

Detleff Schermer, Eric Brehm (Hrsg.)

Mauerwerk-Kalender 2021

**Schwerpunkte:
Kunststoffverankerungen,
Digitalisierung im
Mauerwerksbau**

- bewährtes Nachschlagewerk und Praxiskompodium für den Mauerwerksbau (46. Jahrgang)
- aktuelle Beiträge zur Berechnung und Bemessung von Mauerwerkskonstruktionen
- Baustoffindustrie und Bauunternehmen, Bauaufsicht und Wissenschaft sowie Beratende Ingenieure und Prüfingenieure sind die Autoren des Mauerwerk-Kalenders

Das Nachschlagewerk zum Mauerwerksbau im 46. Jahrgang: Schwerpunkte sind die vereinfachte Bemessung von unbewehrtem Mauerwerk sowie die aktuellen Regelungen zur Erdbebenbemessung. Weitere Beiträge widmen sich unterschiedlichen Aspekten der Digitalisierung im Mauerwerksbau.

BESTELLEN

+49 (0)30 470 31-236

marketing@ernst-und-sohn.de

www.ernst-und-sohn.de/3293



vorl. Abb.

4 / 2021 · ca. 608 Seiten ·
ca. 180 Abbildungen · ca. 140 Tabellen

Hardcover

ISBN 978-3-433-03293-0 ca. € 149*

Fortsetzungspreis ca. € 129*

eBundle (Print + PDF)

ISBN 978-3-433-03352-4 ca. € 194*

Bereits vorbestellbar.

ÜBER DAS BUCH

In seinem 46. Jahrgang begleitet der Mauerwerk-Kalender die erfolgreiche Bauart als verlässliches Nachschlagewerk mit den Eigenschaftswerten von Mauersteinen, Mauer Mörtel, Mauerwerk und Putzen, mit der aktuellen Übersicht über die allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen bzw. allgemeinen Bauartgenehmigungen dieses Fachgebietes und mit der Zusammenstellung der geltenden technischen Regeln für den Mauerwerksbau. In diesem Zusammenhang wird in einem gesonderten Kapitel auf die Besonderheiten bei bauhabenbezogenen Bauartgenehmigungen (Zustimmungen im Einzelfall) eingegangen.

Zwei weitere Beiträge widmen sich der Bemessung von Mauerwerkskonstruktionen. Hierin werden Tragfähigkeitstabellen zur vereinfachten Bemessung unbewehrten Mauerwerks und der Beitrag zur Erdbebenbemessung von Mauerwerksbauten aus dem Jahre 2010 wurde vollständig überarbeitet und aktualisiert.

In einem Praxisbeitrag werden die Aspekte bei Planung und Ausführung von umfangreichen Eingriffen in die

Tragstrukturen von historischen Mauerwerksgewölben in einer denkmalgeschützten Festungsanlage vorgestellt.

Für die richtige Bemessung von Befestigungen wird das notwendige Hintergrundwissen über die Ermittlung der Tragfähigkeit von Kunststoff- und Injektionsdübeln durch Versuche am Bauwerk dargestellt sowie auf die DIBt Richtlinien zur praxisbezogenen Anwendung eingegangen.

Weitere Beiträge widmen sich dem Bau mit Fertigteilen sowie der Digitalisierung und den daraus resultierenden Herausforderungen aus der Sicht eines Baustoffherstellers sowie innovativen Entwicklungen wie dem 3D-Druck und der Robotik im Mauerwerksbau.

Über den Einsatz eines neu entwickelten reversiblen Wandsystems aus mörtellos verlegten Betonhohlblocksteinen für sog. informelle Siedlungen berichtet ein Autorenteam.

BESTELLUNG

Anzahl	ISBN /	Titel	Preis
	978-3-433-03293-0	Mauerwerk-Kalender 2021 [...]	ca. € 149*
		Fortsetzungspreis	ca. € 129*
	978-3-433-03352-4	Mauerwerk-Kalender 2021 (Print + PDF)	ca. € 194*

Privat

Geschäftlich

Bitte richten Sie Ihre Bestellung an:

Tel. +49 (0)30 47031-236

Fax +49 (0)30 47031-240

marketing@ernst-und-sohn.de

108208 Free Shipping

Firma _____

UST-ID Nr. _____

Name Vorname _____

Telefon _____

Fax _____

Straße Nr. _____

PLZ/Ort/Land _____

E-Mail _____

www.ernst-und-sohn.de/3293

Datum/Unterschrift _____

2021

MAUERWERK KALENDER

Kunststoffverankerungen

Digitalisierung im
Mauerwerksbau

Herausgegeben von

Detteff Schermer, Regensburg
Eric Brehm, Karlsruhe

46. Jahrgang

Vorwort

Liebe Leserinnen und Leser,

seit der Ausgabe des Mauerwerk-Kalenders von 2007 lag die alleinige Herausgeberschaft bei Professor Wolfram Jäger. Bis zu der vorliegenden Ausgabe hat Professor Jäger die Entwicklung dieser Publikation sowie die Entwicklung des Mauerwerksbaus in Deutschland entscheidend geprägt. Wir, als neue Herausgeber, danken ihm herzlich für die geleistete Arbeit und für die Übergabe einer Publikation in sehr gutem Zustand. Wir freuen uns sehr diese traditionsreiche Publikation weiterführen zu dürfen. Bitte erlauben Sie, dass wir uns kurz vorstellen:

Prof. Dr.-Ing. Eric Brehm lehrt als Professor für Massivbau an der Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft. Nach seiner Promotion im Mauerwerksbau an der TU Darmstadt war Prof. Brehm in verschiedenen Ingenieurbüros im In- und Ausland tätig. Er unterhält ein Ingenieurbüro im Rhein-Main-Gebiet und ist Mitglied einer Vielzahl von nationalen und internationalen Ausschüssen, u. a. als Obmann des Technischen Ausschusses des Deutschen Ausschusses für Mauerwerksbau e. V.

Prof. Dr.-Ing. Detleff Schermer lehrt als Professor für Bauwerke des Massivbaus und Baustatik an der Ostbayerischen Technischen Hochschule in Regensburg und ist Leiter des Labors für den konstruktiven Ingenieurbau. Er ist Inhaber eines Ingenieurbüros in München und Prüflingenieur für Massivbau. Er arbeitet in zahlreichen nationalen und europäischen Gremien mit, u. a. als Mitglied des Sachverständigenausschusses Wandbauelemente beim Deutschen Institut für Bautechnik und als stellvertretender Obmann des Spiegel-ausschusses Mauerwerksbau.

Das Jahr 2020 wurde und das Jahr 2021 wird nach wie vor von der Corona-Pandemie geprägt werden. Die Bauwirtschaft ist bisher verhältnismäßig gut durch die damit verbundene Krise gekommen, dadurch sind die Zukunftsaussichten aber nicht weniger ungewiss. Auch die Herausforderungen der jüngeren Vergangen-

heit, wie z. B. der bestehende Fachkräftemangel und die Auswirkungen des demographischen Wandels, erfordern eine starke Beschäftigung mit und Investition in Techniken der Zukunft. Aus diesem Grund widmet sich diese Ausgabe des Mauerwerk-Kalenders besonders Zukunftsthemen, oft mit Themen der Digitalisierung verbunden.

Aber auch die Erfordernisse der Baupraxis werden natürlich berücksichtigt, sei es durch Hilfsmittel für eine vereinfachte Bemessung oder einen umfassenden Beitrag zur versuchstechnischen Ermittlung der Tragfähigkeit von Dübeln am Mauerwerk. Auch die üblichen aktualisierten Standardbeiträge zu z. B. Mauerwerkeigenschaften, technischen Regeln oder den laufenden Forschungsvorhaben im Mauerwerksbau sind wieder enthalten.

Wir sind uns sicher, dass wir durch die Auswahl der Themen einen Band gestaltet haben, der dem Praktiker nützliche Informationen liefert und zusätzlich Denkanstöße für wichtige Zukunftsthemen bietet.

Mit neuen Herausgebern kommt üblicherweise auch eine Neuausrichtung der Publikation. Diese haben wir uns auch vorgenommen und werden zukünftig wieder verstärkt Themen der Ausführung und Gestaltung mit Mauerwerk sowie interessante Projektbeispiele aufnehmen.

Unser herzlicher Dank gilt allen Mitwirkenden, insbesondere Dr.-Ing. Dirk Jesse, Ernst & Sohn, für die große Unterstützung und hervorragende Vorbereitung der Übergabe. Wir wünschen Ihnen, liebe Leserinnen und Leser, eine ansprechende Lektüre zu spannenden Themen und hoffen, dass diese Ausgabe Ihnen nützliche Impulse und Anregungen für Ihre tägliche Arbeit mit Mauerwerk liefern kann.

Herzliche Grüße

Bensheim und München, Prof. Dr.-Ing. Eric Brehm
im Januar 2020 Prof. Dr.-Ing. Detleff Schermer

Inhaltsverzeichnis

Vorwort III

Autoren XVII

A Baustoffe - Bauprodukte

I Eigenschaften und Eigenschaftswerte von Mauersteinen, Mauermörtel und Mauerwerk 3
 Michael Raupach, Dorothea Saenger und Bernd Winkels, Aachen

1	Einleitung	3	5	Verbundeigenschaftswerte zwischen Mauerstein und Mauermörtel	7
2	Eigenschaftswerte von Mauersteinen	3	5.1	Allgemeines	7
2.1	Festigkeitseigenschaften	3	5.2	Haftscherfestigkeit	8
2.1.1	Druckfestigkeit in Steinhöhe	3	5.3	Haftzug- und Biegehaftzugfestigkeit	9
2.1.2	Druckfestigkeit in Steinlänge und -breite	3	6	Eigenschaftswerte von Mauerwerk	9
2.1.3	Zug- und Spaltzugfestigkeit	4	6.1	Allgemeines	9
2.2	Verformungseigenschaften	4	6.2	Festigkeitseigenschaften	10
2.2.1	Druck-Elastizitätsmodul	4	6.2.1	Druckfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen	10
2.2.2	Querdehnungsmodul, Querdehnzahl	5	6.2.2	Druckfestigkeit parallel zu den Lagerfugen	11
2.2.3	Zug-Elastizitätsmodul	5	6.2.3	Zugfestigkeit	11
2.3	Kapillare Wasseraufnahme	5	6.2.4	Biegezugfestigkeit	12
3	Eigenschaftswerte von Mauermörteln	6	6.2.5	Schubfestigkeit	13
3.1	Festigkeitseigenschaften	6	6.3	Verformungseigenschaften	14
3.1.1	Druckfestigkeit	6	6.3.1	Elastizitätsmoduln	14
3.1.2	Zugfestigkeit	6	6.3.2	Feuchtedehnung, Kriechen, Wärmedehnung	15
3.2	Verformungseigenschaften	6	7	Literatur	15
3.2.1	Längsdehnungsmodul	6			
3.2.2	Querdehnungsmodul	6			
4	Eigenschaftswerte von Mauermörtel im Mauerwerk	6			

II Neuentwicklungen im Mauerwerksbau mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung (abZ) bzw. mit allgemeiner Bauartgenehmigung (aBG) 17
 Roland Hirsch, Berlin, Ludwig Wingerter, Karlsruhe, und Eric Brehm, Bensheim

0	Allgemeines	19	5	Geschosshohe Wandtafeln	30
0.1	Gesonderte Regelungen zu Schlitzen	19	6	Schalungsstein-Bauarten	30
0.1.1	Vertikalschlitze	19	7	Trockenmauerwerk	31
0.1.2	Horizontalschlitze	19	8	Mauerwerk mit PU-Kleber	31
1	Mauerwerk mit Normal- oder Leichtmauermörtel	19	9	Bewehrtes Mauerwerk	31
2	Mauerwerk mit Dünnbettmörtel	20	10	Ergänzungsbauteile	31
3	Mauerwerk mit Mittelbettmörtel	28	11	Literatur	37
4	Vorgefertigte Wandtafeln	28	12	Bildnachweis	38

B Konstruktion - Bauausführung - Bauwerkserhaltung

I	Ermittlung der Tragfähigkeit von Kunststoffdübeln und Metall-Injektionsankern durch Versuche am Bauwerk	41		
	Eckehard Scheller, Berlin, Jürgen H.R. Küenzlen und Thomas Kuhn, Künzelsau, Rainer Becker, Dortmund			
1	Einleitung	41	5.2.5.2	Bestimmung des Verankerungsgrunds bei einem Neubau
2	Grundlagen für Versuche am Bauwerk im Verankerungsgrund Mauerwerk	42	5.2.5.3	Bestimmung des Verankerungsgrunds bei einem Altbau
2.1	Dübel-Systeme	42	5.2.6	Name des Produkts
2.2	Bauaufsichtlich relevanter Bereich	43	5.2.7	Montage
2.3	Zustimmung im Einzelfall/ vorhabenbezogene Bauartgenehmigung	44	5.2.8	Versuchsergebnisse
2.4	Europäische Zulassungen bzw. Bewertungen für Kunststoffdübel	44	5.3	„Zwischenfazit“: Aufgabentrennung
2.5	Europäische Zulassungen bzw. Bewertungen für Metall-Injektionsanker zur Verankerung im Mauerwerk	44	5.4	Auswertung der Zugversuche (Bruchversuche)
2.6	Systematik für den vorliegenden Beitrag	45	5.4.1	Grundlagen für Zugversuche
3	Verantwortlichkeiten	45	5.4.2	Ermittlung der charakteristischen Tragfähigkeit bei mindestens fünf Versuchen
3.1	Allgemeines	45	5.4.3	Ermittlung der charakteristischen Tragfähigkeit über einen vereinfachten Ansatz
3.2	Fachplaner	46	5.4.4	Berücksichtigung von Fugen
3.3	Versuchsleiter	46	5.4.5	Bemessungswert der Tragfähigkeit
3.4	Sachkundiges Personal	46	5.5	Bemerkungen und Hinweise
4	Technische Regel Durchführung und Auswertung von Versuchen am Bau für Kunststoffdübel in Beton und Mauerwerk mit ETA	47	5.6	Unterschriften
4.1	Gliederung/Allgemeines	47	5.7	Bemessung der Verankerung (Befestigung der Unterkonstruktion)
4.2	Anwendungsbereich für Kunststoffdübel	47	5.7.1	Allgemeines
4.2.1	Allgemeines	47	5.7.2	Ausgangsdaten
4.2.2	Baustoffgruppen (Mauerwerksgruppen)	47	5.7.3	Einwirkung aus Eigengewicht
4.2.3	Temperaturbereiche	48	5.7.4	Einwirkung aus Windsog
4.2.4	Bedingungen für Achs- und Randabstände	49	5.7.5	Resultierende Einwirkung
4.2.5	Handeln „im Rahmen der Zulassung“	49	5.7.6	Nachweis Schrägzug
4.3	Versuche für Kunststoffdübel	50	5.7.7	Nachweis Holz: Kopfdurchzug des Dübels durch die Vertikal-Lattung
4.3.1	Allgemeines	50	5.7.8	Nachweis Holz: Kontrolle der Abstände
4.3.2	Bruchversuche	50	5.7.9	Ermittlung der Dübelanzahl für eine Querwand
4.3.3	Probebelastungen	50	5.7.10	Ergebnis/Fazit der Dübelbemessung
4.4	Prüfbericht	51	6	Praxisbeispiel 2: Querlastversuche für Kunststoffdübel (Bruchversuche) – Absturzsicherndes Fensterelement mit unterer Festverglasung
5	Praxisbeispiel 1: Zugversuche für Kunststoffdübel (Bruchversuche) – Befestigung einer Fassadenunterkonstruktion	52	6.1	Einleitung
5.1	Einleitung	52	6.2	Durchführung und zugehörige Dokumentation der Versuche am Bauwerk
5.2	Durchführung und zugehörige Dokumentation der Versuche am Bauwerk	53	6.2.1	Allgemeine Informationen zum Bauvorhaben
5.2.1	Allgemeine Informationen zum Bauvorhaben	53	6.2.2	Ort der Prüfungen
5.2.2	Ort der Prüfungen	53	6.2.3	Prüfvorrichtung
5.2.3	Prüfvorrichtung	55	6.2.4	Art der zu befestigenden Konstruktion
5.2.4	Art der zu befestigenden Konstruktion	58	6.2.5	Verankerungsgrund
5.2.5	Verankerungsgrund	59	6.2.6	Name des Produkts
5.2.5.1	Allgemeines	59	6.2.7	Montage
			6.2.8	Versuchsergebnisse

6.3	„Zwischenfazit“: Aufgabentrennung . . .	82	7.2.3	Temperaturbereiche	93
6.4	Auswertung der Versuchsergebnisse	83	7.2.4	Nutzungsbedingungen in Bezug auf Montage und Verwendung	93
6.4.1	Grundlagen für Querlastversuche am Rand	83	7.2.5	Bedingungen für Achs- und Randabstände	94
6.4.2	Ermittlung der charakteristischen Tragfähigkeit bei mindestens fünf Versuchen	83	7.2.6	Handeln „im Rahmen der Zulassung“ . .	94
6.4.3	Ermittlung der charakteristischen Tragfähigkeit über einen vereinfachten Ansatz	84	7.3	Versuche	94
6.4.4	Berücksichtigung von Fugen	84	7.3.1	Allgemeines	94
6.4.5	Bemessungswert der Tragfähigkeit	84	7.3.2	Bruchversuche	95
6.5	Bemessung der Verankerung (Befestigung des absturzsichernden Fensterelements)	84	7.3.3	Probebelastungen	96
6.5.1	Allgemeines	84	7.3.4	Abnahmeversuche	96
6.5.2	Ausgangsdaten	86	7.3.5	Unterscheidung mit Zahlenbeispiel: Probebelastungen – Abnahmeversuche .	98
6.5.3	Einwirkungen	86	7.3.5.1	Allgemeines	98
6.5.3.1	Windlasten	86	7.3.5.2	Ausgangsdaten für beide Zahlenbeispiele	98
6.5.3.2	Horizontallast bzw. horizontale Nutzlast (Brüstungsriegel)	87	7.3.5.3	Probebelastungen (Zahlenbeispiel)	98
6.5.3.3	Last aus 90° geöffnetem Fenster	87	7.3.5.4	Abnahmeversuche (Zahlenbeispiel)	100
6.5.3.4	Stoßartige Lasten nach ETB-Richtlinie (Außergewöhnliche Einwirkung)	88	7.3.5.5	Vergleich	102
6.5.4	Zu untersuchende Lastfälle	88	7.4	Prüfbericht	102
6.5.4.1	Allgemeines	88	8	Praxisbeispiel 3: Zugversuche für Injektionsanker (Bruchversuche) – Befestigung eines Französischen Balkongeländers	103
6.5.4.2	Lastfall 1: Überlagerung Horizontallast plus Wind	88	8.1	Einleitung	103
6.5.4.3	Lastfall 2: Überlagerung Horizontallast plus Last aus 90° geöffnetem Fenster . . .	89	8.2	Durchführung und zugehörige Dokumentation der Versuche am Bauwerk	104
6.5.4.4	Lastfall 3: Weicher Stoß gemäß ETB-Richtlinie (außergewöhnlicher Lastfall)	89	8.2.1	Allgemeine Informationen zum Bauvorhaben	104
6.5.5	Glied 6 der Nachweiskette: Fenster- montageschiene mit Konsolen- befestigung	89	8.2.2	Ort der Prüfungen	105
6.5.5.1	Nachweis: Befestigung der Lasche der Fenstermontageschiene am Fensterprofil	89	8.2.3	Prüfvorrichtung	105
6.5.5.2	Nachweis: Fenstermontageschiene mit Konsolenbefestigung	89	8.2.4	Art der zu befestigenden Konstruktion .	106
6.5.6	Glied 7 der Nachweiskette: Dübel-Befestigung der Konsolenbefestigung am Baukörper	89	8.2.5	Verankerungsgrund	106
6.5.6.1	Tragfähigkeit der verwendeten Dübel . . .	89	8.2.6	Name des Produkts	106
6.5.6.2	Nachweis: Konsolenbefestigung mit zwei Kunststoffdübeln	90	8.2.7	Montage	108
6.5.6.3	Nachweis Herausschieben eines Steins (Abschätzung)	90	8.2.8	Versuchsergebnisse	109
6.5.7	Ergebnis/Fazit der Dübelbemessung . . .	90	8.3	„Zwischenfazit“: Aufgabentrennung . . .	109
7	Technische Regel Durchführung und Auswertung von Versuchen am Bau für Injektionsankersysteme im Mauerwerk mit ETA	91	8.4	Auswertung der Versuchsergebnisse	110
7.1	Gliederung/Allgemeines	91	8.4.1	Grundlagen für Zugversuche	110
7.2	Anwendungsbereiche für Injektionsanker	91	8.4.2	Ermittlung der charakteristischen Tragfähigkeit über Quantilwerte	110
7.2.1	Allgemeines	91	8.4.2.1	Bestimmung des Referenzsteins	110
7.2.2	Mauerwerksgruppen	91	8.4.2.2	Charakteristische Zugtragfähigkeit	111
			8.4.2.3	Charakteristische Quertragfähigkeit	112
			8.4.3	Ermittlung der charakteristischen Tragfähigkeit über einen vereinfachten Ansatz	112
			8.4.4	Berücksichtigung von Fugen	112
			8.4.5	Bemessungswert der Tragfähigkeit	112
			8.5	Bemessung der Verankerung (Befestigung des Französischen Balkongeländers)	112
			8.5.1	Allgemeines	112
			8.5.2	Ausgangsdaten	113
			8.5.3	Einwirkungen	113
			8.5.3.1	Eigengewicht	113
			8.5.3.2	Verkehrslasten	113
			8.5.3.3	Stoßartige Last	113

8.5.4	Resultierende Einwirkungen auf die maßgebende Ankerplatte	114	8.5.6.5	Steinkantenbruch	120
8.5.4.1	Allgemeines	114	8.5.6.6	Herausdrücken eines Steins	121
8.5.4.2	Ermittlung der maßgebenden Zugkräfte	114	8.5.6.7	Einfluss von Fugen	121
8.5.4.3	Ermittlung der maßgebenden Querlasten	115	8.5.7	Nachweise für Interaktion von Zug- und Querlasten	121
8.5.5	Nachweise für Zugbeanspruchung	116	8.5.8	Fazit zur Bemessung	121
8.5.5.1	Allgemeines	116	9	Zusammenfassung	122
8.5.5.2	Stahlversagen	116	10	Literatur	122
8.5.5.3	Herausziehen des Dübels	117	Anhang A:		
8.5.5.4	Steinausbruch (Dübelgruppe)	117		Kategorien vergleichbarer Hohl- und Lochsteine	125
8.5.5.5	Herausziehen eines Steins	118	Anhang B:		
8.5.5.6	Einfluss von Fugen	119		Blanko-Formular „Dokumentation (Dübel-)Versuche am Bauwerk“	133
8.5.6	Nachweise für Querbeanspruchung	119			
8.5.6.1	Allgemeines	119			
8.5.6.2	Stahlversagen: Querlast ohne Hebelarm	119			
8.5.6.3	Stahlversagen: Querlast mit Hebelarm	120			
8.5.6.4	Örtliches Steinversagen	120			
II	Mauerwerk aus Fertigteilen				
	Dieter Figge, Warburg	143			
1	Einleitung	143	3.4	Aufhängungen mit Tragbolzen	153
1.1	Allgemeines	143	3.5	Mauertafeln aus Kalksandsteinen	154
1.2	Geschichtliches	143	3.6	Mauertafeln aus Porenbeton	154
1.3	Stand der Technik	144	4	Vertikale Stoßfugen zwischen Einzelfafeln	155
2	Arten von Wandelementen	144	4.1	Konstruktive Vertikalfuge	155
2.1	Vergusfafeln	145	4.2	Statische Nachweise für vertikale Stoßfugen zwischen Einzelfafeln	156
2.2	Hochlochfafeln	145	5	Ausfachungsmauerwerk für Stahlbetonskelettkonstruktionen	157
2.3	Rippenfafeln	145	6	Brandschutz	158
2.4	Ziegel-Fertigteildecken	146	7	Transport	159
2.5	Mauertafeln	146	8	Montage	159
2.5.1	Planung	147	9	Überwachung	161
2.5.2	Bemessung von Mauertafeln	147	9.1	Fremdüberwachung [26]	161
2.5.3	Konstruktion von Mauertafeln	148	9.2	Qualitätssicherung	161
2.5.4	Herstellung von Mauertafeln	148	10	Literatur	162
2.5.5	Transport von Mauertafeln	150			
3	Mauertafeln aus Mauersteinen	150			
3.1	Mauertafeln aus Normziegeln (Mauertafelziegeln)	150			
3.2	Mauertafeln aus Zulassungsziegeln	151			
3.3	Aufhängungen mit Hebebandern	151			
III	Veränderung der Tragstrukturen von historischen Mauerwerksgewölben am Beispiel der Erschließung Wilhelmsburg in Ulm				
	Wolfgang Finckh und Hilmar Quantz, Kempten	163			
1	Einleitung	163	2.6	Durchgängigkeit der Planung	169
1.1	Historisches	163	2.7	Die digitale Baustelle	170
1.2	Heutige und zukünftige Nutzung der Anlage	165	3	Horizontale Erschließung	170
1.3	Erforderliche Umbauten	165	3.1	Aufgabenstellung	170
2	Vorgehensweise	165	3.2	Entwurfsfindung	171
2.1	Allgemeines	165	3.2.1	Allgemeines Vorgehen und Randbedingungen	171
2.2	Geometrie	166	3.2.2	Brücke in der Burg	171
2.3	Material	166	3.2.3	Brücke über den Burggraben	172
2.4	Baugrund	167	3.2.3.1	Allgemeines	172
2.5	Zustand	168	3.2.3.2	Varianten	172

3.2.3.3	Vorzugsvariante	173	4.2	Entwurfsfindung	184
3.3	Brücke über den Burggraben	173	4.2.1	Schaffung des Lichtraumprofils	184
3.3.1	Konstruktion	173	4.2.2	Bauteile der Erschließung	184
3.3.2	Statisches System und Berechnung	173	4.3	Gewölbeöffnung	185
3.3.3	Herstellung	174	4.3.1	Konzept und Konstruktion	185
3.4	Brücke in der Burg	176	4.3.2	Bauzustände	185
3.4.1	Konzept und Konstruktion	176	4.3.3	Berechnungsmethodik	187
3.4.2	Gründung	176	4.3.3.1	Allgemeines Vorgehen	187
3.4.3	Bauablauf	176	4.3.3.2	Berechnung am Mauerwerk	187
3.4.4	Berechnungsmethodik	178	4.3.3.3	Nachweis der Aussteifungselemente	190
3.4.4.1	Allgemeines	178	4.4	Aufzugschacht mit Treppe	190
3.4.4.2	Mauerwerk	178	4.5	Herstellung	190
3.4.4.3	Stahlbetonbauwerk	182	4.5.1	Gurtung	190
3.4.5	Herstellung	182	4.5.2	Aufzugsschacht	191
3.5	Gestaltungskonzept	183	4.6	Gestaltungskonzept	192
4	Vertikale Erschließung	184	5	Literatur	193
4.1	Aufgabenstellung	184			

IV Erfolgreiche Digitalisierung im Mauerwerksbau – eine multidisziplinäre Unternehmensaufgabe für Baustoffhersteller 197
 Markus Heße, Michael Leicht, Alexander Brunst, Andreas Radischewski, Sebastian Kulle und Christian Peter Hille, Duisburg

1	Einleitung	197	4	Digitalisierung auf der Mauerwerksbaustelle	210
2	Digital unterstützte Planung im Mauerwerksbau	198	4.1	Papier oder Tablet – Planbereitstellung für die Baustelle	211
2.1	Der digitale Zwilling – erste Produktdaten für die Planung	198	4.2	Hilfsmittel für die effiziente Baustelle – Soll-Ist-Abgleich mit Mixed Reality	211
2.2	Aus Produkten werden Systeme – vom Mauerstein zum Mauerwerk	202	4.3	Mensch und Maschine – ein Ausblick auf Robotik im Mauerwerksbau	213
2.3	Ein Modell, viele Disziplinen – medienbruchfreier Austausch von Produktdaten	204	5	Digitalisierung ist mehr als nur die Bereitstellung von Daten	216
2.4	Haftung für die BIM-Produktdaten	205	5.1	Bieten digitale Daten neue Geschäftsfelder für Mauerwerkshersteller?	216
3	Von Produktdaten zu Produktionsdaten	206	5.2	An welchen Stellschrauben muss gearbeitet werden, damit Mauerwerk digitaler wird?	217
3.1	Das digitale Gebäudemodell – die universelle Datenquelle für die Produktion	206	5.3	Ausblick in die Zukunft der Digitalisierung im Mauerwerksbau	217
3.2	Haftung des Mauerwerksherstellers für das BIM-Modell	207	6	Fazit	218
3.3	Geistige Eigentumsrechte des Mauerwerksherstellers an dem BIM-Modell	209	7	Literatur	219
3.4	Projektverwaltung und Produktionsplanung	210			
3.5	Produktion und Kommissionierung	210			

V	Ziegel aus dem 3D-Drucker	221			
	Martin Wilfinger und Ulrich Knaack, Darmstadt, Holger Strauß, Frankfurt, und Thomas Fehlhaber, München				
1	Einleitung	221	3.7	Direct Energy Deposition oder Direkte Energieabscheidung	226
2	Geschichtlicher Hintergrund	221	4	Additive Herstellung von Ziegeln/Ziegelbauteilen in der aktuellen Forschung und Entwicklung	227
3	Technologie Additive Herstellung	222	5	Strategien zum Drucken von Ziegeln/Ziegelbauteilen	229
3.1	Photopolymerisationsverfahren	224	5.1	Kartesische 3D-Drucker	229
3.1.1	Stereolithographie (SLA)	224	5.2	Delta-3D-Drucker	230
3.1.2	Digitale Lichtverarbeitung (DLP)	224	5.3	Roboterarm basierende 3D-Drucker ..	230
3.2	Bindemittel-Jetting, 3D-Druck (3DP) ..	224	6	Technologieauswahl und Entwicklung des eigenen Druckens für Ziegel	231
3.3	Material-Extrusion	225	6.1	Aufbau und Konzeption	232
3.3.1	FDM (Fused Deposition Modeling), FFF (Fused Filament Fabrication)	225	6.2	Druckversuche	233
3.3.2	Robocasting oder Direktes Schreiben mit Tinte (DIW)	225	6.3	Druckmaterial	234
3.4	Pulverbett-Schmelzung	225	6.4	Druckergebnisse und Fazit zum Projekt ..	236
3.4.1	Selektives Lasersintern (SLS)	225	7	Anwendungsbereich von gedruckten Ziegeln/Ziegelbauteilen	236
3.4.2	Selektives Laserschmelzen (SLM)	225	8	Ausblick	238
3.4.3	Selektives Wärmesintern (SHS)	226	9	Weiterführende Literatur	238
3.4.4	Elektronenstrahlschmelzen (EBM)	226			
3.5	Ebenen-Laminierung	226			
3.5.1	Herstellung laminiertes Objekte (LOM) ..	226			
3.5.2	Selektives Auftragslaminiertes (SDL) ..	226			
3.6	Material-Jetting	226			
VI	Mauerwerksroboter für die Baustelle – internationaler Stand	241			
	Eric Brehm und Christian Wurll, Karlsruhe				
1	Einleitung	241	2.3.3	HADRIAN X	244
2	Aktueller Stand	241	2.3.4	Seilroboter	244
2.1	Historie in Deutschland	241	3	Besonderheiten des deutschen Marktes ..	245
2.2	Aktuelle Bauroboter	242	4	Voraussetzungen und Handlungsbedarf ..	246
2.2.1	Stahlbetondrucker	242	5	Ansatz der Hochschule Karlsruhe	246
2.2.2	In Situ Fabricator	242	6	Auswirkungen auf die Baukultur	247
2.2.3	Interagierende Roboter	242	7	Literatur	248
2.3	Vorhandene Mauerwerksroboter	243			
2.3.1	Allgemeines	243			
2.3.2	SAM100	244			
VII	Standsicherheitsuntersuchungen von Mauerwerkstrukturen mithilfe von stochastischen numerischen Simulationen	249			
	Roger Schlegel, Weimar				
1	Einleitung	249	4	Stochastische Simulation in der Berechnungspraxis	254
2	Numerische Modellierung und Simulation von Mauerwerkstrukturen ..	249	4.1	Definition von Unsicherheiten	255
2.1	Diskretisierung und Materialmodellierung des Mauerwerkverbands	249	4.2	Varianzbasierte Robustheitsanalyse	255
2.2	Nichtlineare Lastgeschichteberechnung ..	251	4.3	Zuverlässigkeitsanalyse	256
3	Modellvalidierung	252	5	Stochastische Analysen zur Versagenswahrscheinlichkeit einer historischen Mauerwerkbrücke gegenüber Schiffsstoß ..	257
3.1	Parametrische Modellierung	252	6	Zusammenfassung	260
3.1.1	Sensitivitätsanalyse	252	7	Literatur	260
3.1.2	Modellkalibrierung	254			

VIII	Eine aus der Notwendigkeit geborene Idee – Betonhohlblocksteine für den Mauerwerksbau in informellen Siedlungen und deren bautechnische Umsetzung	261		
	Oliver von Malm, Gerrit Dittrich, Marcel Enzweiler, Ivana Bivic und Florian Weininger, München, Andreas Saxer, Christoph Walzl, Matthias Egger und Jürgen Feix, Innsbruck, Frank Ilg, Fabian Meyer-Brötz und Jürgen Mayer, Weißenhorn, sowie Jonas Klein und Tilo Proske, Darmstadt			
1	Einleitung	261	5	Betontechnologie zur Herstellung der Betonhohlblocksteine und Produktion im Kibera Slum
2	Entwicklung der Geometrie des Betonhohlblocksteins	262		272
3	Future Products & Technologies bei PERI	264	6	Entwicklung des Wandkonzepts
			6.1	Erste Testwand in Kibera
			6.2	Erste Bauprojekte in Kibera
4	Konstruktive Grundlagen und Anforderungen an das Mauerwerk	264	7	Experimentelle Untersuchung zur Schubtragfähigkeit der Betonhohlblocksteine und daraus hergestellter Wandbauteile
4.1	Anforderungen an das zu entwickelnde Betonhohlblockstein-Mauerwerk	265	7.1	Allgemeines
4.2	Standortspezifische Gegebenheiten im Vergleich	266	7.2	Materialeigenschaften
4.2.1	Definition Mustergebäude	266	7.3	Schubversuche am Einzelstein
4.2.2	Vergleich der ständigen Belastungen	266	7.3.1	Längsschubtragfähigkeit
4.2.3	Vergleich der veränderlichen Belastungen	267	7.3.2	Querschubtragfähigkeit
4.2.4	Vergleich der Erdbebenbelastungen	267	7.4	Schubversuche an Wänden
4.3	Anforderungen an Bauwerksaussteifung und Fügekonzept	267	7.4.1	Übersicht
4.3.1	Bauwerksaussteifung	268	7.4.2	Unbewehrte Wand
4.3.2	Abschätzung der Ausmittigkeit der Druckbeanspruchung an den Mustergebäuden	269	7.4.3	Wand mit Zuganker
4.3.3	Fügekonzept	269	7.4.4	Wand-Rahmensystem
4.4	Anforderungen an die Stein- und Wandwiderstände	269	8	Bemessung eines Prototyps – Schulbau in Kibera
4.4.1	Füllung der Betonhohlblocksteine	270	8.1	Problemstellung bei der Nachweisführung
4.4.1.1	Frischbetonfüllung	270	8.2	Tragkonzept für ein Schulgebäude in Nairobi
4.4.1.2	Erdfüllung	270	8.3	Detailausführung
4.4.1.3	Erdfüllung mit Wassereinstau	270	8.4	Nachweis der Tragfähigkeit
4.4.2	Erforderliche Wandwiderstände	270	8.5	Nachweis der Gebäudeaussteifung
4.4.2.1	Abschätzung des erforderlichen Wanddruckwiderstands	271	8.6	Aussicht – ein generalisiertes Bemessungsverfahren
4.4.2.2	Abschätzung des erforderlichen Wandschubwiderstands	271	9	Ausblick – Praxisanwendung
4.4.2.3	Abschätzung des erforderlichen Wandbiegewiderstands	271	10	Danksagung
4.5	Zusammenfassung der Grundlagen und Anforderungen an das Mauerwerk	271	11	Literatur

C Bemessung

I	Hilfsmittel zur vereinfachten Mauerwerksbemessung	301			
	Valentin Förster, Frankfurt am Main, Benjamin Purkert und Carl-Alexander Graubner, Darmstadt				
1	Einführung	301	4.3.2	Außenwand senkrecht zur Deckenspannrichtung mit vollaufliegender Decke	317
2	Anwendungsbereich der vereinfachten Berechnungsmethoden von DIN EN 1996-3/NA	301	4.3.3	Außenwand parallel zur Deckenspannrichtung mit teilaufliegender Decke	317
3	Wände unter überwiegender Normalkraftbeanspruchung	303	4.3.4	Außenwand senkrecht zur Deckenspannrichtung mit teilaufliegender Decke	318
3.1	Vereinfachte Berechnungsmethode	303	5	Erddruckbeanspruchte Wände	318
3.1.1	Bemessung bei Normaltemperatur	303	5.1	Nachweisverfahren	318
3.1.1.1	Normative Regelungen	303	5.2	Bemessungstafel	319
3.1.1.2	Grundlagen der Tragfähigkeitstafeln	304	5.3	Beispiele	319
3.1.2	Bemessung im Brandfall	304	5.3.1	Vollständig angeschüttete Wand	320
3.1.2.1	Normative Regelungen	304	5.3.2	Teilweise angeschüttete Wand	321
3.1.2.2	Grundlagen der Tragfähigkeitstafeln	305	6	Nichttragende Wände	321
3.1.3	Bemessung mit Tragfähigkeitstafeln	306	6.1	Innenwände	321
3.1.3.1	Vorgehensweise	306	6.1.1	Nachweisverfahren	321
3.1.3.2	Tragfähigkeitstafeln für die „kalte“ und „heiße“ Bemessung	306	6.1.2	Bemessungstafeln	323
3.1.4	Beispiele	307	6.1.3	Beispiele	323
3.1.4.1	Innenwand	307	6.1.3.1	Dreiseitig gehaltene innere Trennwand	323
3.1.4.2	Außenwand mit teilaufliegender Decke	307	6.1.3.2	Vierseitige gehaltene innere Trennwand	323
3.1.4.3	Außenwand mit vollaufliegender Decke	307	6.2	Außenwände	324
3.2	Stark vereinfachte Berechnungsmethode	312	6.2.1	Nachweisverfahren	324
3.2.1	Nachweisverfahren	312	6.2.2	Beispiele	324
3.2.2	Bemessungstafeln	312	6.2.2.1	Außenwand mit quadratischer Ausfachungsfläche	324
3.2.3	Beispiele	312	6.2.2.2	Außenwand mit rechteckiger Ausfachungsfläche	324
3.2.3.1	Innenwand	312	7	Vereinfachter Aussteifungsnachweis	325
3.2.3.2	Außenwand im obersten Geschoss	312	7.1	Nachweisverfahren	325
4	Windbeanspruchte Wände unter minimaler Auflast	313	7.2	Beispiel	325
4.1	Nachweisverfahren	313	8	Zusammenfassung	326
4.2	Bemessungstafeln	314	9	Literatur	327
4.3	Beispiele – Außenwände im obersten Geschoss	315			
4.3.1	Außenwand parallel zur Deckenspannrichtung mit vollaufliegender Decke	315			
II	Erdbebenbemessung bei Mauerwerksbauten	329			
	Christoph Butenweg, Aachen, Christoph Gellert, Herzogenrath, und Udo Meyer, Berlin				
1	Einleitung	329	3.1	Versagensformen von Mauerwerkswänden	334
2	Seismische Einwirkung	329	3.2	Wand-Decken-Interaktion und Normalkraftumlagerungen	335
2.1	Entwicklung der Erdbebenkarten	329	4	Auslegung mit konstruktiven Regeln	336
2.2	Erdbebeneinwirkung nach DIN 4149	329	4.1	Erforderliche Schubwandquerschnittsflächen: DIN 4149	337
2.2.1	Horizontales Bemessungsspektrum	330	4.2	Erforderliche Schubwandquerschnittsflächen: DIN EN 1998-1/NA	338
2.3	Erdbebeneinwirkung nach DIN EN 1998-1/NA	331	4.3	Bewertung im Hinblick auf die Anwendung in der Praxis	338
2.3.1	Horizontales Bemessungsspektrum	332			
3	Seismisches Verhalten von Mauerwerksbauten	334			

5	Rechenverfahren	339	6.3.1	Bauwerksbeschreibung und Erdbebeneinwirkung	347
5.1	Lineare kraftbasierte Berechnungen	339	6.3.2	Statisches Ersatzsystem	347
5.1.1	Vereinfachtes Antwortspektrenverfahren	339	6.3.3	Statische Ersatzlasten	348
5.1.2	Multimodales Antwortspektrenverfahren	339	6.3.4	Verteilung der statischen Ersatzlasten auf die Schubwände	349
5.1.2.1	Berechnung der erforderlichen Schwingformen	339	6.3.5	Stand sicherheitsnachweise nach DIN EN 1998-1/NA	349
5.1.2.2	Kombination der Schwingformen und Richtungsüberlagerung	339	6.3.6	Nachweis mit einem Verhaltensbeiwert von $q = 1,7$	349
5.2	Nichtlineare statische Berechnungen	340	6.3.7	Nachweis mit erhöhten Verhaltensbeiwerten	349
5.2.1	Grundlagen und Berechnungsablauf	340	6.4	Mehrfamilienhaus – Nichtlinearer statischer Nachweis	350
5.2.2	Ermittlung der Kapazitätskurven für Mauerwerksgebäude	340	6.4.1	Bauwerksbeschreibung und Erdbebeneinwirkung	350
5.3	Berücksichtigung von Torsionseffekten	341	6.5	Vergleichsberechnung: Vereinfachtes Antwortspektrenverfahren	350
5.4	Ansatz von Verhaltensbeiwerten für Mauerwerk	342	6.6	Nichtlinearer statischer Nachweis	352
5.4.1	Verhaltensbeiwert aus Verformungsfähigkeit und Energiedissipation	343	7	Entwicklung neuer rechnerischer Nachweiskonzepte	353
5.4.2	Verhaltensbeiwert aus Lastumverteilung im Grundriss	343	8	Zusammenfassung	354
6	Praxisbeispiele	344	9	Literatur	355
6.1	Reihenhaus – Konstruktive Regeln nach DIN 4149	344			
6.2	Reihenhaus – Konstruktive Regeln nach DIN EN 1998-1/NA	345			
6.3	Mehrfamilienhaus – Vereinfachtes Antwortspektrenverfahren	347			

D Forschung

I Übersicht über abgeschlossene und laufende Forschungsvorhaben im Mauerwerksbau 359
Jonathan Schmalz, Regensburg, und Ludwig Wingerter, Karlsruhe

1	Abgeschlossene Forschungsvorhaben	363	2.2.4	Verhalten von Stahlbetonrahmen mit entkoppelten Mauerwerksausfachungen und Öffnungen unter seismischen Einwirkungen	369
1.1	Übersicht Forschungsprojekte und Forschungsstellen	363	2.2.5	Forschungsprojekt BIM-SIS	371
1.2	Kurzberichte	363	2.2.6	Statische Vergleichsberechnung von gemauerten Gewölbebrücken zur Validierung des Entwurfs der neuen Nachrechnungsrichtlinie (Mauerwerk)	373
1.2.1	Betriebsbegleitende Simulation zur optimierten Produktionsplanung und -steuerung in KS-Werken	363	2.2.6.1	Einleitung	373
2	Laufende Forschungsvorhaben	363	2.2.6.2	Beispiel einer zweifeldrigen Brücke	375
2.1	Übersicht Forschungsprojekte und Forschungsstellen	363	2.2.7	Optimierung der Eigenschaftskennwerte von Kalksandsteinen durch den Einsatz von Recycling- und mineralischen Füllern	380
2.2	Kurzberichte	364	2.2.8	Verbesserte Schalldämmung von Kalksandsteinmauerwerk durch Optimierung der produktions-technischen Herstellparameter – Erhöhung des dynamischen E-Moduls des KS-Materials	386
2.2.1	Neue Ansätze für die realistische Bemessung von Mauerwerksbauten unter Horizontallasten	364	2.2.9	Entwicklung von Seilrobotern für die Erstellung von Kalksandstein-Mauerwerk auf der Baustelle	387
2.2.2	Entwicklung eines innovativen Ansatzes zur Entkopplung von Ausfachungen und nichttragenden Trennwänden aus Mauerwerk von der Tragstruktur	365			
2.2.3	Einfluss der exzentrischen Lasteinleitung am Außenwand-Decken-Knoten auf die Schubtragfähigkeit von monolithischen Außenwänden aus Ziegelmauerwerk	367			

2.2.10	Einsatz natürlicher mineralischer Füller für die Optimierung der Eigenschaftswerte von Kalksandsteinen – Reduzierung der Produktionskosten, des Energieverbrauchs und der CO ₂ -Emissionen	387	2.2.12	Kosteneinsparung und Steigerung der Ressourceneffizienz von Kalksandsteinen durch Ansatz von Druckhaltstufen bei der Hydrothermalhärtung – sog. „Treppenkurven“ – CO ₂ -Einsparung	388
2.2.11	Einsatz von metallurgischen Schlacken bei der Kalksandsteinproduktion zur Erhöhung des baulichen Schallschutzes	388	2.2.13	Eignung von Kalksandstein-Recyclingmaterial zur Bodenverbesserung	389

E Normen ▪ Zulassungen ▪ Regelwerk

I Mauerwerksbau mit vorhabenbezogener Bauartgenehmigung bzw. mit Zustimmung im Einzelfall 393
 Hans-Alexander Biegholdt, Leipzig

1	Einführung	393	4.2	Erfordernis einer vorhabenbezogenen Bauartgenehmigung	398
2	Grundlagen	393	4.3	Antragsteller	398
2.1	Bauaufsichtliche Regelungen	393	5	Zustimmung im Einzelfall/ vorhabenbezogene Bauartgenehmigung für die Ver- und Anwendung von Bauprodukten des Mauerwerksbaus in Sachsen	398
2.2	Geltungsbereich der Zustimmung im Einzelfall/vorhabenbezogenen Bauartgenehmigung	394	5.1	Landesbezogene Umsetzung der Musterregelungen	398
2.3	Abgrenzung zum allgemeinen bauaufsichtlichen Prüfzeugnis nach § 19 MBO	394	5.2	Allgemeines	398
2.4	Zuständigkeiten bei der Erteilung von Zustimmungen im Einzelfall/vorhabenbezogenen Bauartgenehmigungen in den Ländern	394	5.3	Abgrenzung zum Genehmigungsverfahren und zur allgemeinen Bewährung	398
3	Anforderungen an Bauprodukte	394	5.4	Antragstellung	398
3.1	Allgemeines	394	5.5	Eigenschaften des Bauprodukts	400
3.2	CE-gekennzeichnete Bauprodukte	394	5.6	Übereinstimmungsnachweis	400
3.3	Nationaler Verwendbarkeitsnachweis	396	5.7	Regelungen zur Bauart	400
3.4	Produkte des Mauerwerksbaus	396	5.8	Sonderfall Lehmbauweise	401
4	Antragsverfahren zur Erlangung einer Zustimmung im Einzelfall/ vorhabenbezogenen Bauartgenehmigung	397	5.9	Gebühren	401
4.1	Anlass zur Erlangung einer Zustimmung im Einzelfall nach § 20 MBO	397	5.10	Bearbeitungszeiten	401
			6	Literatur	401

II Geltende Technische Regeln für den Mauerwerksbau (Deutsche, Europäische und Internationale Normen) (Stand 27.07.2020) 403
 Nanjie Hu und Benjamin Purkert, Berlin

1	Vorbemerkung	403	3	Regelwerk	405
2	EuGH-Urteil vom 16. Oktober 2014 (Rs. C-100/13)	404	4	Literatur	420

Stichwortverzeichnis	421
---------------------------------------	------------

I **Eigenschaften und Eigenschaftswerte von Mauersteinen, Mauermörtel und Mauerwerk**

Michael Raupach, Dorothea Saenger und Bernd Winkels, Aachen

1 **Einleitung**

Der vorliegende Beitrag wurde von Dr. Peter Schubert[†] am Institut für Baustoffforschung (ibac) der RWTH Aachen University ab dem Jahr 1989 verfasst und ab dem Jahr 2013 durch Prof. Wolfgang Brameshuber[†] fortgeführt. Die Autoren haben ihn neu aufbereitet.

In den nachfolgenden Abschnitten werden die wesentlichen Festigkeits- und Verformungseigenschaften von Mauersteinen, Mauermörtel und Mauerwerk jeweils kurz hinsichtlich Bedeutung und Prüfverfahren beschrieben und – soweit möglich und sinnvoll – Eigenschaftswerte angegeben. Diese beruhen auf Auswertungen von Daten tatsächlich geprüfter Materialien und Materialkombinationen, entstanden in zahlreichen Forschungsvorhaben am ibac bzw. zusammengetragen im Rahmen ergänzender Literaturrecherchen.

Es wird deutlich, dass aufgrund der vielfältigen Materialien und Kombinationsmöglichkeiten eine große Bandbreite an Eigenschaftswerten entsteht. In Normen und allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen werden anzusetzende Eigenschaftswerte bzw. Mindesteigenschaftswerte festgelegt. Die hier aufgeführten Eigenschaftswerte gehen über Normanforderungen hinaus und sollen bei gesonderten Fragestellungen helfen, eine fachlich fundierte Antwort zu finden, wie z. B. bei der Beurteilung der Rissicherheit von Mauerwerk (Gebrauchstauglichkeitsnachweis), bei einer Schadensdiagnose oder aber bei genaueren Nachweisen für die Tragfähigkeit von Bauwerken. In Grenzfällen können durch einen ingenieurmäßig überdachten Ansatz geeigneter Kennwerte vorhandene Baustoffreserven ausgenutzt werden.

Nicht Gegenstand dieses Beitrags sind wärme- und schallschutztechnische Eigenschaftswerte sowie Eigenschaftswerte, die regelmäßig im Rahmen von Normen, Zulassungen etc. nachzuweisen sind, wie z. B. die Druckfestigkeit oder die Rohdichte.

2 **Eigenschaftswerte von Mauersteinen**

2.1 **Festigkeitseigenschaften**

2.1.1 **Druckfestigkeit in Steinhöhe**

Die Druckfestigkeit in Richtung Steinhöhe ist eine der wesentlichen Kenngrößen von Mauersteinen. Die Prüfung der Druckfestigkeit erfolgt nach DIN EN 772-1 [16] an ganzen Mauersteinen.

2.1.2 **Druckfestigkeit in Steinlänge und -breite**

Bei einigen Beanspruchungen von Mauerwerkbauteilen bzw. Bauteilbereichen, wie Scheibenschub, Biegung (Biegedruckzone) oder Teilflächenbelastung senkrecht zur Wandebene, können die Mauersteine in Richtung Steinlänge bzw. -breite auf Druck beansprucht werden. Die Prüfung der Druckfestigkeit in diese Richtungen erfolgt in Anlehnung an DIN EN 772-1 [16] an ganzen Mauersteinen.

Die Druckfestigkeit in Richtung Steinlänge und -breite ist im Allgemeinen kleiner als in Richtung Steinhöhe. Bei Vollsteinen resultiert herstellungsbedingt (Pressen, Strangpressen, Rüttelverdichtung oder Treiben) eine leichte Anisotropie. Die Form der Mauersteine hat ebenfalls einen großen Einfluss auf die Prüfwerte der Steindruckfestigkeit. Bei Lochsteinen resultieren je nach Lochanteil, Form der Lochung, Lochanordnung etc. weitaus kleinere Druckfestigkeitswerte.

Anhaltswerte von Druckfestigkeitsverhältnissen Steinlänge/Steinhöhe sind in [1] angegeben. Nach [1] lassen sich daraus folgende Zusammenhänge ableiten: Unabhängig vom Lochanteil kann für Hochlochziegel und Leichtbetonhohlblöcke kein Zusammenhang zwischen der Druckfestigkeit in Steinhöhe und der Druckfestigkeit in Steinlänge festgestellt werden. Für Mauerziegel, Kalksandvollsteine und Kalksandlochsteine ist das Druckfestigkeitsverhältnis Steinlänge/Steinhöhe von der Steindruckfestigkeit in Steinhöhe weitgehend unabhängig. Für Porenbetonsteine ergibt sich mit zunehmender Steindruckfestigkeit eine Abnahme des Druckfestigkeitsverhältnisses.

2.1.3 Zug- und Spaltzugfestigkeit

Für die Schub- und Biegetragfähigkeit von Mauerwerk kann die Steinzugfestigkeit in Richtung Steinhöhe und -länge maßgebend werden. Bei der Mauerwerkdrucktragfähigkeit ist wegen des entstehenden mehraxialen Spannungszustands die Steinzugfestigkeit in Richtung Steinbreite und -länge eine maßgebende Größe.

Die Prüfung der Zugfestigkeit ist nicht normativ geregelt. Je nach Anisotropie, Form und Lochung unterscheiden sich i. d. R. auch die Zugfestigkeitswerte richtungsabhängig.

Tabelle 1 gibt den Stand der Auswertung nach [2] wieder. Die in Richtung Steinlänge bestimmten Zugfestigkeitswerte sind als Verhältniswerte bezogen auf die in Richtung Steinhöhe geprüften Druckfestigkeitswerte angegeben. In Tabelle 1 sind zudem rechnerische Steinzugfestigkeitswerte bezogen auf die umgerechnete mittlere Steindruckfestigkeit nach DIN EN 1996-1-1/NA [17] aufgeführt. Bei diesen Werten handelt es sich um charakteristische Werte.

Mithilfe der angegebenen Verhältniswerte $f_{bt,cal}/f_{st}$ kann die rechnerische Steinzugfestigkeit für die Ermittlung der charakteristischen Biegezug- und Schubfes-

tigkeit bei Steinzugversagen abgeschätzt werden, vgl. Abschnitte 6.2.4 und 6.2.5. Um die Verhältniswerte $\beta_{z,l}/\beta_{D,st,prüf}$ für den Nachweis der Biegezug- und Schubtragfähigkeit ansetzen zu können, sind die Prüfwerte jeweils noch in charakteristische Werte umzurechnen. In Grenzfällen können durch Ansatz dieser Werte ggf. vorhandene Baustoffreserven ausgenutzt und höhere Biegezug- bzw. Schubfestigkeiten erzielt werden.

In bestimmten Fällen kann das Heranziehen der Spaltzugfestigkeit zur Abschätzung der Zugfestigkeit von Vollsteinen von Vorteil sein. Als Anhaltswert kann näherungsweise ein Verhältnis Spaltzugfestigkeit $\beta_{sz,l}$ zur Zugfestigkeit $\beta_{z,l}$ zwischen 1,1 und 1,3 angenommen werden, vgl. [1].

2.2 Verformungseigenschaften

2.2.1 Druck-Elastizitätsmodul

Der Elastizitätsmodul gibt das Verhältnis der einwirkenden Spannung zur resultierenden elastischen Dehnung an und ist allgemein bei Mauerwerk als Sekantenmodul bei einem Drittel der Höchstspannung unter

Tabelle 1. Mauersteine; Verhältniswerte Steinzug-/Steindruckfestigkeit nach [2]

Steinart	Mauerstein	$\beta_{z,l}/\beta_{D,st,prüf}$			$f_{bt,cal}/f_{st}$
		Mittelwert	Wertebereich	Anzahl Versuchswerte	
Hohlblocksteine	Hbl	0,08	0,05 ... 0,13	8	0,020
	Hbl 2	0,09	0,07 ... 0,13	5	
	Hbl ≥ 4	0,07	0,06 ... 0,10	3	
	Hbn	0,08	0,06 ... 0,09	2	
Hochlochsteine	HLz	0,03	0,013 ... 0,041	20	0,026
	LHLz	0,01	0,002 ... 0,019	54	
	KS L	0,035	0,026 ... 0,055	19	
Steine mit Grifflöchern und Griffaschen	KS(GL)	0,045	0,027 ... 0,065	24	0,026
Vollsteine ohne Grifflöcher oder Griffaschen	KS	0,063	0,039 ... 0,081	18	0,032
	Mz	0,04	0,01 ... 0,08	9	
	V, Vbl	0,08	0,04 ... 0,21	23	
	V2, Vbl2	0,11	0,06 ... 0,18	16	
	V, Vbl ≥ 4	0,07	0,05 ... 0,09	7	
Porenbetonsteine	PB, PP	0,11	0,06 ... 0,19	24	$1,25 \cdot \frac{1}{0,7 + \left(\frac{f_{st}}{25}\right)^{0,5}}$
	PB2, PP2	0,18	0,13 ... 0,20	7	
	PB und PP 4, 6, 8	0,11	0,09 ... 0,13	8	

$\beta_{z,l}$ Prüfwert der Steinzugfestigkeit in Richtung Steinlänge

$\beta_{D,st,prüf}$ Prüfwert der Steindruckfestigkeit in Richtung Steinhöhe (ohne Formfaktor)

$f_{bt,cal}$ rechnerische Steinzugfestigkeit nach DIN EN 1996-1-1/NA [17]

f_{st} umgerechnete mittlere Steindruckfestigkeit nach DIN EN 1996-1-1/NA [17]

einmaliger Belastung definiert. Der Druck-E-Modul von Mauersteinen wird im Druckversuch in Steinhöhe ermittelt.

Der Elastizitätsmodul von Mauersteinen beeinflusst die Steifigkeit von Mauerwerk maßgeblich. Für eine erste Abschätzung des Druck-E-Moduls von Kalksand- und Porenbetonsteinen können nach [1] folgende Beziehungen gewählt werden, wobei der Wert in Klammern das Bestimmtheitsmaß der gewählten Regression angibt:

a) Kalksandsteine (Prismen; 12 Einzelwerte):

$$E_D = 230 \cdot \beta_{D,st}$$

b) Porenbetonsteine (Zylinder; 18 Mittelwerte):

$$E_D = 700 \cdot \beta_{D,st}^{0,74} \quad (0,83)$$

2.2.2 Querdehnungsmodul, Querdehnzahl

Zur Bestimmung des Querdehnungsmoduls von Mauersteinen unter einer Druckbeanspruchung in Richtung Steinhöhe wird die Spannung auf die zugehörige, quer zur Belastungsrichtung, d. h. in Richtung Steinhöhe bzw. -breite, gemessene Dehnung bezogen.

Diese Kenngröße ist von maßgebender Bedeutung für die Drucktragfähigkeit von Mauerwerk. Bei einem ungünstigen Verhältnis der Querdehnungsmoduln von Mauermörtel und Mauerstein wird Letzterer stärker auf Zug beansprucht, was die Druckfestigkeit des Mauerwerks reduziert. Werte für den Querdehnungsmodul von Mauersteinen sind in Tabelle 2 angegeben, vgl. [1].

Neben dem E-Modul spielt auch die Querdehnzahl μ der Mauersteine in Bezug auf die Mauerwerkdruckfestigkeit eine wesentliche Rolle. Die Querdehnzahl ergibt sich im Druckspannungszustand als Absolutwert aus dem Verhältnis von Querdehnung zu Längsdehnung bei einem Drittel der Höchstspannung. Wertebereiche für die Querdehnzahl verschiedener Mauersteine sind ebenfalls in Tabelle 2 aufgeführt, vgl. auch [3].

Tabelle 2. Mauersteine; Querdehnungsmodul E_q in 10^3 N/mm^2 , Querdehnzahl μ (aus [1] und [3])

Mauerstein	Festigkeitsklasse	E_q	μ
		Wertebereich	
Hbl, Vbl	2... 6	3,6... 20 (8)	0,08... 0,11
PB, PP	2... 6	5,6... 25 (7)	0,11... 0,15
KS, KS L, KSHbl	8... 28	12... 100 (12)	0,12
HLZ	6	2,7... 40 (4)	0,11... 0,20
	8	12... 59 (8)	
	12	31... 55 (4)	
	48	133 (-)	

Werte in Klammern: Anzahl der Versuchswerte

2.2.3 Zug-Elastizitätsmodul

Der Zug-E-Modul von Mauersteinen ist analog zum Druck-E-Modul definiert und wird in einaxialen Zugversuchen bestimmt. Zwischen dem Zug-E-Modul und der Steinhöhe wurden nach [1] folgende Zusammenhänge ermittelt, wobei die Werte in Klammern das Bestimmtheitsmaß der gewählten Regression angeben:

a) Kalksandsteine (Prismen; 13 Mittelwerte)

$$E_Z = 5800 \cdot \beta_{z,1}^{0,73} \quad (0,95)$$

b) Leichtbetonsteine (Prismen; 35 Einzelwerte)

$$E_Z = 6000 \cdot \beta_{z,1} \quad (0,77)$$

c) Porenbetonsteine

$$E_Z = 3180 \cdot \beta_{z,1} \quad (0,78)$$

(Zylinder, Prismen; 21 Mittelwerte)

$$E_Z = 1,01 \cdot E_D \quad (0,93)$$

(Zylinder; 11 Mittelwerte)

2.3 Kapillare Wasseraufnahme

Die Wasseraufnahmefähigkeit von Mauersteinen kann durch die kapillare Wasseraufnahme bzw. den Wasseraufnahmekoeffizienten ω gekennzeichnet werden. Diese sind wichtige Kenngrößen für die Beurteilung des Wasserabsaugens aus dem Fugenmörtel durch den Mauerstein, für die Wasseraufnahme von Sichtflächen bei Beregnung, vor allem bei Schlagregen, sowie für die Beurteilung des Austrocknungsverhaltens.

Werden Mauersteine mit schneller Wasseraufnahmekoeffizienten ω – vor dem Vermörteln nicht vorgegast, so kann dem Mörtel nach dem Vermauern zu viel Wasser entzogen werden. Mögliche Folgen sind eine zu geringe Verbundfestigkeit zwischen Mauermörtel und Mauerstein (Haftscher- und Haftzugfestigkeit) und/oder eine zu geringe Mörteldruckfestigkeit in der Fuge. Dies trifft stets für Mauersteine mit einem hohen Anteil an kleinen Kapillarporen und geringem Feuchtegehalt vor dem Vermörteln zu.

Die kapillare Wasseraufnahme wird i. d. R. nach DIN EN ISO 15148 [18] geprüft. Ausgehend vom getrockneten Zustand wird bei ständigem Wasserkontakt der Saugfläche der zeitliche Verlauf der Wasseraufnahme ermittelt. Dieser ist bei reinen kapillaren Saugvorgängen im Wurzelmaßstab annähernd linear. Der Anstieg wird durch den Wasseraufnahmekoeffizienten ω in $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$ gekennzeichnet.

Tabelle 3 enthält ω -Werte von Mauersteinen nach [4]. In Bild 1 wird der an verschiedenen Mauersteinen bestimmte zeitliche Verlauf der kapillaren Wasseraufnahme dargestellt. Es wird ersichtlich, dass Mauerziegel in kürzester Zeit Wasser aufnehmen, während Kalksandsteine über einen langen Zeitraum kontinuierlich saugen.

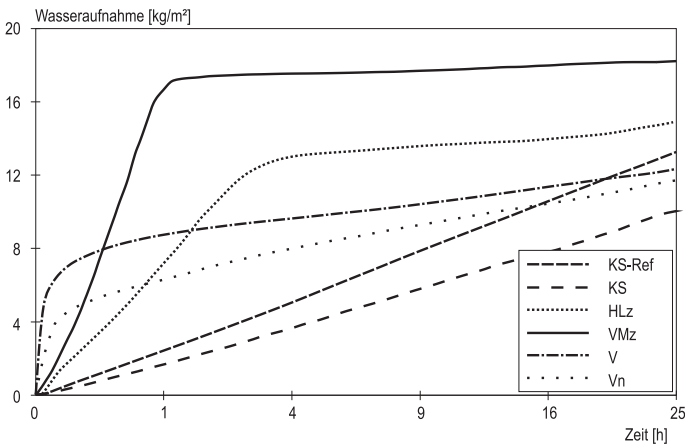


Bild 1. Zeitlicher Verlauf der Wasseraufnahme unterschiedlicher Mauersteine nach [4]

Tabelle 3. Mauersteine; Wasseraufnahmekoeffizient ω (aus [4])

Mauerstein	Mittlerer Wert	Wertebereich	n
	kg/(m ² · h ^{0,5})		
Kalksand-Referenzsteine (KS-Ref)	2,7	2,4 ... 2,9	3
Kalksandsteine (KS)	2,0	1,7 ... 2,1	3
Hochlochziegel (HLz)	7,4	7,2 ... 7,5	3
Mauerziegel (VMz)	18,9	18,6; 19,1	2
Leichtbetonsteine (V)	1,0	1,0; 1,0	2
Betonsteine (Vn)	1,5	1,2; 1,9	2

n: Anzahl der Einzelwerte

3 Eigenschaftswerte von Mauermörteln

3.1 Festigkeitseigenschaften

3.1.1 Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit von Mauermörtel wird an Normprismen nach DIN EN 1015-11 [19] bestimmt.

3.1.2 Zugfestigkeit

Die Prüfung der Zugfestigkeit von Mauermörtel ist nicht normativ geregelt. Für Normalmauermörtel ergab sich nach [1] aus 33 Einzelwerten die folgende Beziehung zwischen Zug- und Druckfestigkeit (Wert in Klammern: Bestimmtheitsmaß):

$$\beta_z = 0,11 \cdot \beta_D \quad (0,91)$$

3.2 Verformungseigenschaften

3.2.1 Längsdehnungsmodul

Der Längsdehnungsmodul von Mauermörtel wird im statischen Druckversuch an Mörtelgroßprismen nach

DIN 18555-4 [20] ermittelt. In [1] sind folgende Beziehungen zwischen dem Längsdehnungsmodul E und der Normdruckfestigkeit β_D angegeben:

a) Normalmauermörtel

$$E = 2100 \cdot \beta_D^{0,7}$$

b) Leichtmauermörtel mit Gesteinskörnungen aus Blähton

$$E = 1200 \cdot \beta_D^{0,6}$$

c) Leichtmauermörtel mit Gesteinskörnungen aus Perliten

$$E = 1200 \cdot \beta_D^{0,4}$$

3.2.2 Querdehnungsmodul

Der Querdehnungsmodul von Mauermörtel wird im Allgemeinen gemeinsam mit dem Längsdehnungsmodul bestimmt, s. Abschnitt 3.2.1. Dabei wird die Druckspannung auf die zugehörige gemessene Querdehnung bezogen.

Ist der Querdehnungsmodul des Mauermörtels deutlich kleiner als der des Mauersteins, so entstehen durch die größere Querverformbarkeit des Lagerfugenmörtels zusätzliche Querkzugspannungen im Stein, wodurch die Mauerwerkdruckfestigkeit verringert werden kann. Dies ist besonders bei leichten Leichtmauermörteln mit sehr verformbaren Gesteinskörnungen, z. B. mineralische Perlite, der Fall.

Werte für E_q sind in Tabelle 4 angegeben, vgl. [1].

4 Eigenschaftswerte von Mauermörtel im Mauerwerk

Die Eigenschaften von Mauermörtel werden durch den Kontakt mit den Mauersteinen in mehr oder weniger starkem Umfang beeinflusst. Abhängig von der Mauersteinart und dem Feuchtegehalt des Mauersteins beim Vermauern wird dem Mauermörtel mehr

Tabelle 4. Mauermörtel; Trockenrohdichte ρ_d , Druckfestigkeit β_D und Querdehnungsmodul E_q (aus [1])

Mörtelart	ρ_d	β_D	E_q	n
	kg/dm ³	N/mm ²	10 ³ N/mm ²	
Normalmauermörtel	1,1 ... 1,9	1,5 ... 24	1,2 ... 116	49
Dünnbettmörtel	1,4 ... 1,6	14 ... 21	36 ... 49	5
Leichtmauermörtel LM 21 (Zuschlag: Polystyrol, Perlite, Naturbims)	0,6 ... 0,8	8,4 ... 11,6	6,7 ... 15	23
Leichtmauermörtel LM 36 (Zuschlag: Blähton, Naturbims, Blähschiefer)	0,8 ... 1,2	4,0 ... 21	16 ... 48	36

n: Anzahl der Versuchswerte

oder weniger Wasser über einen kurzen oder langen Zeitraum entzogen, vgl. Abschnitt 2.3. Dieser Effekt kann sich festigkeitsmindernd oder -steigernd auswirken. Festigkeitssteigerungen ergeben sich nach [5] dann, wenn abgesaugtes Wasser zu einer wirkungsvollen Senkung des w/z-Wertes und damit zu einer Verdichtung des Gefüges führt. Dagegen ergeben sich Festigkeitsminderungen, wenn in der Fuge infolge eines zu hohen Wasserentzugs die für eine vollständige Hydratation erforderliche Wassermenge nicht mehr zur Verfügung steht.

Diese Veränderung der Eigenschaften des Mörtels in Kontakt zum Mauerstein beeinflusst die Festigkeitseigenschaften von Mauerwerk. Insofern können Eigenschaftswerte, die an beeinflusstem Mörtel ermittelt werden, für weiterführende Analysen und Abschätzungen verwendet werden. Die Fugendruckfestigkeit könnte beispielsweise bei neuen Ansätzen für die rechnerische Bestimmung der Mauerwerkdruckfestigkeit berücksichtigt werden.

Die Bestimmung der Fugendruckfestigkeit erfolgt nach DIN 18555-9 [21].

In Bild 2 ist die auf die Prismen-Druckfestigkeit β_D bezogene Fugendruckfestigkeit $\beta_{F,III}$ verschiedener Mauerstein-Mauermörtel-Kombinationen dargestellt (Werte aus [6]). Die Mauersteine wurden in unterschiedlichen Feuchtezuständen vermauert: trocken, d. h. mit Ausgleichsfeuchte bei Lagerung in 20/65, sowie feucht, d. h. mit einem Feuchtegehalt von rd. 10 M.-%. Als Mauermörtel wurden Werk trocken (WTM) und Werkfrischmörtel (WFM) mit folgenden Zusatzmitteln verwendet: Luftporenbildner (LP), Verzögerer (VZ), Methylcellulose (MC) und Methylhydroxypropylcellulose (MPHC).

Vor allem bei trocken vermaurten Kalksandsteinen können sich je nach Feuchtezustand bezogene Druckfestigkeiten in der Fuge $\leq 1,0$ ergeben. Hingegen kann die Saugcharakteristik bei Mauerziegeln (schnelle Wasseraufnahme in kurzem Zeitraum) zu einer Festigkeitssteigerung führen, unabhängig vom Feuchtezustand der Mauersteine, vgl. [6]. Bei Verwendung von Werkfrischmörtel mit einem geringen Wasserrückhaltevermögen können sich Festigkeitseinbußen in Kombination mit KS-Ref, KS und LB (jeweils trocken vermauert) ergeben. Die Rechenfestigkeit kann folglich auf der unsicheren Seite liegen. Um bei der Entwicklung neuer Mörtelrezepturen kritische Fälle identifizieren zu können, müssen diese Mauermörtel die Mindestanforderungswerte an die Fugendruckfestigkeit nach DIN 20000-412 [22] erfüllen.

5 Verbundeigenschaftswerte zwischen Mauerstein und Mauermörtel

5.1 Allgemeines

In Mauerwerkbauteilen, die durch horizontale Lasten auf Schub oder Biegezug oder auch infolge Zwangsspannungen auf Zug beansprucht werden, müssen Zug- und Schub- bzw. Scherkräfte in den Verbundfugen zwischen den einzelnen Mauersteinen übertragen werden. Der Verbund zwischen Mauerstein und Mauermörtel beeinflusst daher maßgeblich die Tragfähigkeit und Rissicherheit von Mauerwerk.

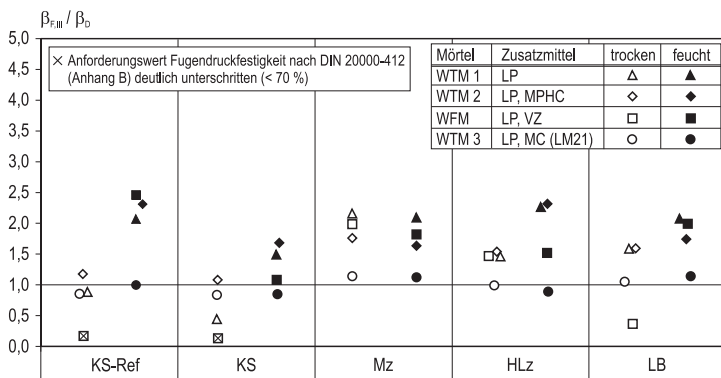


Bild 2. Fugendruckfestigkeit $\beta_{F,III}$ bezogen auf die Prismen-Druckfestigkeit β_D ; Prüfalter: 28 Tage (Werte aus [6])

Die Verbundfestigkeit dient zur quantitativen Erfassung der Haftung zwischen Mauerstein und Mauer­mörtel. Diese wird differenziert nach Haftscherfestigkeit und Haftzugfestigkeit. Während die Haftzugfestigkeit bei der Bemessung von biegezug-/schubbeanspruchten Mauerwerkbauteilen nach DIN EN 1996-1-1/NA [17] nicht in Rechnung gestellt wird, ist die Haftscherfestigkeit eine bemessungsrelevante Baustoffkenngröße.

5.2 Haftscherfestigkeit

Durch die Haftscherfestigkeit werden die Scherkräfte erfasst, die entlang der Grenzfläche Mauerstein/Mauer­mörtel aufgenommen werden können. Bei gleichzeitiger Wirkung einer Auflast/Normalkraft zur Grenzfläche erhöht sich die Scherfestigkeit um den auflastabhängigen Reibungsanteil.

Die Haftscherfestigkeit kann entweder nach DIN 18555-5 [23] oder DIN EN 1052-3 [24] geprüft werden. Vergleichsuntersuchungen zwischen diesen beiden Prüfverfahren haben gezeigt, dass die Prüfwerte der Haftscherfestigkeit nach dem EN-Verfahren etwa halb so groß wie die nach dem DIN-Verfahren sind, vgl. [7]. Der Prüffaktor resultiert aus einer unterschiedlichen Normal- und Schubspannungsverteilung in den Fugen, wie nichtlineare Finite-Elemente-Berechnungen gezeigt haben, s. [7]. Bedingt durch die Prüfkörpergeometrie kann beim EN-Versuch im Bruchzustand eine ungleichmäßige Spannungsverteilung resultieren, während die Spannungsverteilung beim DIN-Versuch dagegen deutlich gleichmäßiger ist.

In den Bildern 3 und 4 sind Haftscherfestigkeitswerte nach dem DIN-Verfahren und dem EN-Verfahren nach [7] dargestellt. Die große Bandbreite der Werte resultiert nach [7] aus z. T. sehr unterschiedlichen Prüfrandbedingungen (Prüfalter, Lagerungs-

klima etc.). Vor allem der Feuchtegehalt der Mauer­steine beim Vermauern kann aufgrund des dadurch beeinflussten Wasserabsaugens durch die Mauersteine und die dadurch veränderten Eigenschaften des Mauer­mörtels zu sehr unterschiedlichen Haftscherfestigkeitswerten führen, vgl. Abschnitt 4.

Auf Basis dieser Werte wurden die in Tabelle 5 ange­gebenen, nach Stein und Mörtel differenzierten An­haltswerte abgeleitet, s. [7]. Bei der Ableitung dieser Werte wurden lediglich diejenigen Mauerstein-Mauer­mörtel-Kombinationen berücksichtigt, für die mindes­tens 10 Serien vorlagen. Diese Anhaltswerte beziehen sich auf die Prüfung nach dem DIN-Verfahren. Dabei wurden die Versuchsergebnisse, die nach dem EN-Ver­fahren ermittelt wurden, mit dem Faktor 2 multipliziert, um jeweils auf den Wert nach dem DIN-Verfahren schließen zu können.

Die nach DIN EN 1996-1-1/NA [17] anzusetzenden Haftscherfestigkeitswerte sind derzeit in Abhängigkeit der Mauer­mörtelart, jedoch nicht differenziert nach der Mauersteinart, angegeben, s. ebenfalls Tabelle 5. Die Werte basieren auf der Haftscherfestigkeitsprü­fung nach dem DIN-Verfahren mit dem als ungünstig angesehenen Kalksand-Referenzstein. Nähere Erläuterungen zu diesen Werten können [8] entnommen werden.

Ein Vergleich der anzusetzenden Haftscherfestigkeits­werte mit den nach der Mauersteinart differenzier­ten Anhaltswerten zeigt, dass teilweise deutlich höhere Haftscherfestigkeitswerte angesetzt werden könnten. Bei der Biegezugbeanspruchung parallel zu den Lagerfugen wird zur Berechnung der Biegezugfestigkeit bei Fugenversagen ersatzweise die Haftscherfestigkeit angesetzt (s. Abschnitt 6.2.4). Zutreffender wäre stattdessen, die Torsionsscherfestigkeit zugrunde zu legen. In [7] und [9] wird darauf speziell eingegangen.

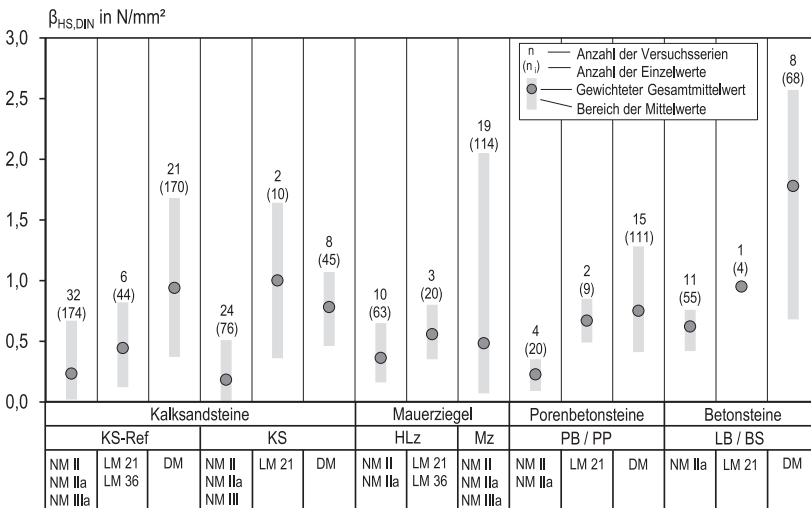


Bild 3. Bandbreite der Haftscherfestigkeitswerte nach dem DIN-Verfahren (Werte aus [7])

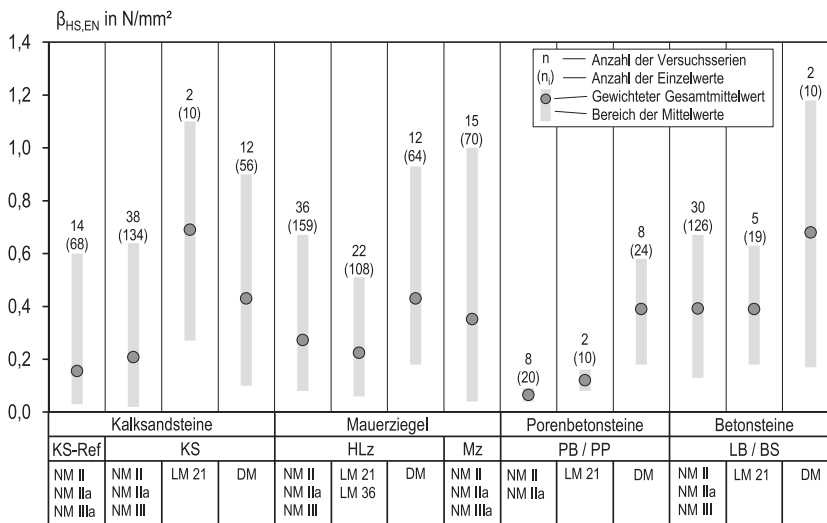


Bild 4. Bandbreite der Haftscherfestigkeitswerte nach dem EN-Verfahren (Werte aus [7])

Tabelle 5. Stein/Mörtel; Anhaltswerte für die Haftscherfestigkeit β_{HS} nach [7] und anzusetzende Haftscherfestigkeitswerte f_{vk0} (charakteristische Werte) nach DIN EN 1996-1-1/NA [17] in N/mm^2

Mauerstein	Haftscherfestigkeit β_{HS} nach [7]				Charakteristische Werte f_{vk0} nach [17]			
	Mauermörtel				Mauermörtel			
	NM IIa	NM III	LM 36	DM	NM IIa	NM III	LM 36	DM
KS-Ref	0,20	–	–	–	0,18	0,22	0,18	0,22
KS (ohne KS-Ref)	0,25	0,30	–	0,85	–			
HLz	0,45	–	0,50	–	–			
Mz	0,35	–	–	–	–			
PP	–	–	–	0,75	–			
Vbl, Hbl, Hbn	0,55	–	–	1,70	–			

5.3 Haftzug- und Biegehaftzugfestigkeit

Die Kenngröße Haftzugfestigkeit impliziert die Annahme einer zentrischen Zugbeanspruchung, die senkrecht zur Grenzfläche zwischen Mauerstein und Mauermörtel angreift. Das Vorhandensein eines Biegemoments, das nur in einem Teilbereich (Zugzone) eine Zugspannung hervorruft, erfordert die Definition einer weiteren Kenngröße, genannt Biegehaftzugfestigkeit. Diese Kennwerte sind u. a. für die Biegezugfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen von Relevanz.

Eine Norm bzw. Richtlinie für die Prüfung der zentrischen Haftzugfestigkeit existiert nicht. Die Prüfung der Biegehaftzugfestigkeit mit dem Bondwrench-Verfahren ist in DIN EN 1052-5 [25] geregelt. In Tabelle 6 sind Versuchsdaten aus [1] zusammengefasst.

6 Eigenschaftswerte von Mauerwerk

6.1 Allgemeines

Die Eigenschaftswerte von Mauerwerk können aufgrund seiner ausgeprägten Anisotropie und Heterogenität in Abhängigkeit der zahlreichen in der Praxis vorkommenden Mauerstein-Mauermörtel-Kombinationen sehr unterschiedlich sein und weichen zudem teilweise deutlich von denen anderer Baustoffe ab. Mauerwerk ist ein Baustoff, der sich in erster Linie für druckbeanspruchte Bauteile eignet. Die Beanspruchbarkeit auf Zug, Biegezug und Schub ist wesentlich geringer als die auf Druck. Die nachfolgenden Abschnitte enthalten eine Übersicht über die für die unterschiedlichen Beanspruchungen maßgebenden Festigkeits- und Verformungseigenschaften von Mauerwerk.

V Ziegel aus dem 3D-Drucker

Martin Wilfinger und Ulrich Knaack, Darmstadt, Holger Strauß, Frankfurt, und Thomas Fehlhaber, München

1 Einleitung

**(Vision + digitale Darstellung) + 3D-Drucker
= nutzbares Objekt**

In einem breiten wirtschaftlichen Feld gehört diese Formel bereits zum Alltag. Designer können innerhalb nur weniger Stunden Entwürfe in realer Größe überprüfen oder Ingenieure in der Fahrzeug- oder Flugzeugindustrie sowie Medizintechnik ihre Entwicklungen direkt in dem gewünschten Material fertigen, prüfen und anwenden. Besonders in der Entwicklung, dem Prototypenbau sowie der Zahnmedizin ist Additive Fertigung oder im Englischen Additiv Manufacturing – kurz AM – nicht mehr wegzudenken. Auch in der Realisierung von Kleinserien oder Sonderbauteilen findet diese Technik immer breitere Anwendung. Dabei lag der Fokus in der Entwicklung von 3D-Druckverfahren die letzten Jahrzehnte im Kunststoff- und Metalldruck, was mitunter auf den hohen Wettbewerbsdruck in Branchen wie dem Fahrzeug- und Flugzeugbau sowie allgemein dem Maschinenbausektor zurückzuführen ist. Die großen Konzerne sowie deren Zulieferfirmen haben die Forschung enorm vorangetrieben, um nicht den Anschluss an die Weltspitze zu verlieren.

Im Bauwesen hingegen steckt diese Technik noch in den Kinderschuhen und erfährt erst langsam die nötige Aufmerksamkeit, um sich weiter entwickeln zu können. Dies ist in erster Linie dem Maßstab bzw. der benötigten Dimension an 3D-Druckern sowie der Komplexität der zu verarbeitenden Materialien geschuldet. Weitere maßgebliche Punkte sind die Abwicklungsdauer von Bauprojekten, die nicht selten Jahrzehnte betragen kann, sowie der langwierige und komplexe Prozess, der mit den notwendigen Prüfungen, Zulassungen sowie gegebenenfalls Normungen einhergeht. Das und der nicht so stark ausgeprägte internationale Wettbewerbsdruck, welcher in anderen industriellen Branchen alltäglich ist, erklärt, weshalb Innovationen im Bauwesen grundsätzlich länger benötigen, als in vielen anderen Arbeitsfeldern üblich, um ihren Weg in die Anwendung zu finden. Mineralische Baustoffe zu drucken steht mitunter auch deshalb erst seit wenigen Jahren auf der Agenda forschender Institutionen. Erst als begonnen wurde, Beton oder vergleichbare zementöse Stoffe auf deren Verarbeitbarkeit mit einem 3D-Drucker zu untersuchen und die vielversprechenden Ergebnisse die Möglichkeiten und Potenziale of-



Bild 1. Entwurf einer 3D-gedruckten Ziegelwand (de Witte/Wilfinger)

fenlegten, begann sich die Innovationswelle auszubreiten. So ist es auch nachvollziehbar, dass der Bereich der additiven Fertigung noch seine Zeit brauchen wird, um einen festen Platz in den Köpfen der Architekten, Ingenieure und ebenso den fertigen Betrieben zu finden. Die hier im Anschluss vorgestellte 3D-Drucktechnik für Ziegel aus Tonwerkstoffen zeigt, dass die Potenziale und Möglichkeiten für den Einsatz von additiver Fertigung auch im Mauerwerksbereich gegeben sind (Bild 1). Das Strangpressverfahren hat die Denkweise für den Einsatz von Ziegeln viele Jahrzehnte lang enorm eingeschränkt und die Vorstellung, einen nicht in einer Achse durchgängigen Ziegelstein überhaupt fertigen zu können, muss erst wiedererwachen und sich neu entfalten, bevor das gesamte Potenzial und wohl auch erst neu entstehende Einsatzmöglichkeiten vollends ausgeschöpft werden können.

2 Geschichtlicher Hintergrund

Die Aufmerksamkeit, die 3D-Drucker aktuell genießen, lässt gern vergessen, dass Additive Fertigung bereits eine mehr als 30-jährige Entwicklungsgeschichte vorzuweisen hat. Bereits Mitte der 1980er-Jahre wurden Additive Verfahren in der Automobilindustrie entwickelt und eingesetzt. Bis heute wird AM auch als „rapid prototyping“ bezeichnet, da man mit dieser Technik bereits damals schneller und effizienter Proto-

Mauerwerk-Kalender 2021: Kunststoffverankerungen, Digitalisierung im Mauerwerksbau.

Herausgegeben von Detleff Schermer und Eric Brehm.

© 2021 Ernst & Sohn GmbH & Co. KG. Published 2021 by Ernst & Sohn GmbH & Co. KG.

typen fertigen konnte als per Hand. Trotzdem gilt 1986 als das Geburtsjahr des 3D-Drucks, in dem Ingenieur *Charles Hull* sein Stereolithographie (SLA)-Verfahren zum Patent anmeldete. *Hull* entwickelte dabei ein Verfahren, bei dem dünne Schichten eines UV-empfindlichen Flüssigharzes oder auch Photopolymer genannt mit einem Laser gehärtet wurden. 1987 gründet *Hull* die US-amerikanische Firma „3D Systems Corporation“ und bringt mit dem SLA-1 den ersten käuflich erwerbbaaren 3D-Drucker auf den Markt. Bis heute nimmt 3D-Systems eine tragende Rolle am stetig wachsenden globalen Markt ein, wo sich seit den 1990er-Jahren zahlreiche 3D-Druck-Techniken entwickelten, darunter die zusammen mit dem SLA-Verfahren weitverbreitetsten – das Laser-Sinter-Verfahren (SLS) und das Fused Deposition Modelling (FDM) oder auch als Fused Filament Fabrication (FFF) bezeichnet – Schmelzschichtungsverfahren. Beide genannten Verfahren waren Meilensteine in der 3D-Druck-Entwicklung. Das SLS-Verfahren ermöglichte durch Schmelzen eines Metallpulvers mithilfe eines Lasers das Drucken von Metallen fast jeglicher Art und FDM ist das 3D-Druckverfahren, das man im allgemeinen Verständnis als 3D-Druck versteht. Dabei werden unter anderem thermoplastische Kunststoffe als Filament (Materialschnur mit festgelegtem Durchmesser) in einem Extruder erst erhitzt, um im plastischen Zustand durch eine Düse auf ein Druckbett gedruckt zu werden, wo das Material dann in der gewünschten dreidimensionalen Form wieder erstarrt. Mit dem FDM-Verfahren bekam die 2005 durch Dr. *Adrian Bowyer* an der University of Bath gegründete RepRap (Replicating Rapid-prototyper) das Werkzeug an die Hand, um ihre Philosophie von einfach reproduzierbaren Konsumgütern zu verwirklichen. Basis war, dass ein Drucker die benötigten Bauteile für einen weiteren Drucker drucken können sollte, um dann wiederum Dinge des Alltags selbst herstellen zu können.

Mit dem FDM-Verfahren und dem Prinzip von Open Source, wobei jeder Mitentwickler seine Daten zur Verfügung stellt und zugleich Zugriff auf alle Daten seiner Mitstreiter hat, soll eine enorm schnelle, kostenminimierende und effektive Weiterentwicklung von Innovationen für die Allgemeinheit bereitgestellt werden. Das FDM-Verfahren ist ein verhältnismäßig günstiges, einfach zu kontrollierendes System, das mit seinen breiten Anwendungsmöglichkeiten und der Materialvielfalt, von Kunststoffen über Nahrungsmittel bis hin zu Beton oder Ziegel, scheinbar alles druckbar machen kann. Heute, nur wenige Jahre später, gehört es schon fast zum Alltag, dass man selbst oder jemand im Umfeld einen 3D-Drucker besitzt, der schnell ein Ersatzteil oder Bauteil für den Eigenbedarf drucken könnte. Von anfänglichen Ängsten Gewerbetreibender, dies könnte das Ende der Marktwirtschaft sein, konnte sich bis heute nichts bemerkbar machen, ganz im Gegenteil, etablierte Firmen wissen inzwischen die Vorteile offener Entwicklungsstrukturen zu schätzen und lassen somit innovative frei verfügbare Ideen ohne Vorbe-

halt auch in ihre eigenen Produkte einfließen, was Ressourcen schont und die Innovation trotzdem verbreitet. Dies ist wohl auch einer der Gründe, warum sich sowohl Materialien als auch die technische Ausstattung in den letzten Jahrzehnten kontinuierlich weiterentwickelt hat. Es entstand ein neuer globaler Markt, der seit den 2000er-Jahren bis heute immer noch kontinuierlich wächst und in immer kürzeren Abständen neue Entwicklungen hervorbringt.

3 Technologie Additive Herstellung

Ausgehend von der Theorie, dass jede geometrische Volumenform durch Umwandeln und Darstellung der gewünschten Geometrie in 3D-CAD und Auflösen in einzelne zweidimensionale Ebenen, die jeweils eine vordimensionierte Schichtdicke abhängig von der Extrusionsart und Düse abbilden, zerlegbar ist, könnte theoretisch in dieser Form mit einem 3D-Drucker reproduziert werden.

Die grundlegenden Schritte eines Druckprozesses, denen nahezu jeder 3D-Drucker, der einen G-Code verarbeiten kann, folgen. Ausnahmen stellen dahingehend frei programmierbare Systeme dar, welche direkt aus einem speziellen Steuerprogramm ähnlich einer CNC-Fräse mit Daten bestückt werden. Der Prozess ist in folgende Abläufe unterteilt und verhält sich in der Regel nach diesem Schema (Bild 2):

1. Erstellung eines digitalen 3D-Volumenmodells, das die Außenfläche der Geometrie definiert und ein geschlossenes Volumen darstellen muss, um für das Programm den Bereich innerhalb und außerhalb des Objekts differenzieren zu können. Ansonsten wäre es nur eine Aneinanderreihung von Flächen, welche das Programm nicht umsetzen kann.
2. Transformieren des 3D-Modells in ein für die meisten 3D-Slicing-Programme lesbares Dateiformat, welches heutzutage fast ausschließlich mit der Dateierweiterung .STL vorgegeben ist. Das STL-Format bildet mit seinen für den 3D-Druck optimierten anpassbaren Objektparametern ein gutes und einfach zu verwendendes Speichersystem.
3. Im Slicing-Programm werden die Objekte in den Druckbereich des Druckers digital eingefügt und somit speziell auf die Gegebenheiten jedes einzelnen Druckers angepasst. Dabei ist zu bedenken, dass jeder 3D-Drucker seine eigene Art und Weise haben kann, die digitalen Daten zu verarbeiten bzw. zu manipulieren. Um den entsprechenden G-Code erzeugen zu können, müssen alle Parameter des Druckers korrekt im Programm abgespeichert sein.
4. Der Druckprozess beginnt, nachdem der G-Code, der die erforderlichen Daten für den Druck beinhaltet, die von dem oben erwähnten Prozess bereitgestellt werden, in den Drucker geladen wird. Im G-Code sind auch Startabläufe sowie Endparameter definiert, weshalb der Druck direkt nach dem Laden des G-Codes dessen Anweisungen folgt.


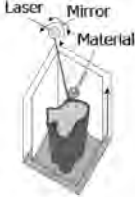

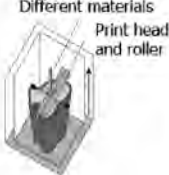

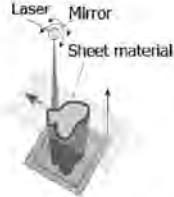

		Metals	Ceramics	Polymers	Composites
binder jetting		3DP	3DP Inkjet	3DP	3DP
directed energy deposition		DLD DMD LENS LMD LSF			
material extrusion			FDM/FFM Robocasting/DIW	FDM/FFM	FDM/FFM
material jetting				Polyjet MJM	
powder bed fusion		DMLS EBM SLM SLS	SLS	SLS SHS	
sheet lamination		LOM		LOM	LOM SDL
vat photopolymerisation				SLA DLP	

Bild 2. AM-Prozesse (de Witte)

5. Erstellung des endgültigen Modells, das in bestimmten Fällen abschließende Nachbearbeitungsphasen durchlaufen muss, um das Modell fertigzustellen und für den Endgebrauch vorzubereiten.

Es gibt mehrere Techniken zur Erzeugung komplexer dreidimensionaler Objekte. Im Folgenden werden die verschiedenen Technologien beschrieben, die im allgemeinen Sprachgebrauch als 3D-Druckverfahren bekannt sind. Jede der aufgelisteten Druckverfahren hat wie alle technischen Verfahren ihre positiven, aber auch negativen Aspekte – hier in Hinsicht auf Qualitäten, Verarbeitbarkeit, Geschwindigkeit oder Haltbarkeit. Die Prioritätensetzung hinsichtlich des gewünschten Druckobjekts ist ein wesentlicher Faktor bei der Auswahl des passenden 3D-Druckverfahrens. Additive Manufacturing bietet die Möglichkeit, aus einem breiten Portfolio an Materialien auszuwählen, dazu zählen Materialien wie Kunststoffe, Metalle, Keramiken, Beton, Holz etc.

Zum Beispiel sind Selektives Laserschmelzen (SLM), Direktes Metall-Laser-Sintern (DMLS), Selektives Laser-Sintern (SLS), Fused Deposition Modeling (FDM) und Fused Filament Fabrication (FFF) Techniken, die hinsichtlich der Grundlagen des Druckprozesses viele Ähnlichkeiten aufweisen. Auf der anderen Seite gibt es andere Techniken, die anspruchsvollere Methoden verwenden, wie z. B. die Stereolithographie (SLA), bei der die gedruckten Schichten aus flüssigem Harz ausgehärtet werden, indem das Harz UV-Strahlen ausgesetzt wird. Eine andere Technik ist das Laminated Object Manufacturing (LOM), bei dem dünne Schichten geschnitten, geformt und zusammengefügt werden, um das endgültige Modell zu bilden.

Die Hauptkategorien, die üblicherweise verwendet werden, sind im Folgenden erläutert.

3.1 Photopolymerisationsverfahren

Diese Technologie basiert auf der Verwendung eines Behälters mit flüssigem Photopolymerharz; das Modell wird im Wesentlichen durch selektive Verfestigung des flüssigen Harzes unter Verwendung von ultraviolettem (UV) Licht hergestellt.

Die beiden wichtigsten Technologien, die dieser Theorie folgen, sind die Stereolithographie (SLA) und die digitale Lichtverarbeitung (DLP).

Das Photopolymer in seinem flüssigen Zustand wird als Quelle für das Druckmaterial verwendet und nachdem es UV-Licht ausgesetzt wurde, verändert es seine Eigenschaften und verfestigt sich.

3.1.1 Stereolithographie (SLA)

Der erste Einsatz der Stereolithographie wurde 1984 von *Chuck Hull* durchgeführt.

Das Verfahren basiert auf der Verwendung von Photopolymerharz, das bei der Belichtung mit einem Laserstrahl erstarrt. Der Ablauf des Druckprozesses beginnt mit dem Auftragen des Harzes, dem Absenken

der Bauplatte um die erforderliche Schichtdicke, dann härtet das UV-Licht das Harz Schicht für Schicht aus, bis das ganze Modell gedruckt ist. Als letzter Schritt wird das restliche Harz abgelassen sowie das gedruckte Stück entfernt und nachbearbeitet.

Die gedruckten Elemente zeichnen sich durch hohe Genauigkeit und eine glatte Oberfläche aus, aber das Harz ist im Vergleich zu anderen Materialien relativ teuer, zusätzlich zu der Beschränkung der Verwendung von Fotoharzen.

3.1.2 Digitale Lichtverarbeitung (DLP)

Dieses Verfahren ist der Stereolithographie sehr ähnlich. Es wurde erstmals 1987 von *Larry Hornbeck* von Texas Instruments eingeführt; es besteht aus einem Anzeigegerät, das auf einem digitalen Mikrospiegel basiert, der auf einem Halbleiterchip angeordnet ist und sich sowohl für Projektorgeräte als auch für den 3D-Druck eignet.

Die Technologie macht sich den Mikrospiegel zunutze, der ein bestimmtes Strahlengitter auf der Grundlage der Auflösung des gedruckten Stücks projiziert. Die Intensität der projizierten Strahlen kann gesteuert werden; dementsprechend können unterschiedliche Eigenschaften für die gedruckten Elemente angewendet werden.

Die Bauplatte bewegt sich nach oben, damit die nächste gedruckte Schicht gedruckt werden kann. Die Technologie zeichnet sich durch eine ausgezeichnete Auflösung, weniger Makulatur und größerer Schnelligkeit gegenüber SLA aus.

Das Ausgangsmaterial ist ein flüssiges Kunstharz in einem transparenten Harzbehälter.

3.2 Bindemittel-Jetting, 3D-Druck (3DP)

Diese Technologie ist dem Tintenstrahldruck sehr ähnlich und wurde erstmals 1993 vom Massachusetts Institute of Technology entwickelt. Im Jahr 1995 erhielt die Z Corporation – im Besitz von 3D-Systemen – eine exklusive Lizenz.

Die Technologie umfasst zwei verschiedene Materialien – ein Material auf Pulverbasis und ein Bindemittelmaterial. Eine Walze wird verwendet, um das Pulvermaterial mit der erforderlichen Schichtdicke aufzutragen, dann wird das Bindemittelmaterial auf das Pulver aufgetragen und bildet die erforderliche Grundlage für die nächste Schicht. Die Bauplatte wird dann abgesenkt, damit sich der Prozess wiederholen kann.

Die Technologie bietet die Möglichkeit, vollfarbige Objekte zu drucken, zum Beispiel Modelle, die FEM-Ergebnisse darstellen. Meistens haben die gedruckten Modelle keine ausgezeichneten mechanischen Eigenschaften und müssen mit geschmolzenem Wachs, Cyanacrylatkleber, Epoxidharz usw. infiltriert werden, um mehr strukturelle Stabilität zu erhalten.

Es gibt eine breite Palette von Materialien, die mit dieser Technologie verwendet werden können, wie z. B.

verschiedene Kunststoffpulver, Metalle und Keramiken.

Die Hauptvorteile des Einsatzes dieser Technologie liegen in den geringeren Druckkosten und der Druckgeschwindigkeit von bis zu 20 mm pro Stunde. Die Genauigkeit der Druckstücke ist relativ gut, da die Mindestdicke ca. 0,1 mm beträgt. Die Verwendung von Stützstrukturen ist in der Regel nicht erforderlich, da das nicht verfestigte Pulver als Träger dient und wiederverwendet werden kann.

Die Technologie ist beim Drucken von Positivformen wirklich effektiv und ermöglicht eine breite Palette von Anwendungen.

3.3 Material-Extrusion

Die Materialextrusion gilt als eine der meistgenutzten Techniken für Additive Manufacturing für persönliche 3D-Drucker.

Das Verfahren basiert auf der Verwendung beheizter Extruder, denen das Ausgangsmaterial zugeführt wird, um das Modell in Form eines Fadens oder einer Tintenzusammensetzung zu drucken. Die Extruder bewegen sich in x- und y-Richtung und die Bauplatte bewegt sich in z-Richtung.

Es gibt eine große Vielfalt von Filament- und Tintenzusammensetzungen, die sich durch unterschiedliche Eigenschaften auszeichnen, um die Eigenschaften des Endprodukts zu verbessern.

3.3.1 FDM (Fused Deposition Modeling), FFF (Fused Filament Fabrication)

FDM (Fused Deposition Modeling) wurde von *Scott Crump*, dem Gründer von *Stratasys Ltd.* in den 1980er-Jahren erfunden. Nachdem das Patent des Systems ausgelaufen war, übernahmen andere Unternehmen die gleiche Technologie. Eine von ihnen war *Makerbot*, die dem Verfahren den Namen FFF (Fused Filament Fabrication) gab.

Mit dieser Technologie können sowohl funktionelle Prototypen als auch Konzeptmodelle gedruckt werden. Das gedruckte Modell kann in Schalen – die äußere Schicht des Modells – und in Füllungen – das innere Muster – zerlegt werden. Die Mindestdicke der Schalen variiert je nach dem verwendeten Material, da sie die Stabilität der Modelle gewährleistet.

Die Komplexität der gedruckten Modelle ist bis zu einem gewissen Grad begrenzt und um das Beste aus der Technologie herauszuholen, werden üblicherweise Druckträger verwendet, die die Möglichkeit zum Drucken komplexerer Elemente erweitern. Andererseits kann das Drucken der Träger die Glätte der Modelloberfläche beeinträchtigen, da die Träger abgebrochen werden müssen.

Eine Vielzahl von Kunststoff-Filamenten mit unterschiedlichen Eigenschaften ist ebenso erhältlich wie Kohlefaser-, Keramik- und Holzfilamente.

3.3.2 Robocasting oder Direktes Schreiben mit Tinte (DIW)

Das Prinzip ähnelt dem des Fused Deposition Modeling (FDM), unterscheidet sich jedoch in der Form des verwendeten Materials, da es sich im Wesentlichen um einen Keramikslicker handelt, der als Tinte bezeichnet wird und durch eine Düse extrudiert wird, um die gedruckten Schichten zu bilden.

3.4 Pulverbett-Schmelzung

Die Pulverbettsschmelzung beinhaltet das selektive Schmelzen und Wiederverfestigen von Pulvern. Bei der Verwendung von Pulvern auf Kunststoffbasis müssen keine Trägermaterialien hinzugefügt werden, da das Pulver als Trägermaterial für die gedruckten Schichten dient. Metallpulver hingegen benötigen Träger, um Verformungen zu vermeiden.

Eine Pulverschicht wird abgeschieden und ein Laser- oder Elektronenstrahl verschmilzt die Schichten auf der Grundlage der Konturdaten, die das endgültige Modell bilden.

Direktes Metall-Lasersintern (DMLS), Elektronenstrahlschmelzen (EBM), Selektives Wärmesintern (SHS), Selektives Lasersintern (SLS) und Selektives Laserschmelzen (SLM) sind die wichtigsten gebräuchlichen Verfahren für Pulverbettsschmelzprozesse.

3.4.1 Selektives Lasersintern (SLS)

Diese Technologie wurde Mitte der 1980er-Jahre von *Dr. Carl Deckard* und *Dr. Joseph Beaman* von der *University of Texas* entwickelt.

Die Maschinen bestehen aus drei Hauptkomponenten: einer Wärmequelle (Laser) zum Schmelzen des Materials, einem Mechanismus zur Steuerung des Erwärmungsprozesses und einem weiteren Mechanismus zur Steuerung des Hinzufügens neuer Schichten. Das zum Drucken verwendete Pulver kann ein Bindemittel enthalten oder das Pulvermaterial selbst ist in der Lage, sich durch den Sinterprozess zu binden.

Die Technologie bietet eine hohe Druckgeschwindigkeit, aber folglich bleibt der Kern des verarbeiteten Pulvers während des gesamten Prozesses im festen Zustand, was von Nachteil ist, da das gedruckte Modell nicht homogen ist und die Wasserdichtigkeit nicht immer erreicht werden kann.

3.4.2 Selektives Laserschmelzen (SLM)

Das Selective Laser Melting (SLM) begann 1995 als deutsches Forschungsprojekt am *Fraunhofer Institut*. Die Technologie folgt dem gleichen Prinzip wie das Selektive Lasersintern mit dem Unterschied, dass das Material durch die Laserquelle vollständig aufgeschmolzen wird. Daraus ergibt sich der große Vorteil, dass die gedruckten Teile homogen sind.

Als Druckmaterial können verschiedenste Legierungen verwendet werden. Der Druck feiner Strukturen ist

möglich, jedoch müssen Stützstrukturen berücksichtigt werden, da die inhärent hohen Temperaturen einen Verzug verursachen können.

3.4.3 Selektives Wärmesintern (SHS)

Selektives Wärmesintern ist ein 3D-Druckverfahren, das in vereinfachter Form den gleichen Regeln folgt wie das Selektive Lasersintern.

Es wird ein stärker bindendes Material verwendet, das entweder durch Schmelzen mit dem Druckpulver vermischt oder zur Umhüllung der Pulverpartikel verwendet wird, um das endgültige Material zu bilden.

Der Hauptvorteil dieses Verfahrens besteht darin, dass die Heizquelle einfacher ist als bei den anderen Technologien, z. B. ein einfacher elektrischer Lichtbogen.

3.4.4 Elektronenstrahlschmelzen (EBM)

Die EBM-Technologie funktioniert auf die gleiche Weise wie SLS und SLM, aber die verwendete Heizquelle ist ein Hochleistungselektronenstrahl, der durch elektromagnetische Spulen gesteuert wird; die mechanischen Eigenschaften der Materialien bleiben dadurch unbeeinflusst.

3.5 Ebenen-Laminierung

Blattlaminierung wird als Laminated Object Manufacturing (LOM) oder Selective Deposition Lamination (SDL) bezeichnet.

Hierbei handelt es sich um ein Verfahren, bei dem vorgefertigte Folien oder Bögen als Druckmaterial verwendet werden und mit einem Messer oder Laserschneider in die gewünschte Form gebracht werden. Die Schichten werden dann im Falle von Papier und Kunststoff mit Klebstoff und im Falle von Metallen mit Ultraschall verschweißt.

3.5.1 Herstellung laminiertes Objekte (LOM)

Das erste LOM-System wurde im Jahr 2000 von Helixsys, Inc. entwickelt. Die Idee war, Materialien wie Papier, Kunststoff oder Metall in Blechform zu verwenden. Rollenklängen führen die Bleche der Bauplatte zu und dann schneidet eine Schneidklinge die gewünschte Form aus. Der Vorgang wird für jede weitere Lage wiederholt, bis das Modell vollständig ist.

Wenn Papier oder Kunststoff als Druckmaterial verwendet wird, wird es mit einem Klebstoff verklebt oder durch Hitze und Druck laminiert. Wenn Metallbleche verwendet werden, werden die Schichten durch Ultraschallschweißen miteinander verbunden.

Diese Technologie gilt als kostengünstige Alternative und hat ihre Grenzen, da die hergestellten Modelle nicht sehr genau sind und komplexe Geometrien nicht erreicht werden können.

3.5.2 Selektives Auftragslaminiertes (SDL)

Dieses Verfahren wurde von Mcor Technologies entwickelt. Es verwendet ausschließlich Papier als Druckmaterial – gewöhnliche A4-Blätter und Papier im Letter-Format. Im Gegensatz zu LOM fügt es das Klebematerial mit unterschiedlicher Dichte hinzu, um ein leichtes Entfernen des umgebenden Materials des gedruckten Modells zu ermöglichen.

Die Bauplatte bewegt sich wie andere 3D-Drucktechniken nach unten, aber die Bewegung wird durch eine Aufwärtsbewegung unterbrochen, um die neue Schicht zu pressen und eine vollständige Verbindung zu gewährleisten.

Es gelten die gleichen Einschränkungen wie bei LOM, d. h., komplexe Geometrien und hohle Objekte sind nicht möglich und die Genauigkeit ist im Vergleich zu anderen 3D-Drucktechniken eher gering.

3.6 Material-Jetting

Material-Jetting ist dem normalen Tintenstrahldruck ähnlich und funktioniert durch das Ausstoßen von Materialtropfen, um ein 3D-Objekt zu erzeugen. Bei der Tintenstrahltechnologie werden Druckköpfe verwendet, um die flüssigen Photopolymere oder das Wachs auf die Bauplattform zu spritzen.

Die Technologie des Materialspritzens wurde mit verschiedenen Namen wie MultiJet Modeling (MJM) oder Polyjet bezeichnet. Nachdem das Material auf die Bauplatte gespritzt wurde, wird es durch UV-Strahlung gehärtet.

Das Drucken von Trägermaterial und Überhängen ist möglich; das fertige Modell muss in eine Wascheinheit gelegt werden, um das Trägermaterial aufzulösen, das typischerweise andere Eigenschaften hat als das Material, aus dem das Modell besteht.

3.7 Direct Energy Deposition oder Direkte Energieabscheidung

Direkte Energieabscheidung ist ein komplexes Druckverfahren, das viele Begriffe umfasst: Elektronenstrahl-additive Fertigung (EBAM), lasergestützte Netzformung (LENS), direkte Metallabscheidung (DMD) und Laser-Metallabscheidung (LMD).

Das Verfahren basiert hauptsächlich auf dem Schmelzen von Metallen in Pulver- oder Drahtform mit einem Elektronenstrahl, einem Laser oder Plasmabogen auf eine bestimmte Oberfläche. Gewöhnlich wird dieses Verfahren zur Reparatur bestehender teurer Teile verwendet, was bedeutet, dass das gedruckte Teil zu einem bestehenden Element hinzugefügt wird.

Das Zielteil wird auf einer 4- oder 5-achsigen Bauplatte befestigt und das Druckmaterial wird aus 1, 2, 3 oder 4 Düsen zugeführt, je nach Art der verwendeten Maschine.

Der Prozess findet in einer Vakuumumgebung statt und ist sehr präzise, da die Abscheidung einer Schicht

des verwendeten Materials zwischen 0,1 mm und einigen Millimetern variiert.

Wenn ein Vorschubdraht als Druckmaterial verwendet wird, ist eine Schutzgasabschirmung eingebaut.

4 Additive Herstellung von Ziegeln/ Ziegelbauteilen in der aktuellen Forschung und Entwicklung

Neben den verschiedenen Entwicklungen im Bauwesen im Bereich der Kunststoffe, der Metalle und insbesondere im Bereich der additiven Herstellung von Betonbauteilen ist nur eine relativ kleine Gruppe Forscher aktiv, Lehm zu drucken und diesen anschließend zu brennen, um daraus Ziegel oder Ziegelbauteile zu erzeugen.

Ein erstes Projekt mit additiv hergestellten Ziegelkomponenten entstand in einer Gruppe rund um den Forscher *Christian J. Lange* an der University of Hong Kong (HKU) zusammen mit dem Bauunternehmen Sino Group. Ein Pavillon, aufbauend auf einer Spirale, wurde aus ca. 2000 individuell gedruckten Ziegeln erzeugt und auf einer Unterkonstruktion positioniert. Der Pavillon wurde im North Atrium der Olympian City in Kowloon/HK ausgestellt und anschließend demontiert und eingelagert. Parallel zu diesem Projekt beschäftigte sich die Gruppe mit alternativen Geometrien und Gestaltungsoptionen der Ziegelfläche (Bilder 3 und 4).



Bild 3. Hong Kong University, Ziegel-Wandverkleidung



Bild 4. Hong Kong University, Ziegel-Wandverkleidung, Detail

Parallel hat der niederländische Künstler *Erno Langenberg* begonnen, einen eigenen 3D-Drucker für Keramik zu entwickeln und mit diesem diverse Kunstobjekte und Gebrauchsgüter gedruckt. Ein besonderes Interesse liegt in der Studie ELstudio im gestalterischen Potenzial der völligen Formfreiheit der dreidimensionalen Objekte sowie den möglichen Texturen (Bilder 5 und 6).



Bild 5. Ziegel-Kunstprojekt von Erno Langenberg