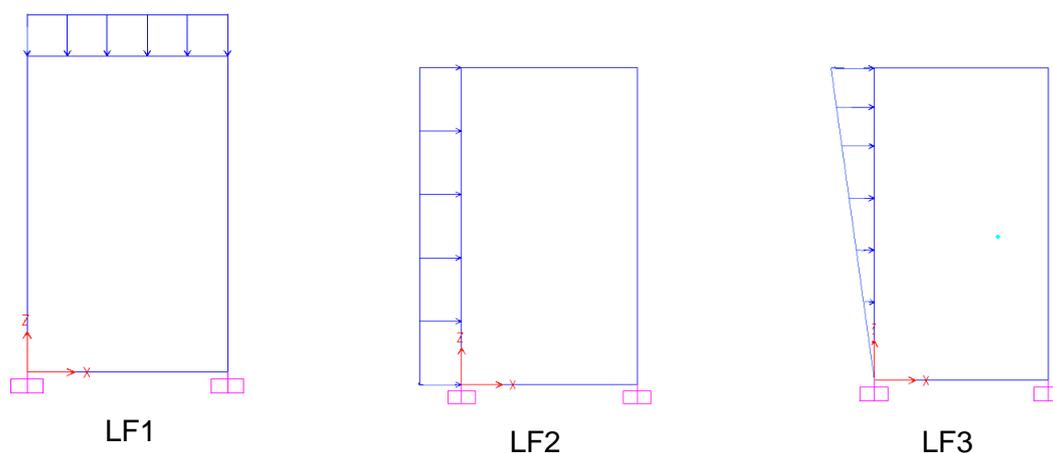


Abbildung 5.3: Lastfallkombinationsfigur des Systems

Lastfall 1<sub>G</sub>: ständige Last

Lastfall 1<sub>Q</sub>: veränderliche Last

Lastfall 1<sub>s</sub>: Schneelast

Lastfall 2 : Windlast

Lastfall 3 : Erdbebenlast

Der Lastfall drei könnte als horizontale Einzelkraft im Dachgeschoß einwirken, wenn sich der Eigengewichtsschwerpunkt vom Bauteil im Dach befinden würde.

Es werden in der Berechnung verschiedene Lastfallkombinationen aus DIN 1055 -100, 1053 und 1045 benutzt. Für die Berechnung der Verformungen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit sind die Sicherheitsbeiwerte  $\gamma_G = \gamma_Q = \gamma = 1,0$  zu verwenden.

Die Quasi-ständige Kombination ist eine Kombinationsart, die hierfür ausgewählt wurde:

$$E_{d, perm} = E \left\{ \sum_{j \geq 1} G_{k,j} \oplus P_k \oplus \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \right\}$$

$$LFK_1 = 1,0 \cdot LF1_G + 1,0 \cdot LF1_Q$$

$$LFK_2 = 1,0 \cdot LF1_G + 1,0 \cdot \psi_{2,i} \cdot LF1_Q + 1,0 \cdot LF1_s + 1,0 \cdot LF2$$

$$LFK_3 = 1,0 \cdot LF1_G + 1,0 \cdot LF1_Q + 1,0 \cdot \psi_{2,i} \cdot LF1_s + 1,0 \cdot LF2$$

$$LFK_4 = 1,0 \cdot LF1_G + 1,0 \cdot LF1_Q + 1,0 \cdot LF1_s + 1,0 \cdot \psi_{2,i} \cdot LF2$$

$\psi_{2,i}$  wird nach der Tabelle A<sub>2</sub> von DIN 1055 -100 abgelesen.

Für die Ermittlung der Erdbebeneinwirkungen mit anderen Lasten gilt DIN EN 1998-1. Wind- und Erdbebenlasten brauchen nicht nach der DIN 1055 Teil 4 als gleichzeitig wirkende Lasten angenommen zu werden. Für die sichere Seite wurde Kombination 2 wie folgt angenommen:  $LFK_E = 1,0 \cdot LF1_G + 1,0 \cdot LF1_Q + 1,0 \cdot LF1_s + 1,0 \cdot LF3$

## 5.4 Versuch/ausgefachter Stahlrahmen

### 5.4.1 Randbedingungen/Eigenschaften des Systems

Für den Versuch wurde ein U Profil mit den Maßen 120x55x5 mm als Stahlträger mit den Mauersteinen ausgefacht. Die Mauersteine sind zu homogenen Blöcken vernetzt. Als Ausfachung wurde einmal Beton, anschließend Lehm und Ziegel ausgesucht. Die Tabelle 5.1 zeigt die Eigenschaften von Stahlrahmen (DIN EN 1993-1-1) und Ausfachungsmaterialien (DIN 1045, 1053-1). Die Eigenschaften der Lehmausfachung stammen aus dem Anhang 1 und Paragraph 6.3.

	Stahl S 235 H	Beton C20/25	Lehm	Ziegel
E-Modul (N/mm <sup>2</sup> )	210000	28800	2726	2800
Rohdichte (N/mm <sup>3</sup> )	78,5·10 <sup>-6</sup>	24·10 <sup>-6</sup>	17,8·10 <sup>-6</sup>	18·10 <sup>-6</sup>
Querdehnzahl	0,3	0,2	0,15	0,15
Ausdehnungskoeffizient	10·10 <sup>-6</sup>	10·10 <sup>-6</sup>	5·10 <sup>-6</sup>	5·10 <sup>-6</sup>

Tabelle 5.1: Stahlrahmen- und Ausfachungseigenschaften

## 5. Verformungsverhalten eines ausgefachten Stahlrahmens

Die Unterkante der Stahlträger wurde in alle Richtungen unverschieblich gelagert. Für eine realistische Darstellung der Wand werden für die Modellierung die Steine vernetzt. Zwischen der Wand und dem Stahlrahmen sind Kontaktpunkte eingefügt, um das Gleiten der Wand infolge einer horizontalen Belastung zu vermeiden.

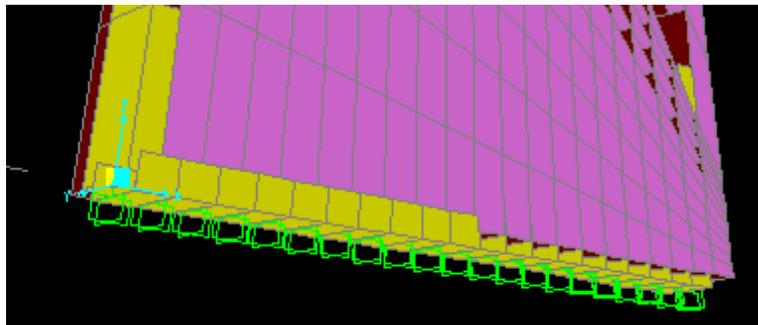


Abbildung 5.4: Randbedingungen, Kontaktelemente beim ausgefachten Stahlrahmen

### 5.4.2 Stahlrahmen unter Last

Um später das Kopfverformungsverhalten des Stahlrahmens mit und ohne Ausfachtung vergleichen zu können, oder um die Einwirkung der Ausfachtung im Stahlrahmen zu sehen, wird der Stahlrahmen erst ohne Ausfachtung belastet. Das System wurde unter Lastfallkombination LFK<sub>3</sub> als Comb 1 und LFK<sub>E</sub> als Comb 2 belastet. Dabei stellte sich im Kopf des Stahlrahmens unter LFK<sub>E</sub> eine Verschiebung in X-Richtung (38,95 mm) und eine Verschiebung (1,344 mm) in Z-Richtung der Koordinatenachse ein.



Abbildung 5.5: Kopfverschiebung beim Stahlrahmen ohne Ausfachtung

### 5.4.3 Ausgefachter Stahlrahmen unter Last

Hier wird in der zweiten Versuchsreihe das Verhalten des Stahlrahmens mit der Ausfachung untersucht. Die Erwartungen bei zweitem Versuch liegen darin, dass bei dem ausgefachten Stahlrahmen die aufnehmbare Horizontalkraft größer und die Verformung geringer wird.

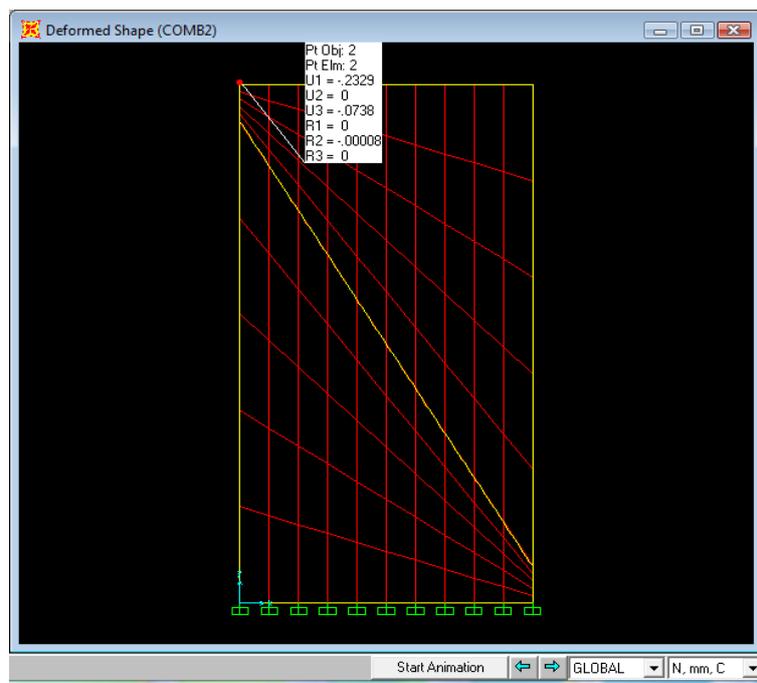


Abbildung 5.6: Kopfverschiebung beim Stahlrahmen mit Beton 20/25 als Ausfachung

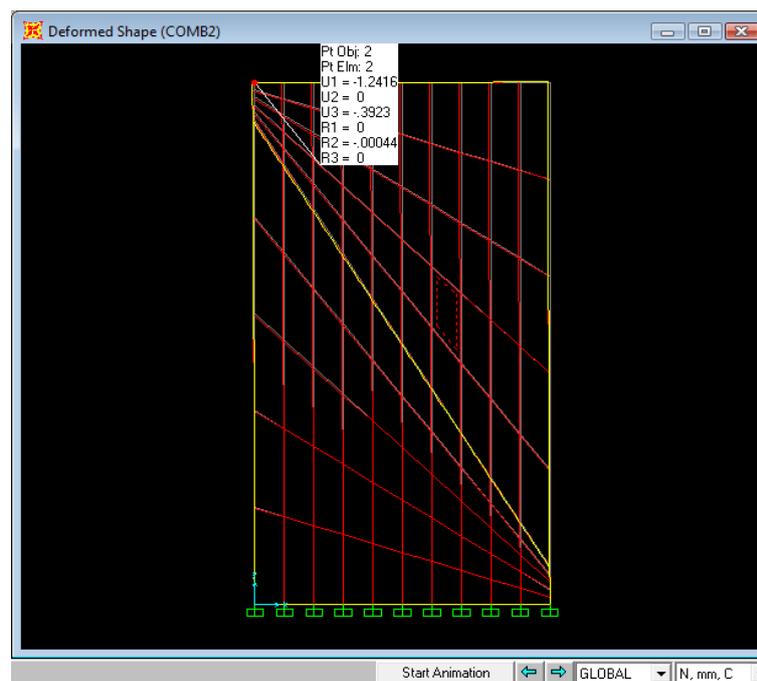


Abbildung 5.7: Kopfverschiebung beim Stahlrahmen mit Lehm als Ausfachung

## 5. Verformungsverhalten eines ausgefachten Stahlrahmens

Wie in den Abbildungen 5.5 und 5.6 und 5.7 zu sehen ist, wurde in den ausgefachten Stahlrahmen die Kopfverschiebung in X-Richtung extrem geringer.

Bei der Betonausfachung ist die Kopfverschiebung weniger als Lehm- oder Ziegelausfachung, aber die Schubspannung in der Wand ist größer. Man kann in den Abbildungen den Unterschied sehen.

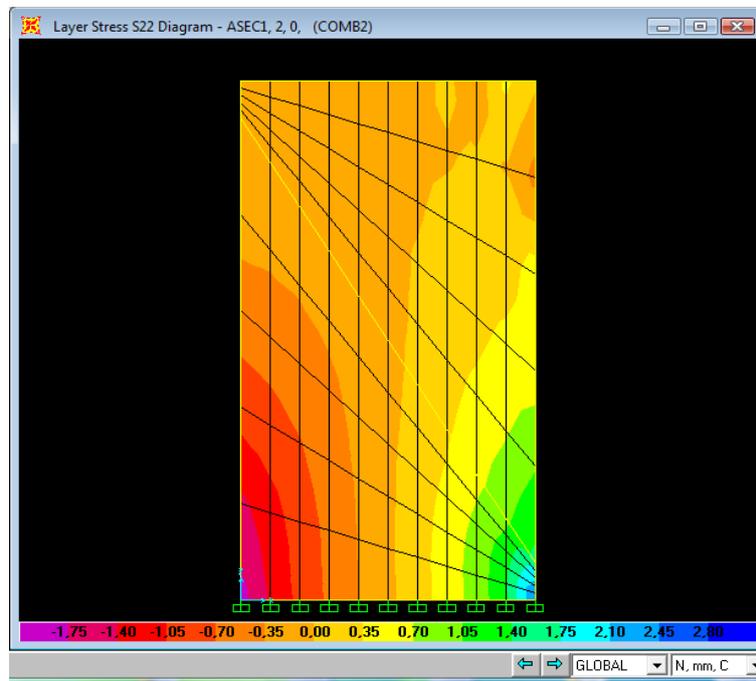


Abbildung 5.8: Schubspannung in der Wand mit Beton 20/25 als Ausfachung

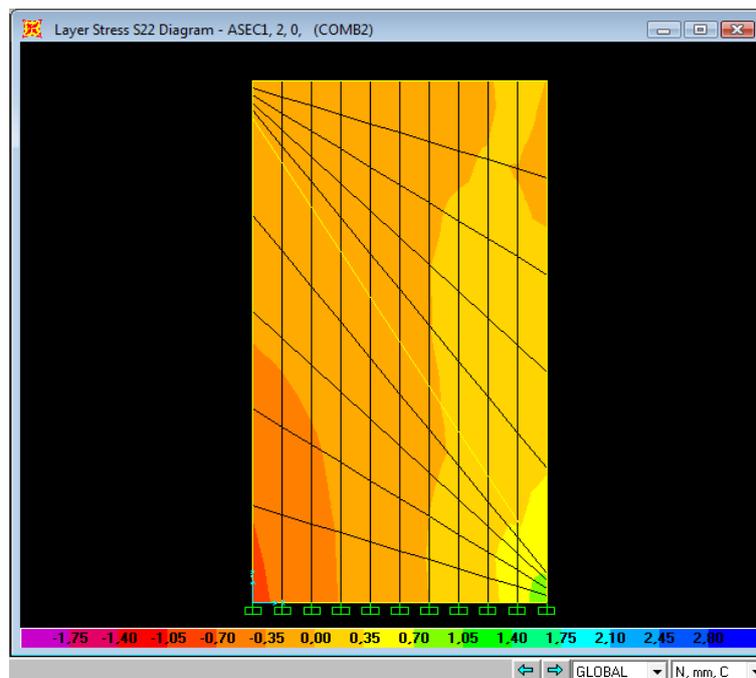


Abbildung 5.9: Schubspannung in der Wand mit Lehm als Ausfachung

## 5. Verformungsverhalten eines ausgefachten Stahlrahmens

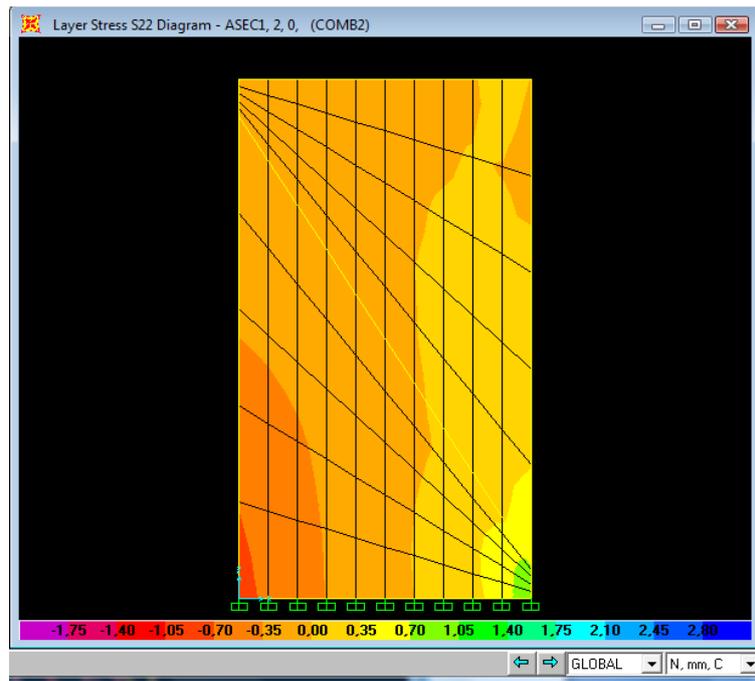


Abbildung 5.10: Schubspannung in der Wand mit Ziegel als Ausfachung

Für einen direkten Vergleich des nichtlinearen Verformungsverhaltens im System wurden die entsprechenden nichtlinearen Eigenschaften geändert. Man kann mit der Erhöhung des E-Moduls, der Druckfestigkeit und der Zugfestigkeit von den Ausfachungen sehen, dass die Kopfverschiebungen und die Spannungen im System unter gleicher Belastung geringer werden.

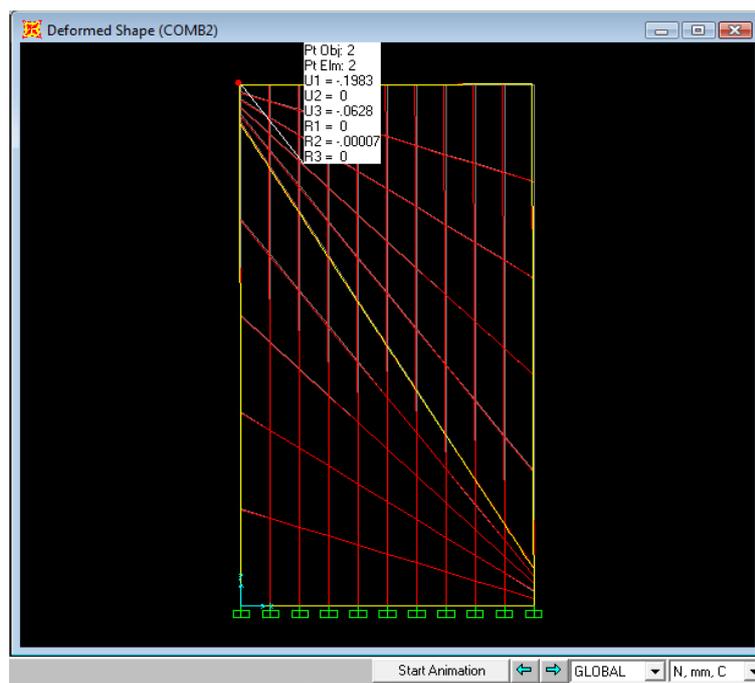


Abbildung 5.11: Kopfverschiebung beim Stahlrahmen mit Beton 40/50 als Ausfachung

Dabei ist es möglich, die Änderung der Spannungen in der Wandebene bzw. das Gesamtverformungsverhalten eines ausgefachten Stahlrahmens mit Steigerung der nichtlinearen Eigenschaften zu beobachten. Mit Erhöhung der Eigenschaften in der Ausfachung wurde in der Wand die Verschiebung kleiner (21%). Die Schubspannung bleibt hier aber unverändert. Die Abbildung 5.11 zeigt die Kopfverschiebung in der Wand mit Beton C40/50 als Ausfachung.

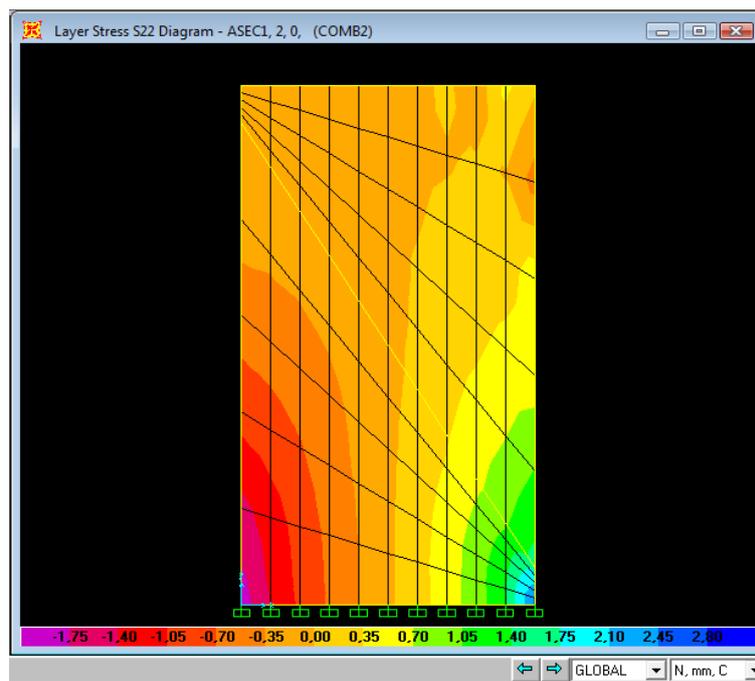


Abbildung 5.12: Schubspannung in der Wand mit Beton C40/50 als Ausfachung

Anhand des Programms wird bei dem Versuch deutlich, dass sich mit der Erhöhung der Rahmenbelastungen bzw. Rahmeneigenschaften und Ausfachungseigenschaften unterschiedliche Kopfverschiebungen und Spannungen produzieren lassen können. In der Größenordnung der Belastung sind keine großen Verschiebungen im System aufgetaucht, deshalb kann für die Analyse im weiteren Verlauf größere Lastschritte gewählt werden.

Bei der Betrachtung des Spannungszustandes zwischen den Ergebnissen wird deutlich, dass unter dem gleichen Lastniveau die Max. Spannungen im ausgefachten System an unterschiedliche Bereichen auftreten. Besonders wenn die Eigenschaften von Ausfachung ändern. Diese Spannungen verursachen in der Realität verschiedene Verformungsformen und abschließend Versagensformen im System.

Mit gelösten ausgefachten Rahmen im Buch (SAP 2000, Advanced Course, ISBN 964-5693-91-8) kann sagen, dass die Spannungen von dem Programm richtig sind.

## 6. Vergleich der EDV-Berechnungen und der durchgeführten Versuchsreihe

### 6.1 Laboruntersuchungen

Der Zustand des Mauerwerks wird im Wesentlichen durch Eigenschaften von Mauerwerkskomponenten charakterisiert. Für die Bemessung der Tragwerke interessant sind dabei die technischen und physikalischen Eigenschaften und hier im speziellen die Festigkeitsparameter.

Hierzu sind vier Versuche im Wuppertaler Universitätslabor durchgeführt worden:

1. Druckfestigkeitsbemessung bei dem iranischen Ajor und dem deutschen Kalksandstein
2. Druckfestigkeitsbemessung beim Lehmstein
3. Druckfestigkeitsbemessung beim Mauerwerk aus Lehm
4. Verformungsverhalten des Stahlfachrahmens mit Lehmausfachung

### 6.2 Druckfestigkeit beim iranischen Ajor und deutschen Kalksandstein

Das Bild 6.1 zeigt das Druckversagen beim iranischen Ajor und deutschen Kalksandstein.



Bild 6.1: Druckversuche beim iranischen Ajor und deutschen Kalksandstein

In der Tabelle 6.1 sind die Maße und Druckfestigkeiten von beiden Steinen aufgelistet.

Ajor	Länge(mm)	Breite(mm)	Höhe(mm)	Druckkraft(KN)	Druckfestigkeit(KN/mm <sup>2</sup> )
1	210	100	72	130	0,00619
2	105	100	144	60	0,0057142
3	98	80	72	51	0,00655051
K.S					
1	240	115	71	1070	0,03876
2	120	115	142	530	0,0384
3	240	115	71	1050	0,03804

Tabelle 6.1: Druckfestigkeit beim iranischen Ajor und deutschen Kalksandstein

Laut der Empfehlungen der Normen sollten zwei Hälften der Steine in der Druckmaschine belastet werden. Nach der Durchführung von drei Versuchen sind bei den iranischen Ajor-Steinen die ausgerechneten Druckfestigkeiten viel geringer als die Druckfestigkeit, die von der Norm vorgegeben ist. Die ausgerechneten Druckfestigkeiten der deutschen Kalksandsteine entsprechen jedoch den DIN Normen.

### 6.3 Druckfestigkeit beim Lehmstein

Die Druckfestigkeit gibt die Widerstandfestigkeit bei Einwirkung von Druckspannungen wieder. Dabei wird ein Prüfkörper aus Lehm in der Regel senkrecht zu seiner Oberfläche belastet. Im Versuch wurde die Druckfestigkeit des Steins durch das Erreichen der Höchstlast beim ersten Risseintritt bestimmt.



Bild 6.2: Druckversuch beim Lehmstein

Der eigentliche Bruch trat nach der zulässigen Höchstlast auf. Die Druckfestigkeit errechnet sich aus dem Quotienten der Höchstkraft und der Querschnittsfläche der Probe.

Diese Druckfestigkeit ( $0,0026\text{KN/mm}^2$ ) gehört im Vergleich mit den vorgegebenen Normen zu den niedrigsten Druckfestigkeiten. Die Abbildung 6.1 zeigt das Spannung-Dehnungs-Diagramm, das mithilfe des Excel-Programms erstellt worden ist.

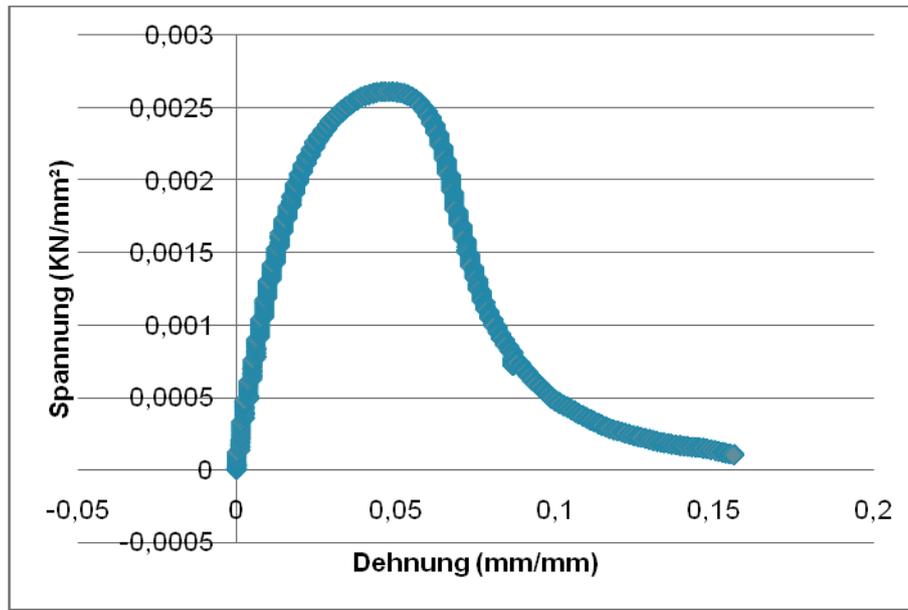


Abbildung 6.1: Spannung-Dehnungsdiagramm vom Lehmstein

### 6.4 Druckfestigkeit beim Lehmmauerwerk

Eine Mauerwerksprobe aus Lehm wird nach der DIN 18554 für die Ermittlung der Druckfestigkeit und des Elastizitätsmoduls mit zentrischer Belastung geprüft. Soll der Elastizitätsmodul ermittelt werden, so sind die Abmessungen der Prüfkörper nach der Abbildung 6.2 zu leisten.

- Wandbreite : 2 Steinlängen
- Wanddicke : eine Steinbreite
  - $h/d \geq 3$ ,
- Wandhöhe :  $h/b \geq 1$ ,
  - $h \geq 5 \cdot \text{Steinschicht}$

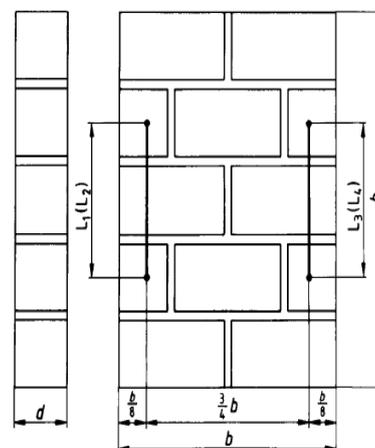


Abbildung 6.2: Mauerwerksmaße für den Druckversuch

## 6. Vergleich der EDV-Berechnungen und der durchgeführten Versuchsreihe

Die Längsachse des Prüfkörpers liegt mit der Längsachse der Prüfmaschine in gleicher Richtung. Die Druckkraft wird über dem belasteten Querschnitt gleichmäßig verteilt. Sie muss so gesteigert werden, sodass sie pro Sekunde um etwa  $[\beta_D / 300]$  zunimmt.<sup>12</sup>



Bild 6.3: Druckversuch beim Lehmmauerwerk

Die Druckfestigkeit des Mauerwerks wird nach der Formel  $\beta_D = (\text{Maximum Kraft} / \text{Fläche})$  berechnet. Der Elastizitätsmodul wird in einem Drittel der Druckfestigkeit in Zusammenhang mit der Dehnung nach dieser Formel  $E = \tan^{-1} (\beta_D / 3 \cdot \epsilon)$  ausgerechnet.

Die Abbildung 6.3 zeigt das Spannung-Dehnung-Diagramm, das mit den Daten aus dem Versuch und mithilfe des Excel-Programms erstellt worden ist.

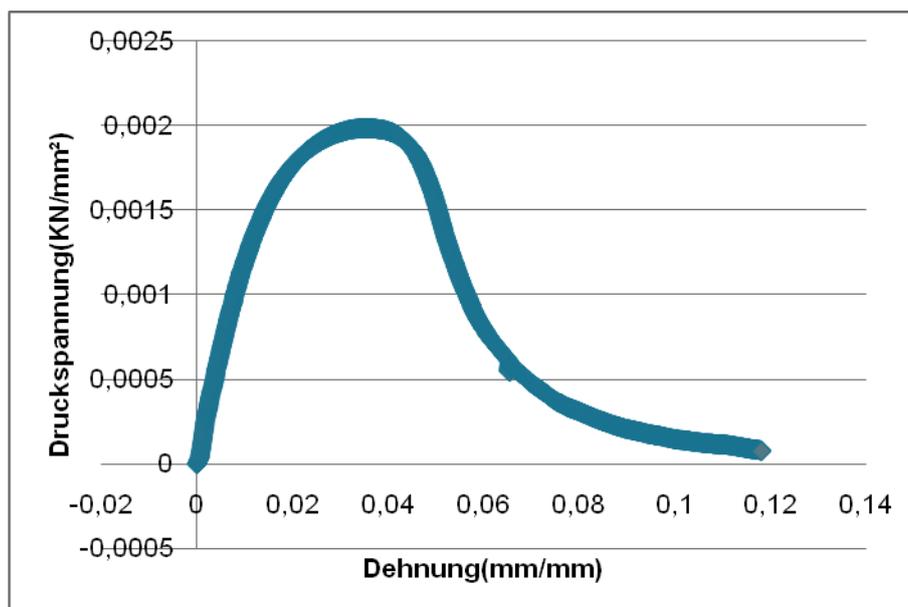


Abbildung 6.3: Spannung-Dehnungsdiagramm vom Lehmmauerwerk

12) Nach DIN 18554,  $\beta_D$  Druckfestigkeit des Mauerwerks

Die dazugehörige Dehnung in einem Drittel von Maximum Druckspannung beträgt 0,014.

Das E-Modul wird mit der Tangente der Kurve berechnet:

$$E = \tan^{-1} \left\{ (0,002/3) / 0,014 \right\} = 2726 \text{ N/mm}^2$$

### 6.5 Stahlrahmen mit Lehmausfachung

#### 6.5.1 Vorbereitung, Verdichtung und Ausfachung des Lehmsteins

Der bereits fertig gemischte Baulehm (mit Stroh als Zusatzstoff) wurde ins Labor der bergischen Universität Wuppertal geliefert. Der Matsch entstand durch die Zugabe von Wasser ins Mischgerät. Es wurde der Versuch unternommen, dass der Baustoff bei der Mischung homogen bleibt und eine gleichmäßige Feuchtigkeit behält. Zur Herstellung der Steine wurde eine Holzschalung mit den Maßen 240x240x120 mm verwendet. Der Matsch wurde in der Schalung verteilt, gut verdichtet und unter Beobachtung in einem fensterlosen, luftdichten Raum bei einer Temperatur von 40°C getrocknet. Nachdem die Steine die nötige Festigkeit erreicht hatten, sind sie im Stahlrahmen mit Lehmörtel ausgefacht worden. Die Stoß- und Lagerfugen wurden in einer Stärke von ca. 1 cm gemauert.



Bild 6.4: Vorbereitung, Verdichtung und Ausfachung vom Lehmstein

### 6.5.2 Lasteinwirkung des Systems

Der Stahlrahmen wurde aufgrund Auflast mit vier Stahlstäben vorgespannt. Die Dehnungen aus der Vorspannungen sind:

$$V_1 = -445,217 \text{ } \mu\text{m/m}$$

$$V_2 = -531,478 \text{ } \mu\text{m/m}$$

$$V_3 = -681,043 \text{ } \mu\text{m/m}$$

$$V_4 = -697,275 \text{ } \mu\text{m/m}$$

Die Vorspannkkräfte werden von vorhandenen Dehnungen mithilfe Material-Gesetzt ausgerechnet.

Nachdem das vorläufige Auflager abgelöst ist, wurde im System aufgrund des Eigengewichts Verschiebung und Verdrehung erzeugt.

- Kopfverschiebung: 17 mm
- Kopfverformung: 1,7 mm

Anschließend wurde das System mit der zunehmenden Kraft von oben belastet. Insgesamt wurden 10 Wegmesser im ganzen System eingebaut. Das Verformungsverhalten von ausgefachtem Stahlrahmen begann mit steigender Belastung am Kopf. Unser Ziel war es, die Verschiebung des ersten Punkts (Weg Nummer 100) zu bestimmen. Der Punkt war 9 cm von dem freien unteren Rand und 34 cm vom Boden entfernt. Die Abbildung 6.4 zeigt das Kraft-Verschiebungsdiagramm für den Weg Nummer 100.

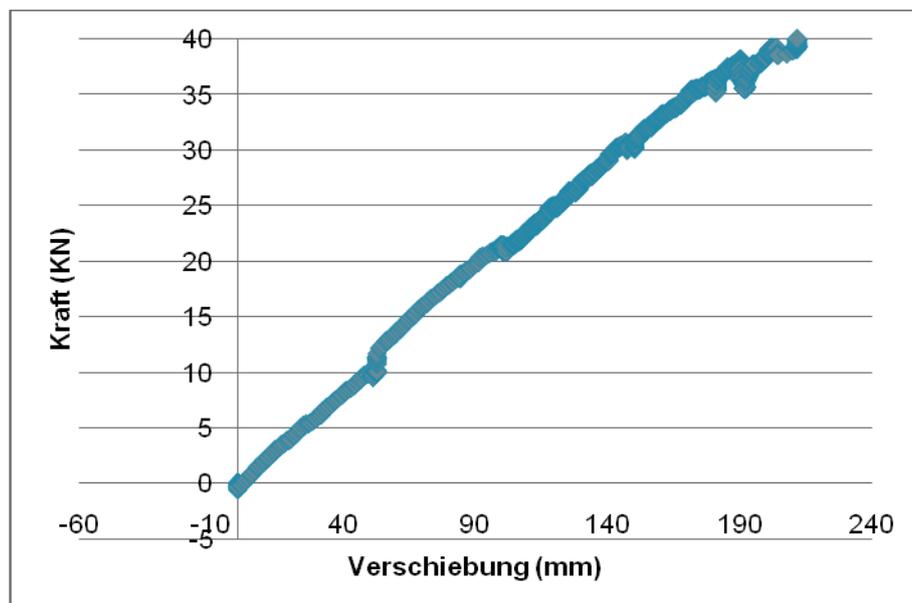


Abbildung 6.4: Kraft-Verschiebungsdiagramm vom Weg 100

Die Verschiebung am Kopf der Auflager wurde mithilfe der Weg Nummer 50 gemessen. Der Weg befindet sich 137,5 cm vom Auflager entfernt. Mit einer mathematischen Formel wird

## 6. Vergleich der EDV-Berechnungen und der durchgeführten Versuchsreihe

die Verschiebung am Kopf des Stahlrahmens berechnet. Bei dem 35 KN Kraft ist die Verschiebung 62 mm groß. Dann wird:  $\tan \alpha = 62/1375 \Rightarrow \alpha = 2,87^\circ$

Die Verschiebung im Kopf des Stahlrahmens beträgt:  $2800 \cdot \tan 2,87 = 126 \text{ mm}$

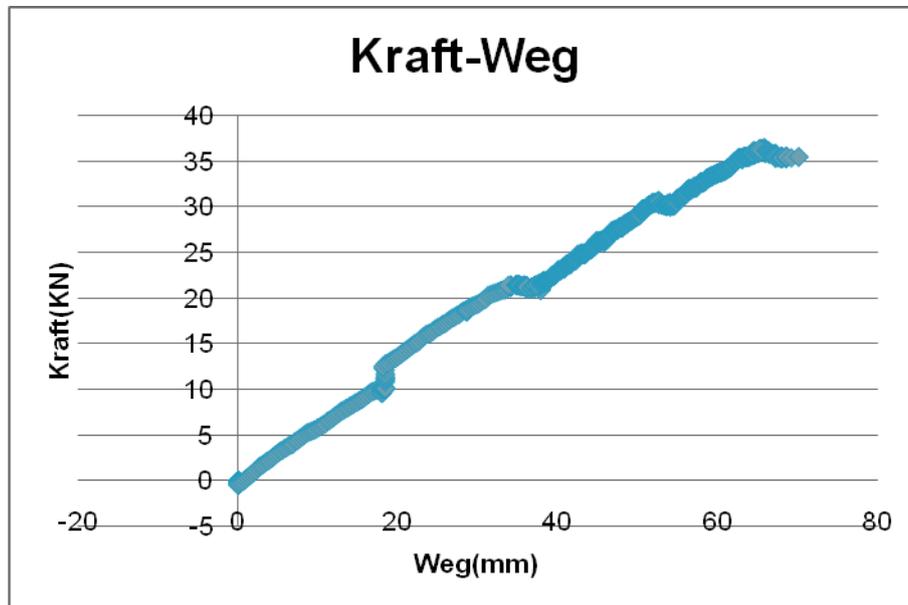


Abbildung 6.5: Kraft-Verschiebungsdiagramm vom Weg 50

Die Verschiebung des Auflagers betrug 17 mm nach oben.

Mit Berücksichtigung allen Verschiebungen wird die endgültige Verschiebung in der Abbildung unten dargestellt.

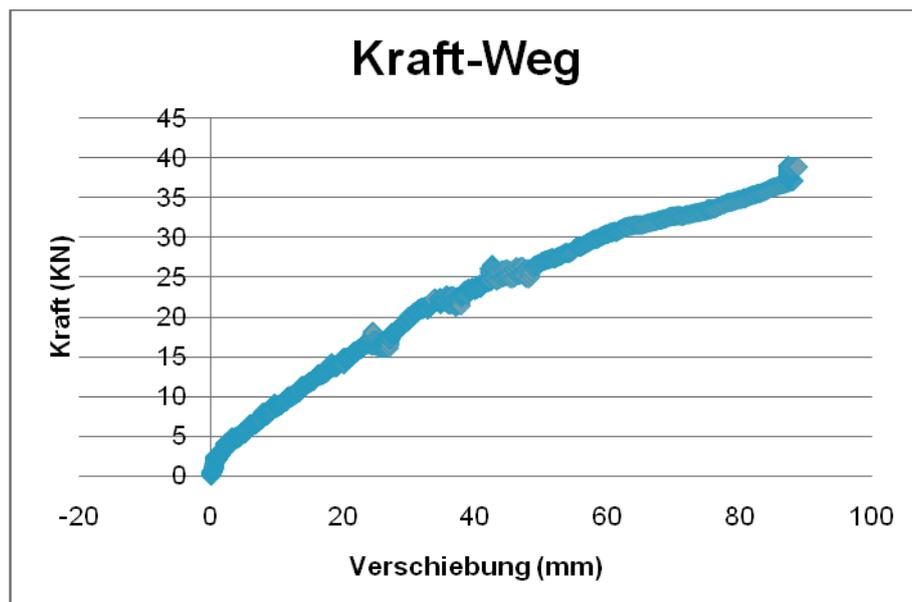


Abbildung 6.6: Kraft-Verschiebungsdiagramm des Systems

### 6.5.3 Modellierung mit Programm

Es wurde mithilfe des Programms (SAP 2000) ein Modell 1 zu 1 mit gleichen Maßen und Eigenschaften vom Versuch modelliert. Das System wurde mit der Auflast von der Seite und Kolbenlast von oben beansprucht. Der Auflager wurde mit einem 2 wertige Auflager und Dehnfeder eingesetzt. Die Steifigkeit der Feder ist mit jeweiligen Momenten und Verdrehung im Auflager ausgerechnet. Die Kräfte, die im Auflager Moment auslösen, sind:

- Eigengewicht der Ausfachung:  $0,001783 \cdot 2800 \cdot 1500 \cdot 120/100 = 8986 \text{ N}$
- Eigengewicht des Stahlrahmens:  $14,95 \cdot 78,5 \cdot 0,0006325 \cdot 1000 = 742 \text{ N}$
- Vorspannungskraft
- Kolbenkraft

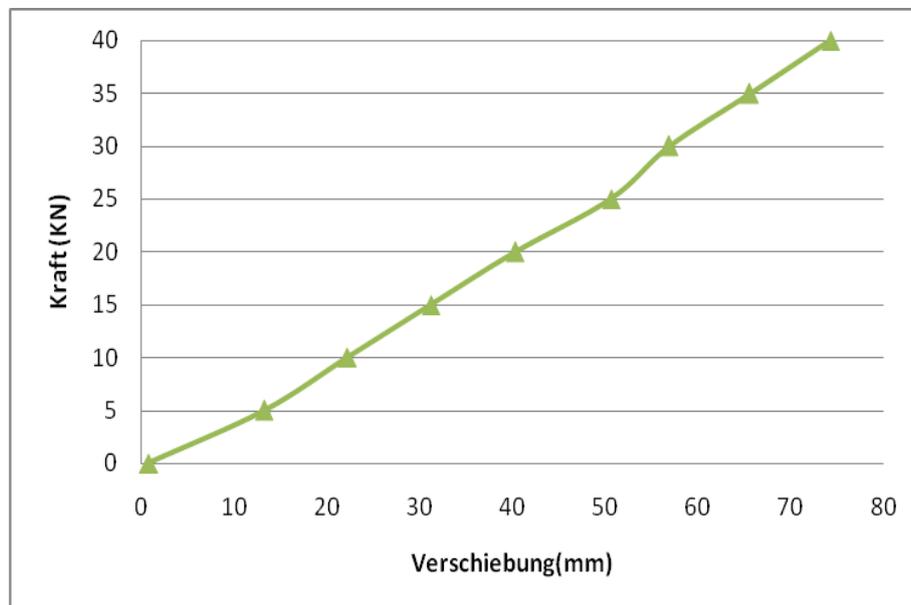


Abbildung 6.7: Kraft-Verschiebungsdiagramm mithilfe SAP 2000

Die Abbildung 6.7 ist das Kraft-Verschiebungsdiagramm, das mit SAP 2000 erstellt wurde. Mit dem Vergleich den Abbildungen 6.6 und 6.7 kommen die Genauigkeiten des Versuchs in der Halle vor.

## Zusammenfassung

In der heutigen Baukonstruktion wird von zwei Bauweisen geredet.

- Wand oder massives Mauerwerk
- Skelettbau aus den Materialien Holz, Stahl und Stahlbeton.

Ziel dieser Arbeit war, ein einheitliches System von Stahlrahmen und Mauerwerk zu konstruieren. Die Stahlrahmen sollen auf jeden Fall wirtschaftlich mit leichter Konstruktion hergestellt werden, damit eine hohe Steifigkeit erreicht werden kann. Als tragende Bauteile müssen sie in der Lage sein, die statischen und dynamischen Lasten aufzunehmen. Durch die richtige Wahl von Stahlrahmen und ihre Steifigkeiten wird eine optimale Widerstandsfähigkeit erzielt.

Das Mauerwerk ist kostengünstig, flexibel und hat eine einfache Bauweise. Aufgrund der vorteilhaften bauphysikalischen Eigenschaften wird das Mauerwerk auch in Zukunft vielfach eingesetzt. Die Qualität und die Festigkeit des Mauerwerks sind von den verwendeten Stein- und Mörtleigenschaften abhängig. Der Stein im Mauerwerk an sich ist schwer, spröde und auf Druck belastbar. Die Zug- und Biegezugfestigkeit des Mauerwerks ist gering, daher nur für Druckglieder geeignet. Neben den Druckfestigkeitswerten der Steine und des Verbands sollten ihre Zugfestigkeitswerte erhöht werden. Die Spannungszustände, die im Mauerwerk unterschiedliche Versagensformen auslösen, sollen im Normen festgehalten werden.

In tragenden und aussteifenden Wänden müssen die Vertikalkräfte und am Kopf Horizontalkräfte übertragen werden. Die großen Verformungen im Bauteil müssen auf nachteilige Normalkrafteffekte überprüft werden.

In dem letzteren Kapitel wurde nichtlineares Mauerwerksverhalten erklärt. Aus diesen Erkenntnissen folgt, dass bei der nichtlinearen Berechnung, eine wesentlich wirtschaftlichere Bemessung vorgenommen werden kann als bei einer linearen Berechnung. Das nichtlineare Materialverhalten hat einen Einfluss auf die Schnittgrößen und Spannungsverteilung im System. Nur unter Berücksichtigung des nichtlinearen Materialverhaltens sind die wirklichnahe Berechnung der Verformungen und der Schnittgrößenverteilung möglich. Auch die Zwangbeanspruchung aus den Verformungen können mit nichtlinearen Berechnungen realistischer ermittelt werden.

Abschließend kann auch gesagt werden, dass in einem Land wie Iran mit großer Erdbebengefährdung die wissenschaftlichen Untersuchungen richtig identifiziert werden müssen. Die meisten Häuser in von der Armut betroffenen Gebieten des Irans bestehen aus Lehmwänden oder luftgetrockneten Ziegeln (Ajour), die eine sehr geringe Widerstandsfähigkeit und ein sprödes Verhalten haben. Meine eigenen Arbeitserfahrungen und Rechnungen von Mauerwerkswänden und die Schadenszahlen nach dem Erdbeben (besonders Erdbeben 2003 im Bam/Iran) deuten auf eine fehlende einheitliche Normung und geringe wissenschaftliches

---

Wissen über ausgefachte Stahlrahmen und Mauerwerk. Auch die fehlende Duktilitätsbedarf in Verbindungszonen bei Stahlrahmen und ausgleichende Steifigkeiten von Ausfachung und Stahlrahmen führen zu einem Sturz des gesamten Tragwerks.

## Anhang 1

Rohdichtebestimmung des Lehmsteins:



Fensterloser Trockerraum



Wiegen von Steinen

K<sub>1</sub> bis K<sub>3</sub> die kubische Probekörper

Z<sub>1</sub> bis Z<sub>3</sub> zylindrische Probekörper

Steinprobe	Rohdichte (gr/mm <sup>3</sup> )					
	1.Tag	2. Tag	3. Tag	7. Tag	28. Tag	48. Tag
K <sub>1</sub>	0,00274	0,00274	0,00273	0,00261	0,00214	0,00208
K <sub>2</sub>	0,00279	0,00277	0,00276	0,00266	0,00220	0,00211
K <sub>3</sub>	0,00276	0,00275	0,00274	0,00262	0,00219	0,00209
Z <sub>1</sub>	0,00114	0,00113	0,00113	0,001102	0,00088	0,00087
Z <sub>2</sub>	0,00113	0,00112	0,00112	0,00108	0,00087	0,00086
Z <sub>3</sub>	0,00111	0,00111	0,001103	0,001069	0,00086	0,00085

Die mittlere Rohdichte aller Versuche beträgt: 0,001783 gr/mm<sup>3</sup>

## Literaturverzeichnis

- [1] DIN 1053-3, Berechnung und Ausführung beim bewehrten Mauerwerk
- [2] <http://www.baumarkt.de/nxs/665///baumarkt/schablone1/Mauerverbaende-welche-gibt-es-Was-muss-beachtet-werden>, am 01.06.09
- [3] DIN 1053-1, Berechnung und Ausführung von Mauerwerk
- [4] [http://www.baunetzwissen.de/imgs/23160780\\_17db9250a3.jpg](http://www.baunetzwissen.de/imgs/23160780_17db9250a3.jpg) am 28.05.09
- [5] Lehrbuch der Hochbaukonstruktionen- B.G. Teubner Stuttgart- Erich Cziesielki  
ISBN: 3-519-25015-2
- [6] Wärme- und Feuchteschutz in der Praxis, ISBN 3-345-00582-4
- [7] Schneider, Sahner, Rast, Mauerwerksbau aktuell, ISBN 3-89932-152-9
- [8] Baulicher Brandschutz, ISBN 978-3-89932-086-2
- [9] [www.derfuessl.de/studium/vsg01/unterlagen/bt/Mauerwerksbau.pdf](http://www.derfuessl.de/studium/vsg01/unterlagen/bt/Mauerwerksbau.pdf) am 14.06.09
- [10] [www-sfb461.ipf.uni-karlsruhe.de/publications/readpdf.php?id=568](http://www-sfb461.ipf.uni-karlsruhe.de/publications/readpdf.php?id=568)
- [11] Dr. Hassan Moghadam, die Gebäude mit Ajour als Ausfachung, ISBN 964-6379-38-9
- [12] DIN V 105-100, Mauerziegel mit besonderen Eigenschaften
- [13] Mauerwerk Kalender 2007, ISBN 978-3-433-01867-51
- [14] DIN EN 771-1, Festlegungen für Mauerziegel
- [15] <http://www.heimwerker.de/uploads/pics/37-17-4.jpg> 20.05.09
- [16] DIN EN 771-2, Festlegungen für Kalksandstein
- [17] <http://www.heimwerker.de/uploads/pics/37-16-3.jpg> am 30.07.09
- [18] [http://img.archiexpo.de/images\\_ae/photo-g/massiv-leichtbetonstein-fur-zwischen-wande-142615.jpg](http://img.archiexpo.de/images_ae/photo-g/massiv-leichtbetonstein-fur-zwischen-wande-142615.jpg) am 25.06.09
- [19] Frank Dehn, Gert König, Gero Marzahn- Konstruktionswerkstoffe im Bauwesen  
ISBN 3-433-01652-6
- [20] <http://www.chaux-de-contern.lu/upload/biblio1/media/ecobloc.jpg> 28.05.09
- [21] [http://www.steinvilla.de/fliesen\\_naturstein\\_villa\\_nymphenburg\\_muenchen\\_pics/fliesen\\_naturstein\\_villa\\_nymphenburg\\_muenchen\\_ausstellung\\_340x280.jpg](http://www.steinvilla.de/fliesen_naturstein_villa_nymphenburg_muenchen_pics/fliesen_naturstein_villa_nymphenburg_muenchen_ausstellung_340x280.jpg) am 28.05.09
- [22] [www.wienerberger.de](http://www.wienerberger.de) 28.05.09
- [23] [www.eb-bayer.de/index.php?id=33](http://www.eb-bayer.de/index.php?id=33) am 22.06.09
- [24] [www.daneshju.ir/forum/archive/t-21488.html](http://www.daneshju.ir/forum/archive/t-21488.html) 04.06.09
- [25] <http://elmofan.ir/> 05.05.09
- [26] [tasvirgari.blogfa.com/8502.aspx](http://tasvirgari.blogfa.com/8502.aspx) 04.06.09
- [27] [sakhteman.wordpress.com/2008/11/02/fehrest87/](http://sakhteman.wordpress.com/2008/11/02/fehrest87/) 06.06.09
- [28] aktuelle Preise im iranische Baumarkt, am 07.07.2009
- [29] [olagh-ketabkhon.persianblog.ir/1387/5/](http://olagh-ketabkhon.persianblog.ir/1387/5/) 05.06.09

- [30] Katalog von Hersteller im Iran
- [31] [www.elahiesazeh.com/](http://www.elahiesazeh.com/) 05.06.09
- [32] [.leca.ir/Admin/dm\\_documents/7782.doc](http://.leca.ir/Admin/dm_documents/7782.doc)
- [33] [www.bhrc.ac.ir/TA/PDF/28.pdf](http://www.bhrc.ac.ir/TA/PDF/28.pdf) am 27.06.09
- [34] [www.bhrc.ac.ir/TA/PDF/28.pdf](http://www.bhrc.ac.ir/TA/PDF/28.pdf) am 27.06.09
- [35] [http://www.bilder-123.de/data/media/8/100\\_1701.jpg](http://www.bilder-123.de/data/media/8/100_1701.jpg) am 07,07,09
- [36] [http://img.archiexpo.de/images\\_ae/photo-p/porenbetonstein-fur-tragende-waende-144161.jpg](http://img.archiexpo.de/images_ae/photo-p/porenbetonstein-fur-tragende-waende-144161.jpg)
- [37] <http://freenet-homepage.de/michael.schlegel/Image4.jpg>
- [38] <http://www.landschaftsgaertner.org/upload/natursteinmauerwerk-verblendet.jpg>
- [39] <http://pro.corbis.com/images/AL009406.jpg?size=67&uid=C9E42B39-8169-4A89-A982-9B2CFD9CC8E0>
- [40] [http://www.econews.ir/fa/Files/NewsImages/2009/ajor\\_Fixd.jpg](http://www.econews.ir/fa/Files/NewsImages/2009/ajor_Fixd.jpg) am 05.07.09
- [41] <http://www.sangabe.com/catalog/images/concrete-block.jpg> am 05.07.09
- [42] <http://mho222.persianguig.com/weblog/zelzele/zelzele.bmp> am 01.07.09
- [43] <http://www.wienerberger.com/images/db/articles/1079340524928.jpg> am 05.08.09
- [44] [http://www.baunetzwissen.de/imgs/23160777\\_b63c11da2f.jpg](http://www.baunetzwissen.de/imgs/23160777_b63c11da2f.jpg) am 05.08.09
- [45] [http://www.baunetzwissen.de/imgs/23160778\\_b3315dc62b.jpg](http://www.baunetzwissen.de/imgs/23160778_b3315dc62b.jpg) am 05.08.09
- [46] <http://www.bauplansv.de/gifs/mauerwerk/ringanker.jpg> am 05.08.09

## **Bestätigung**

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig angefertigt und keine anderen als die angegebenen Quellen benutzt habe.

Cand. -Ing. Bahram Abbasmaneshchaleshtori

Wuppertal, 13 August 2009