

Detleff Schermer, Eric Brehm (Hrsg.)

Mauerwerk-Kalender 2022

**Schwerpunkte: Fassadengestaltung,
Bauphysik, Innovationen**

- **aktuelle Übersicht über die allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen und Bauartgenehmigungen**
- **Autoren garantieren Praxisnähe: Normenmacher, beratende Ingenieure, Feuerwehr und Bauaufsicht**
- **Arbeitsgrundlage und ein verlässliches, aktuelles Nachschlagewerk für die Planung in Neubau und Bestand**

Das Nachschlagewerk zum Mauerwerksbau im 47. Jahrgang: Schwerpunkte sind die bauphysikalische Analyse von Mauerwerksgebäuden sowie Themen der Gestaltung. Weitere Beiträge behandeln Aspekte der Nachhaltigkeit sowie der Bemessung und der Nachrechnung von Bestandsbauwerken.

BESTELLEN

+49 (0) 30 470 31-236

marketing@ernst-und-sohn.de

www.ernst-und-sohn.de/3356



2 / 2022 · ca. 654 Seiten ·
ca. 581 Abbildungen · ca. 140 Tabellen

Hardcover

ISBN 978-3-433-03356-2 ca. € 159*

Fortsetzungspreis ca. € 139*

eBundle (Print + ePDF)

ISBN 978-3-433-03345-6 ca. € 194*

Fortsetzungspreis eBundle ca. € 169*

Bereits vorbestellbar.

ÜBER DAS BUCH

In seinem 47. Jahrgang begleitet der Mauerwerk-Kalender die erfolgreiche Bauart als verlässliches Nachschlagewerk mit den Eigenschaftswerten von Mauersteinen, Mauermörtel, 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. Mauerwerk bietet hervorragende Möglichkeiten zur Gestaltung, was ausführlich in einem Beitrag zur Fassadengestaltung bei Sichtmauerwerk herausgearbeitet wird.

Weitere Beiträge beschäftigen sich mit bauphysikalischen Themen, wie der Energieeffizienz von Gebäuden nach GEG, dem aktuellen Stand der Planung von schallschutzgerechten Konstruktionen in Mauerwerk auf Basis von DIN 4109 und dem Erschütterungsschutz.

Auch die Untersuchung und der Umgang mit Bestandsbauwerken wird behandelt in Beiträgen zur Ermittlung der Druckfestigkeit an bestehendem Mauerwerk und der Nachrechnung von Gewölbebrücken nach der Nachrechnungsrichtlinie für Straßenbrücken.

Auch Innovationen im Mauerwerksbau werden in Beiträgen behandelt, die sich mit der digitalen Transformation, großformatigen und bewehrten Porenbeton-elementen sowie generellen Innovation im Ziegelmauerwerksbau befassen.

BESTELLUNG

Anzahl	ISBN /	Titel	Preis
	978-3-433-03356-2	Mauerwerk-Kalender 2022	ca. € 159*
		Fortsetzungspreis	ca. € 139*
	978-3-433-03345-3	Mauerwerk-Kalender 2022 (eBundle)	ca. € 194*
		Fortsetzungspreis (eBundle)	ca. € 169*

☐ 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

Firma		UST-ID Nr.	
Name, Vorname		Telefon	Fax
Straße, Nr.			
PLZ/Ort/Land		E-Mail	
Datum/Unterschrift			

www.ernst-und-sohn.de/3356

2022

MAUERWERK KALENDER

Fassadengestaltung
Bauphysik
Innovationen

Herausgegeben von
Detteff Schermer, Regensburg
Eric Brehm, Karlsruhe

47. Jahrgang

Vorwort

Liebe Leserinnen und Leser,

mit der neuen Ausgabe des *Mauerwerk-Kalender 2022* werden die Schwerpunkte auf Fassadengestaltung, Bauphysik und Innovationen gelegt.

In Teil A findet der Nutzer die Basis für das tägliche Arbeiten in der Praxis: Im ersten Beitrag von Michael Raupach, Dorothea Saenger und Bernd Winkels wird auf die *Eigenschaften und Eigenschaftswerte von Mauersteinen, Mauermörtel und Mauerwerk* eingegangen und der aktuelle Stand des Wissens für die in Deutschland üblichen Produkte und Produktkombinationen zusammengefasst. Die durch allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen bzw. allgemeine Bauartgenehmigungen geregelten Produkte stellt anschließend Ludwig Wingerter vor. Für vorhabenbezogene Genehmigungen und Zustimmungen im Einzelfall werden die Besonderheiten und formalen Vorgaben von Hans-Alexander Biegholdt erläutert. Abgeschlossen wird das Kapitel mit einem Beitrag von Benjamin Purkert über die im Mauerwerksbau bei der Planung und Ausführung insgesamt geltenden Normen und Vorschriften.

In Abschnitt B zu Gestaltung und Konstruktion zeigt Koen Mulder, welche Möglichkeiten der Fassadengestaltung mit Sichtmauerwerk geboten werden. Er gibt eine Vertiefung in traditionelle Mauerwerksverbände und beschreibt die Systematik von Verbandsmustern. Die Besonderheiten in Schicht- und Verlegemustern, verschiedene Steinformate und Formsteine werden in zahlreichen Zeichnungen und Bildern vorgestellt. Die Aspekte zur baulichen Durchbildung, der Ausführung und den wichtigen Aspekten der Nachhaltigkeit werden anschließend in den beiden Beiträgen von Juliane Nisse und David Ostendorf behandelt. Eine Besonderheit der Bauteilbemessung stellt der Nachweis der Querkrafttragfähigkeit von Balken dar. Diesem Thema widmen sich die Autoren Johann Marx und Eberhard Gunkler mit der *Untersuchung der Querkrafttragfähigkeit von schlaff bewehrten und vorgespannten Mauerwerksbalken mittels Schubspannungsfeldmodellen*.

Konstruktive Details und das Themenfeld der Bauphysik werden in Abschnitt C behandelt. Im ersten Beitrag setzt sich Michael Gierga mit den Neuregelungen in den Vorgaben des Gebäudeenergiegesetzes (GEG) für den Wohngebäudebereich auseinander. Schallschutz und Erschütterungsschutz werden in den zwei Beiträgen von Michael Flieger, Markus Hofmann und Oliver Kornadt sowie von Andreas Gömmel und Andreas Lackner ausführlich dargestellt. Immer wichtiger für Bauherren wird der Aspekt des Einbruchschutzes. Für die Befestigung von Fenstern und Türen in Mauerwerk werden von Jürgen Küenzlen und Eckehard Scheller die aktuellen Lösungen zusammengefasst.

Nicht nur bei Neubauten müssen sich die am Bau Beteiligten regelmäßig neuen und veränderten Randbedingungen stellen – auch an den Bestand können sich durch Umnutzungen oder Umbauten neue Anforderungen ergeben. Daher ist es wichtig, diesen zutreffend beurteilen zu können. Ein erster Beitrag behandelt die Berechnung und Bemessung bestehender Gewölbebrücken mit der aktuellen Nachrechnungsrichtlinie für Straßenbrücken von 2021. Hier konnte das Autorenteam Frank Purtak, Gero Marzahn und Matthias Müller auf seine umfangreiche Erfahrung zurückgreifen und anhand von fünf Beispielen die Auswirkungen der Nachrechnungsrichtlinie auf Mauerwerksbrücken erläutern. Ergänzend geben die Autoren Johanna Monka, Gregor Schacht und Steffen Marx einen Überblick über Eisenbahngewölbebrücken in Sachsen. Insbesondere für die Bewertung der statischen Tragfähigkeit von Bestandsmauerwerk ist die Kenntnis der mechanischen Eigenschaften zwingend notwendig. Entscheidend ist in der Mehrzahl der Fälle die Druckfestigkeit. Oft zeigt sich in der Praxis, dass eine zutreffende Aussage aufgrund fehlender Bestandsunterlagen schwierig ist. Auf diese Fragestellung geht der Beitrag von Birger Gigla vertieft ein.

Innovationen im Mauerwerksbau sind ein entscheidender Hebel, die Bauweise den neuen Anforderungen anzupassen und eine ihrer wirtschaftlichen Bedeutung angemessene Vorreiterrolle anzunehmen. Dieses betrifft nicht nur Anforderungen in Bezug auf die Bauphysik und die Nachhaltigkeit, sondern insbesondere auch das Thema des kostengünstigen und rationalen Bauens. Dass hier enorm viel Potenzial liegt, wird in dem Beitrag des Autorenteam Andreas Jäger, Mario Kubista, Meysam Taghavi, Stefan Puskas, Karina Breitwieser, Stephan Fasching, Clemens Kuhlemann und Gülnaz Atila deutlich. Hierbei wird im Rahmen der vier Innovationsfelder Material und Produktoptimierung, Bauprozess und Automatisierung, Produktionsprozess und Technologie sowie digitale Kooperation mit Kunden anhand von konkreten Anwendungsbeispielen die aktuelle und zukünftige Entwicklung gezeigt. Dass die Weiterentwicklung des großformatigen Bauens noch lange nicht abgeschlossen ist, wird in dem Beitrag *Mauerwerk in XXL – Großformatiges Bauen mit bewehrten Porenbetonelementen, vertikal und horizontal* von Markus Heße, Mario Schmitz und Andreas Radischewski deutlich. Die oft beschworene Digitalisierung im Planungs- und Bauprozess hat auch im Mauerwerksbau Fahrt aufgenommen – dieses zeigen die Autoren Mathias Obergrießer und Michael A. Kraus in ihrem Beitrag *Digitale Transformation im Bauwesen – von der Theorie zur Anwendung*. Abgeschlossen wird

der heurige Kalender wie üblich mit einer Übersicht über laufende und abgeschlossene Forschungsvorhaben von Jonathan Schmalz und Ludwig Wingerter. Wie man aus der Zusammenstellung der Beiträge oben erkennt, bietet der *Mauerwerk-Kalender 2022* eine breite Themenvielfalt mit den Schwerpunkten Fassadengestaltung, Bauphysik und Innovationen. Es werden die neuen Entwicklungen und Trends gezeigt – gleichzeitig

soll das Werk auch aktuelles Nachschlagwerk und Arbeitsgrundlage für die tägliche Praxis sein.

Herzliche Grüße und viel Vergnügen bei der Lektüre.

Bensheim und München, Prof. Dr.-Ing. Eric Brehm
im Januar 2022 Prof. Dr.-Ing. Detleff Schermer

Inhaltsverzeichnis

A Normen und Baustoffe

A 1 Eigenschaften und Eigenschaftswerte von Mauersteinen, Mauermörtel und Mauerwerk 1

Michael Raupach, Dorothea Saenger, Bernd Winkels

1	Einleitung	3	5	Verbund zwischen Mauerstein und Mauermörtel	8
2	Mauersteine	3	5.1	Allgemeines	8
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	Mauerwerk	10
2.1.3	Zug- und Spaltzugfestigkeit	3	6.1	Allgemeines	10
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	4	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	13
3	Mauermörtel	6	6.2.5	Schubfestigkeit	14
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	14
3.2	Verformungseigenschaften	6	7	Literatur	16
3.2.1	Längsdehnungsmodul	6	7.1	Monografien, Zeitschriftenartikel	16
3.2.2	Querdehnungsmodul	6	7.2	Normen	16
4	Mauermörtel im Mauerwerk	6			

A 2 Neuentwicklungen im Mauerwerksbau mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung (abZ) bzw. mit allgemeiner Bauartgenehmigung (aBG) 17

Ludwig Wingerter

1	Allgemeines	19	7	Trockenmauerwerk	38
1.1	Gesonderte Regelungen zu Schlitten	20	8	Mauerwerk mit PU-Kleber	38
1.1.1	Vertikalschlitz	20	9	Bewehrtes Mauerwerk	38
1.1.2	Horizontalschlitz	20	10	Ergänzungsbauteile	40
2	Mauerwerk mit Normal- oder Leichtmauermörtel	20	11	Fertigteilbauteile	41
3	Mauerwerk mit Dünnbettmörtel	25	12	Betonelemente	43
4	Mauerwerk mit Mittelbettmörtel	35	13	Literatur	45
5	Vorgefertigte Wandtafeln	35	14	Bildnachweis	46
6	Schalungsstein-Bauarten	36			

A 3	Mauerwerksbau mit vorhabenbezogener Bauartgenehmigung bzw. mit Zustimmung im Einzelfall	47
	Hans-Alexander Biegholdt	
1	Einführung	49
2	Grundlagen	49
2.1	Bauaufsichtliche Regelungen	49
2.2	Geltungsbereich der Zustimmung im Einzelfall/vorhabenbezogenen Bauartgenehmigung	49
2.3	Abgrenzung zum allgemeinen bauaufsichtlichen Prüfzeugnis nach § 19 MBO	49
2.4	Zuständigkeiten bei der Erteilung von Zustimmungen im Einzelfall/vorhabenbezogenen Bauartgenehmigungen in den Ländern	50
3	Anforderungen an Bauprodukte	50
3.1	Allgemeines	50
3.1.1	CE-gekennzeichnete Bauprodukte	50
3.1.2	Nationaler Verwendbarkeitsnachweis	50
3.2	Produkte des Mauerwerksbaus	50
4	Antragsverfahren zur Erlangung einer Zustimmung im Einzelfall/vorhabenbezogenen Bauartgenehmigung	52
4.1	Anlass zur Erlangung einer Zustimmung im Einzelfall nach § 20 MBO	52
4.2	Erfordernis einer vorhabenbezogenen Bauartgenehmigung	53
4.3	Antragsteller	54
5	Zustimmung im Einzelfall/vorhabenbezogene Bauartgenehmigung für die Ver- und Anwendung von Bauprodukten des Mauerwerksbaus in Sachsen	54
5.1	Landesbezogene Umsetzung der Musterregelungen	54
5.2	Allgemeines	54
5.3	Abgrenzung zum Genehmigungsverfahren und zur allgemeinen Bewährung	54
5.4	Antragstellung	54
5.5	Eigenschaften des Bauprodukts	54
5.6	Übereinstimmungsnachweis	56
5.7	Regelungen zur Bauart	56
5.8	Sonderfall Lehmbauweise	56
5.9	Gebühren	56
5.10	Bearbeitungszeiten	56
6	Literatur	57
A 4	Geltende Technische Regeln für den Mauerwerksbau (Deutsche, Europäische und Internationale Normen) (Stand 31.05.2021)	59
	Benjamin Purkert	
1	Vorbemerkung	61
2	Regelwerk	62
3	Literatur	77
B	Gestaltung und Konstruktion (Neubau)	
B 1	Untersuchung der Querkrafttragfähigkeit von schlaff bewehrten und vorgespannten Mauerwerkbalken mittels Schubspannungsfeldmodellen	79
	Johann Jakob Marx, Erhard Gunkler	
1	Einleitung	81
2	Grundlagen und „Stand der Forschung“ von Mauerwerkbalken	81
2.1	Unterscheidungsmerkmale	81
2.2	Bewehrungsanordnung und Konstruktionsarten	81
2.2.1	Flachsturz	82
2.2.2	Fertigteilsturz	82
2.2.3	Vorgespannte Mauerwerkbalken	84
2.2.4	Balkenkonstruktionen für Vormauerwerk und/oder Verblendmauerwerk	84
2.3	Abgrenzung von Mauerwerkbalken gegenüber wandartigen Trägern aus Mauerwerk	85
2.4	Ergebnisse bisheriger experimenteller Forschungsarbeiten	86
2.5	Inhalte bauaufsichtlicher Regelwerke	86
2.5.1	DIN EN 1996-1-1:2013	87
2.5.2	DIN 1053-3:1990	88
2.5.3	E DIN 1053-3:2008	88
2.5.4	DIN EN 12602:2016 – Porenbeton	88
2.5.5	DIN EN 1520:2011 – Leichtbeton	88
2.5.6	DIN 1045-100:2017 – Ziegeldecken	88
2.5.7	Flachsturzrichtlinie (Entwurf 2005) – Flachsturz	89
2.5.8	Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (abZ) – Fertigteilsturz	89
2.5.9	Zusammenfassung der in Regelwerken benannten Tragwiderstände	90

2.6	Kritik an aktueller Schubbemessung und verwendeter Werkstoffkenngrößen	91	5	Experimentelle Untersuchungen	103
2.6.1	Schubfestigkeit (f_{vd})	91	5.1	Untersuchungsgegenstand	103
2.6.2	Querkrafttragfähigkeit (V_{Rdl})	91	5.2	Ergebnisse	104
2.7	Ausblick auf den Berechnungsansatz	92	6	FE-Untersuchung	106
2.8	Schlussfolgerungen	93	6.1	Ergänzende Parameterstudie	106
3	Werkstoffbeschreibende Ausgangsgrößen von Mauerwerk	94	6.2	Ergebnisse	106
3.1	Einaxiale Druckfestigkeit	94	7	Algorithmen zur Querkraftberechnung von Mauerwerkbalken	107
3.1.1	Druckfestigkeit senkrecht zur Lagerfuge	94	7.1	Herleitung und Darstellung der SMCFT	107
3.1.2	Druckfestigkeit parallel zur Lagerfuge	94	7.1.1	Modified Compression Field Theory	107
3.2	Zweiachiales Trag- und Verformungsverhalten	95	7.1.2	Simplified Modified Compression Field Theory	109
3.2.1	Mann/Müller	95	7.2	Modellvorschlag und Berechnungsalgorithmen	111
3.2.2	Ganz/Thürlimann/Mojilović	96	7.3	Vergleichsrechnungen auf Basis experimenteller und numerischer Untersuchungen	115
4	Analytische Grundlagen zu Spannungsfeldern für bewehrtes Mauerwerk	99	7.4	Vergleich mit bestehenden Regelwerken	118
4.1	Spannungsfelder	99	7.5	Bewertung des Berechnungsvorschlags	120
4.1.1	Elastische, gerissene Spannungsfelder	100	8	Zusammenfassung	121
4.1.2	Starr-plastische Spannungsfelder (klassische Spannungsfelder)	100	9	Literatur	122
4.1.3	Erweiterte starr-plastische Spannungsfelder (verallgemeinerte Spannungsfelder)	102			
4.1.4	Elastisch-plastische Spannungsfelder (erweiterte Spannungsfelder)	103			
B 2	Die Beschwingte Fläche	127			
	Koen Mulder				
1	Mit zusammengekniffenen Augen	129	7.2	Pfeiler – und Öffnungsbreiten bei einem Viertelstein in der Binderschicht	148
1.1	Die Brille	129	7.3	Flacher Abschluss	148
1.2	Das Auge	129	8	Flämischer Verband	151
2	Primäre und sekundäre Muster	133	9	Blockverband	157
2.1	Primäres Schichtungsmuster und sekundäres Motiv	133	9.1	Variante des Kettenverbands oder Verband mit Kettenlinien?	157
2.2	Begegnung	135	9.2	Linien zeichnen im Blockverband	158
3	Um die Ecke?	135	9.3	Eine breite Kettenlinie in der Mitte	159
3.1	Vom Block- zum Kreuzverband	135	9.4	Dearne's bond	159
3.2	England	136	10	„Einfacher“ wilder Verband	165
3.3	Andere Randabschlüsse	136	10.1	Freiheit	166
4	Der Rand	137	10.2	Historisieren	166
5	(Nach-)Fugen – Farbe, Schatten und Maß	138	10.3	Perfekte Willkür	166
5.1	Fugenmaterial	138	10.4	Systemfehler ...	166
5.2	Architekten	140	10.5	Pseudo	169
5.3	Fugenbreite	140	10.6	Transformation von Ordnung zu Chaos	169
5.4	Fugenfarbe	140	10.7	Relief	169
5.5	Schatten in der Fuge	140	10.8	Wirkung	169
5.6	Fugenmaß	142	11	Halbsteinverband	170
6	Bedeutung oder Zeichen	142	12	Exoskelett, Jacke, Kleid oder Maßanzug	172
7	Kreuzverband	145	12.1	Blattgold?	172
7.1	Pfeiler – und Öffnungsbreiten bei einem Dreiviertelstein in der Läuerschicht	145			

12.2	Maßanzug	173	15	Formel	185
12.3	Die Dinge um ihrer selbst Willen	173	15.1	Symmetrie	185
12.4	Das Gebäude – Objekt oder Stadttinterieur?	174	15.2	Musterlinien im Rand	185
12.5	Jazz	175	15.3	Wiederholmaß	187
13	Proportionslehre oder Maßsystem	175	15.4	Der Verband als Schraffurmuster	190
13.1	Menschliche Vorlieben	175	16	Kombinationsverbände – das kleinste gemeinsame Vielfache	192
13.2	Scharf stellen	180	16.1	Varianten mit derselben Steinabfolge	198
13.3	In der Oberfläche haust ein Maßanzug	180	16.2	Die Richtung der Linienführung	200
14	Ausfüllen oder Entwerfen	183	16.3	Mit dem Motiv beginnen	204
14.1	Zwei Methoden	183	16.4	Schichtmuster, Meta-Motiv, Relief und Schatten	209
14.2	De Pijp	183	16.5	Das ehrliche Flächenmuster der Schichtung	211
14.3	Arbeiten ohne Kniffe	184	16.6	Verblenden oder Finish?	211
14.4	Bessere Werkzeuge	185	16.7	An der Schnur entlang	214

B 3 Zweischalig und nachhaltig Bauen mit Verblendmauerwerk 215 Juliane Nisse

1	Allgemeines	217	6.3	Sozio-Kulturelles	231
2	Baustoffe und Herstellungsverfahren	217	6.3.1	Thermischer Komfort	232
3	Konstruktion	218	6.3.2	Wohngesundheit	232
4	Erdbeben	222	6.3.3	Gestalterische Vielfalt und Kunst am Bau	232
5	Bauphysik	223	6.4	Technik	232
5.1	Wärmeschutz	223	6.4.1	Schallschutz	232
5.2	Feuchteschutz	224	6.4.2	Wärme- und Feuchteschutz	233
5.3	Schallschutz	225	6.4.3	Recycling	233
5.4	Brandschutz	226	6.4.4	Förderung von Nachhaltigkeit im Gebäudebereich	234
6	Nachhaltigkeitsaspekte	226	7	Zusammenfassung und Ausblick	235
6.1	Ökologie	227	8	Literatur	235
6.2	Ökonomie	229			

B 4 Ausführung von Mauerwerk 237 David Ostendorf

1	Allgemeines	239	3.1	Allgemeines	243
1.1	Normen und Regelwerke	239	3.2	Sicht- und Verblendmauerwerk	243
1.2	Bauordnungsrechtliche Einordnung	240	3.2.1	Feuchteabdichtung	244
1.3	Eurocode-Überarbeitung	241	3.2.1.1	Fußpunktausbildung	244
1.4	Vertragsrechtliche Grundsätze	241	3.2.1.2	Überdeckung von Öffnungen	245
2	Auswahl der Baustoffe	241	3.2.2	Hinweise zur Ausschreibung von Sicht- und Verblendmauerwerk	245
2.1	Allgemeines	241	3.2.3	Innenwände	245
2.2	Mauersteine	242	3.2.3.1	Allgemeines	245
2.3	Natürliche Steine	242	3.2.3.2	Nichttragende innere Trennwände	245
2.4	Mauermörtel	242	3.3	Feuchtesperrschicht (Querschnittsabdichtung)	245
2.5	Ergänzungsbauteile	243	3.3.1	Allgemeines	245
2.6	Hinweis zur Ausschreibung bei Baustoffen	243	3.3.2	Untersuchung zum Reibungsverhalten von Abdichtungen	246
2.6.1	Allgemeines	243	3.3.3	Änderungen bei den Materialien	246
2.6.2	Angaben zur Ausführung	243	3.3.4	Hinweis zur Ausschreibung der Feuchtesperrschicht	247
2.6.3	Abrechnungseinheit	243			
3	Ausführungsdetails	243			

3.4	Schlitze und Aussparungen	247	5.2	Vornässen	250
3.5	Hinweis zur Ausschreibung von Mauerwerk allgemein	247	5.3	Aussteifung während der Herstellung	250
3.5.1	Allgemeines	247	5.4	Schutz vor mechanischer Beschädigung	251
3.5.2	Angaben zur Ausführung	248	5.5	Bauhöhe des Mauerwerks	251
4	Ausführung nach Eurocode	248	5.6	Nachbehandlung des Mauerwerks während der Bauausführung	251
4.1	Allgemeines	248	5.7	Schutz gegen Regen	251
4.2	Fachpersonal	248	5.8	Schutz gegen Frost-Tau-Wechsel	251
4.3	Fugen	248	5.9	Schutz gegen Austrocknung	252
4.3.1	Allgemeines	248	5.10	Erste Belastung	252
4.3.2	Vermauern mit Stoßfugen- vermörtelung	248	5.11	Reinigen	252
4.3.3	Vermauern ohne Stoßfugen- vermörtelung	249	6	Abrechnung	252
4.4	Natursteinmauerwerk	249	6.1	Allgemeines	252
4.5	Zulässige Abweichungen	249	6.2	Leistungsermittlung	252
5	Ausführung auf der Baustelle	250	6.3	Ermittlung der Maße	252
5.1	Allgemeines	250	6.4	Übermessung	253
			7	Literatur	253

C Konstruktive Details (Bauphysik)

C 1 Energieeffiziente Gebäude – Das Gebäudeenergiegesetz – GEG 255

Michael Gierga

1	Einführung	257	3.7.2	Lüftungsanlagen	268
2	Historie der Regelungen zum energiesparenden Bauen	257	3.7.3	Varianten der Heizwärmeerzeugung	269
			3.7.4	Bewertung unterschiedlicher Heizungstechniken	270
3	Anforderungen aus dem Gebäudeenergiegesetz	259	3.7.5	Anlagen zur Kühlung	272
3.1	Gesamtenergiebedarf von Wohngebäuden	259	3.8	Nutzung erneuerbarer Energien	272
3.2	Zulässige Transmissions- wärmeverluste	260	3.8.1	Regenerativ erzeugter elektrischer Strom	273
3.3	Weitere Randbedingungen zur Bilanzierung	260	3.9	Aufrechterhaltung der energetischen Qualität	274
3.4	Luftdichtheit der Gebäudehülle	262	3.10	Energieausweise	274
3.5	Wärmebrücken	262	3.11	Vollzug des GEG	274
3.5.1	Geometrische Wärmebrücken	262	4	Beispielhafte Anwendung des GEG auf ein Einfamilienwohnhaus	275
3.5.2	Materialbedingte Wärmebrücken	263	4.1	Einfamilien-Doppelhaushälfte	275
3.5.3	Konvektive Wärmebrücken	263	4.2	Aufstellung der Energiebilanz	275
3.5.4	Zusätzliche Wärmeverluste	263	4.3	Effizienzhaus 55	279
3.5.5	Einfluss auf den Wärmebedarf	264	4.4	GEG-Nachweis nach dem vereinfachten Verfahren	281
3.6	Sommerlicher Wärmeschutz	264	5	Fazit und Kritik	284
3.7	Anlagentechnik	264	6	Literatur	285
3.7.1	Trinkwassererwärmung	267			

C 2 DIN 4109 „Schallschutz im Hochbau“ und Anwendungsbeispiele für den Mauerwerksbau 287

Michael Flieger, Markus Hofmann, Oliver Kornadt

1	Einleitung	289	3.2	A-bewerteter Schalldruckpegel	290
2	Normenreihe DIN 4109	289	3.3	Äquivalente Schallabsorptionsfläche	290
			3.4	Nachhallzeit	291
3	Akustische Grundlagen	289	3.5	Resonanzfrequenz	291
3.1	Schalldruck und Schalldruckpegel	289	3.6	Schalldämm-Maß	291

3.7	Norm-Trittschallpegel	292	6.1	Berechnung der Luftschalldämmung in Gebäuden	303
3.8	Bewertung des Schalldämm-Maßes und Norm-Trittschallpegels	293	6.1.1	Grundprinzip	303
3.9	Kennzeichnende Größen für Bauteile	293	6.1.2	Massivbau	307
4	Mindestanforderungen an Wohn- und Arbeitsgebäude	293	6.1.3	Zweischalige Haustrennwände	312
4.1	Mehrfamilienhäuser; Bürogebäude und Gebäude mit Mischnutzung	293	6.1.4	Holz-, Leicht- und Trockenbau	312
4.2	Einfamilien-, Reihen- und Doppelhäuser	293	6.1.5	Skelettbau und Mischbauweisen	312
4.3	Nichtwohngebäude	294	6.2	Trittschalldämmung	313
4.4	Anforderungen an die Luftschalldämmung von Außenbauteilen	295	6.2.1	Grundprinzip	313
4.5	Anforderungen an „besonders laute“ und schutzbedürftige Räume	300	6.2.2	Massivbau	314
4.6	A-bewertete Schalldruckpegel in fremden und eigenen Räumen	300	6.2.3	Holz-, Leicht- und Trockenbau	315
5	Erhöhte Anforderungen im Hochbau	303	6.3	Außenbauteile	316
5.1	Grundlage und Gültigkeit der erhöhten Anforderungen	303	6.4	Berechnung der Schallübertragung gebäudetechnischer Anlagen	317
5.2	Erhöhte Anforderungen für Gebäude mit Wohn- und Arbeitsbereichen	303	6.5	Sicherheitskonzept der DIN 4109	317
5.3	Erhöhte Anforderungen an Nichtwohngebäude	303	7	Beispielrechnung zur Beurteilung des Schallschutzes einer Mauerwerkswand gegen Außenlärm	320
5.4	Erhöhte Anforderungen an gebäudetechnische/raumlufthtechnische Anlagen	303	7.1	Exemplarische Berechnung für eine Außenwand aus Kalksandstein	320
6	Rechnerische Nachweise der Erfüllung der Anforderungen	303	7.2	Vergleich unterschiedlicher Rohdichten, Materialien und Fensterflächen	321
			8	Bauakustische Prüfungen	324
			8.1	Labor- und Baumessungen	324
			8.2	Beispiel einer Schallmessung an einer Mauerwerkswand im Labor	324
			9	Fazit	327
			10	Literatur	327

C3 Erschütterungen bei Mauerwerksbauten – Aspekte zur dynamischen Gebrauchstauglichkeit 331
Andreas Gömmel, Andreas Lackner

1	Motivation	333	4.2.2	Einwirkungen auf Menschen in Wohngebäuden	340
2	Begriffsdefinitionen	333	4.2.3	Einwirkungen auf Menschen am Arbeitsplatz	342
2.1	Emission/Übertragungsweg/ Immission	333	4.2.4	Einwirkungen auf empfindliche Geräte	342
2.2	Erschütterung	333	4.3	Sekundärer Luftschall	343
2.3	Primärer Luftschall	334	4.4	Bewertungs-Leitfaden der DB	344
2.4	Körperschall/Schwingungen in festen Körpern	334	4.5	Anwendung der Bewertungsgrundlagen	345
2.5	Sekundärer Luftschall	334	5	Erfassung der Eingangsparameter	345
2.6	A-Bewertung	334	5.1	Messungen	345
2.7	Schmalbandspektrum	335	5.2	Prognose	347
2.8	Terzbandspektrum	335	6	Rechnen mit Pegeln	347
2.9	Eigenfrequenz	335	7	Prognoseverfahren für Verkehrserschütterungen	347
2.10	Übertragungsfunktionen	336	7.1	Pauschale Prognose	347
2.11	Bemessungslastfallkombination	338	7.2	Detaillierte Prognose	350
2.12	Abstimmfrequenz	338	8	Interne Anregungsquellen	350
3	Anregungsarten und Übertragungsmechanismen	338	8.1	Maschinen und Haustechnik	350
4	Normative Vorgaben	338	8.2	Personenbewegungen	350
4.1	Allgemeines	338			
4.2	Erschütterungen	339			
4.2.1	Einwirkungen auf Gebäude	339			

9	Minderungsmaßnahmen	351	9.3	Maßnahmen am Gebäude	352
9.1	Maßnahmen an der Quelle	351	9.3.1	Konstruktive Maßnahmen	352
9.1.1	Schienengebundener Verkehr	351	9.3.2	Elastische Gebäudelagerung	354
9.1.2	Anregung durch Maschinen	351	9.3.3	Tilger	355
9.2	Maßnahmen am Übertragungsweg	352	10	Literatur	355

C 4 Montage von Fenstern und Türen mit Anforderungen an die Einbruchhemmung 357

Jürgen Küenzlen, Eckehard Scheller

1	Einleitung	360	3.3.2.2	Statische und dynamische Versuche	373
1.1	Allgemeines	360	3.3.2.3	Manuelle Einbruchversuche	373
1.2	Wände, Decken, Böden, Dächer	360	3.3.3	Versuche im Hochlochziegel POROTON-S10-P (Perlite gefüllt)	373
2	Übersicht zum vorhandenen Regelwerk	360	3.3.3.1	Allgemeines	373
2.1	Allgemeines – Bauprodukten- verordnung	360	3.3.3.2	Statische und dynamische Versuche	374
2.2	Vornormenreihe DIN V ENV 1627 bis DIN V ENV 1630	361	3.3.3.3	Manuelle Einbruchversuche	375
2.3	Aktuelle Normenreihe DIN EN 1627 bis DIN EN 1630	361	3.3.3.4	Fazit	375
2.3.1	DIN EN 1627: Anforderungen und Klassifizierung	361	3.3.4	Versuche im Hochlochziegel Plan HLzB 6-0,9 (ungefüllt)	375
2.3.1.1	Allgemeines	361	3.3.4.1	Allgemeines	375
2.3.1.2	Prüfungen zur Klassifizierung nach DIN EN 1627	362	3.3.4.2	Manuelle Einbruchversuche	376
2.3.1.3	Verankerungsgründe nach DIN EN 1627	363	3.3.5	Versuche im Hochlochziegel Thermopor TV 7 (Großkammerziegel Mineralwolle gefüllt)	376
2.3.2	DIN EN 1628: Widerstandsfähigkeit unter statischer Belastung	363	3.3.5.1	Allgemeines	376
2.3.3	DIN EN 1629: Widerstandsfähigkeit unter dynamischer Belastung	364	3.3.5.2	Statische und dynamische Versuche	377
2.3.4	DIN EN 1630: Widerstandsfähigkeit gegen manuelle Einbruchversuche	364	3.3.5.3	Manuelle Einbruchversuche	377
2.4	Entwurf E DIN EN 1627	365	3.3.5.4	Fazit	379
2.5	Montagebescheinigung nach erfolgtem Einbau einbruchhemmender Elemente nach DIN EN 1627	367	3.3.6	Versuche im Hochlochziegel unipor W07 (Kleinlochung, Mineralwolle gefüllt)	379
2.6	Regelungen der Deutschen Versicherungswirtschaft	367	3.3.6.1	Allgemeines	379
2.6.1	Klassifizierung	367	3.3.6.2	Statische und dynamische Versuche	379
2.6.2	Verankerungsgründe	368	3.3.6.3	Manuelle Einbruchversuche	379
2.7	Zusammenfassung	368	3.3.7	Versuche in „Hochwärmedämmendem Ziegelmauerwerk“	380
3	Erfahrungen aus Versuchen	370	3.3.7.1	Allgemeines	380
3.1	Allgemeines	370	3.3.7.2	Zusammenfassung der wichtigsten Versuchsergebnisse	380
3.2	Übersicht zu den durchgeführten Versuchen	370	3.3.8	Fazit: Konsequenzen für die Normung aus den Versuchen in Hochlochziegeln	381
3.3	Versuche zum Nachweis der Widerstands- klasse WK 2 und RC 2	371	3.3.9	Versuche in Mauersteinen aus Leichtbeton	381
3.3.1	Versuche in Porenbeton-Planblöcken (Festigkeitsklasse 4)	371	3.3.9.1	Allgemeines	381
3.3.1.1	Allgemeines	371	3.3.9.2	Statische und dynamische Versuche	381
3.3.1.2	Statische und dynamische Versuche	372	3.3.9.3	Manuelle Einbruchversuche	381
3.3.1.3	Manuelle Einbruchversuche	372	3.3.10	Versuche in Kalksandlochsteinen (KS L 10)	382
3.3.2	Versuche in Hochlochziegeln (HLz 12)	373	3.3.10.1	Allgemeines	382
3.3.2.1	Allgemeines	373	3.3.10.2	Dynamische Versuche	383
			3.3.10.3	Manuelle Einbruchversuche	383
			3.3.11	Versuche in Normalbeton	383
			3.3.11.1	Allgemeines	383
			3.3.11.2	Manuelle Einbruchversuche	383
			3.4	Versuche zum Nachweis der Widerstands- klasse WK 3 und RC 3	384
			3.4.1	Versuche in Porenbeton-Plansteinen (Festigkeitsklasse 2)	384

3.4.1.1	Allgemeines	384	3.4.3.2	Manuelle Einbruchversuche	389
3.4.1.2	Statische Versuche in Anlehnung an DIN V ENV 1628	385	3.5	Fazit: Vergleich Versuche in den Klassen WK 2 bzw. RC 2 und in den Klassen WK 3 bzw. RC 3	390
3.4.1.3	Dynamische Versuche in Anlehnung an DIN V ENV 1629	385	3.6	Versuche in der Dämmebene mit Schienen- und Konsolsystemen in Anlehnung an DIN EN 1627 bis DIN EN 1630	390
3.4.1.4	Manuelle Einbruchversuche in Anlehnung an DIN V ENV 1630	385	3.6.1	Schienen-/Konsolsysteme aus Metall	390
3.4.2	Versuche in „Hochwärmedämmendem Ziegelmauerwerk“	387	3.6.1.1	Allgemeines	390
3.4.2.1	Allgemeines	387	3.6.1.2	V Versuchsergebnisse	391
3.4.2.2	Zusammenfassung der wichtigsten Versuchsergebnisse	387	3.6.2	Systeme aus Funktionswerkstoff – EPS	391
3.4.2.3	Weitere Erkenntnisse: Untersuchung eines Pfeilers und zweier Ziegelrollladen- kästen	388	3.6.3	Systeme aus Funktionswerkstoff – PUR-Composit	392
3.4.2.4	Versuche in Leichtbetonstein Bisomark Plus 10	388	3.7	Zusammenfassung: Ergebnis der Versuche	393
3.4.3	Tastversuche in Normalbeton	389	4	Fazit	394
3.4.3.1	Allgemeines	389	5	Literatur	394

D Mauerwerk im Bestand

D 1 Berechnung und Bemessung bestehender Gewölbebrücken mit der Nachrechnungsrichtlinie für Straßenbrücken 397

Frank Purta, Gero Marzahn, Matthias Müller

1	Einleitung	400	3.2.3	Numerische Lösung	411
1.1	Bestandsbrücken im Bundes- fernstraßennetz	400	3.2.4	Vergleich der Bemessungs- Traglastkurven	412
1.2	Ziel der Nachrechnungsrichtlinie	400	4	Talbrücke Höllenbach	414
1.3	Möglichkeiten der Nachweisführung	401	4.1	Geometrie	415
1.4	Vorgehensweise zum Nachweis der Brückenbögen	404	4.2	Materialkennwerte Bogen	415
2	Materialkennwerte für Brückenkonstruktionen	404	4.3	Bemessungsfestigkeit vom Bogen- mauerwerk unter zentrischer Beanspruchung	416
2.1	Rohdichte	405	4.4	Tragfähigkeit unter exzentrischer Beanspruchung (Bemessungs- Traglastkurve)	416
2.2	E-Modul von Mauerwerk	405	4.5	Modellbildung für den statischen Nachweis	416
2.3	E-Modul Stein	405	4.5.1	Vernetzung des Modells mit finiten Elementen	416
2.4	E-Modul Mörtel	405	4.5.2	Lagerungsbedingungen der Brücke festlegen	416
2.5	Stein-Druckfestigkeit	406	4.5.3	Einwirkungen auf das Brückenbauwerk	416
2.6	Stein-Zugfestigkeit	406	4.5.4	Nachweis der Bogenkonstruktion	417
2.7	Mörtel-Druckfestigkeit	408	4.5.5	Nachweis Pfeiler, Widerlager und Gründung	419
3	Tragfähigkeit von Mauerwerk	408	5	Talbrücke Einsiedelstein	419
3.1	Tragfähigkeit unter zentrischer Beanspruchung	408	5.1	Geometrie	419
3.1.1	Verfahren a und b nach Tabelle 4	408	5.2	Materialkennwerte Bogen	419
3.1.2	Sabha	408	5.3	Bemessungsfestigkeit vom Bogen- mauerwerk unter zentrischer Beanspruchung	421
3.1.3	UIC-Kodex 778-3	408			
3.1.4	EC 6 (Natursteinmauerwerk)	409			
3.1.5	Vergleich der rechnerischen Tragfähigkeit unter zentrischer Beanspruchung	409			
3.2	Tragfähigkeit unter exzentrischer Beanspruchung	410			
3.2.1	Normenstand DIN 1053 (zurückgezogen)	411			
3.2.2	EC 6	411			

5.4	Tragfähigkeit unter exzentrischer Beanspruchung (Bemessungs-Traglastkurve) 421	7.5.3	Einwirkungen auf das Brückenbauwerk 430
5.5	Modellbildung für den statischen Nachweis 421	7.5.4	Ermittlung der Stützlinie im Bogen für jede Laststellung 431
5.5.1	Vernetzung des Modells mit finiten Elementen 421	7.5.5	Nachweis der Bogenkonstruktion 431
5.5.2	Lagerungsbedingungen der Brücke festlegen 421	8	Brücke über die Prießnitz 433
5.5.3	Einwirkungen auf das Brückenbauwerk 421	8.1	Geometrie 433
5.5.4	Ermittlung der Stützlinie im Bogen für jede Laststellung 422	8.2	Materialkennwerte Bogen 433
5.5.5	Nachweis der Bogenkonstruktion 423	8.3	Bemessungsfestigkeit vom Bogen-mauerwerk unter zentrischer Beanspruchung 433
6	Brücke über die Mandau 424	8.4	Tragfähigkeit unter exzentrischer Beanspruchung (Bemessungs-Traglastkurve) 433
6.1	Geometrie 424	8.5	Modellbildung für den statischen Nachweis 435
6.2	Materialkennwerte Bogen 424	8.5.1	Vernetzung des Modells mit finiten Elementen 435
6.3	Bemessungsfestigkeit vom Bogen-mauerwerk unter zentrischer Beanspruchung 424	8.5.2	Lagerungsbedingungen der Brücke festlegen 435
6.4	Tragfähigkeit unter exzentrischer Beanspruchung (Bemessungs-Traglastkurve) 424	8.5.3	Einwirkungen auf das Brückenbauwerk 435
6.5	Modellbildung für den statischen Nachweis 426	8.5.4	Ermittlung der Stützlinie im Bogen für jede Laststellung 435
6.5.1	Vernetzung des Modells mit finiten Elementen 426	8.5.5	Nachweis der Bogenkonstruktion 435
6.5.2	Lagerungsbedingungen der Brücke festlegen 426	9	Nachrechnungsrichtlinie für Straßenbrücken aus Mauerwerk 436
6.5.3	Einwirkungen auf das Brückenbauwerk 426	9.1	Allgemeines 436
6.5.4	Ermittlung der Stützlinie im Bogen für jede Laststellung 426	9.2	Modellbildung 438
6.5.5	Nachweis der Bogenkonstruktion 426	9.3	Ergänzende Regelungen zur Temperatureinwirkung 439
7	Brücke über die Zschopau 428	9.4	Schnittgrößenermittlung 439
7.1	Geometrie 428	9.4.1	Allgemeines 439
7.2	Materialkennwerte Bogen 428	9.5	Rechnerische Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit 439
7.3	Bemessungsfestigkeit vom Bogen-mauerwerk unter zentrischer Beanspruchung 430	9.5.1	Allgemeines 439
7.4	Tragfähigkeit unter exzentrischer Beanspruchung (Bemessungs-Traglastkurve) 430	9.5.2	Stufe 1 439
7.5	Modellbildung für den statischen Nachweis 430	9.5.3	Stufe 2 439
7.5.1	Vernetzung des Modells mit finiten Elementen 430	9.6	Rechnerische Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit 440
7.5.2	Lagerungsbedingungen der Brücke festlegen 430	9.7	Rechnerische Nachweise für gemauerte Anschlussbauteile 441
		9.7.1	Stirnmauern 441
		9.7.2	Stützen, Pfeiler und Widerlager 441
		10	Zusammenfassung 441
		11	Literatur 441
D 2	Eisenbahngewölbebrücken in Sachsen 443		
	Johanna Monka, Gregor Schacht, Steffen Marx		
1	Einleitung 445	2.1	Entwicklung des Eisenbahnnetzes in Deutschland 445
2	Das Eisenbahnnetz und seine Brücken 445	2.2	Gewölbebrücken 446
		2.3	Umgang mit Brückenbauwerken 448

3	Gewölbebrücken in Sachsen	450	4.3.2	Brücke über die Wilde Weißeritz (km 18,77)	455
4	Die Strecke Dresden–Werdau (6258)	451	4.3.3	Brücke über den Seerenbach (km 18,99)	455
4.1	Beschreibung und Geschichte der Strecke	451	5	Die Strecke Leipzig–Hof (6362)	456
4.2	Brücken im Streckenabschnitt Plauenscher Grund	453	5.1	Beschreibung und Geschichte der Strecke	456
4.2.1	Brücke über die Vereinigte Weißeritz (km 4,81)	453	5.2	Göltzschtal-Viadukt (km 95,00)	457
4.2.2	Bachbrücke Weizenmühle (km 5,06)	453	6	Zusammenfassung und Ausblick	460
4.3	Brücken im Streckenabschnitt Edle Krone	454	7	Dank	460
4.3.1	Brücke Edle Krone Bf. (km 18,05)	455	8	Literatur	460
D 3	Ermittlung der Druckfestigkeit von Bestandsmauerwerk	463			
	Birger Gigla				
1	Einleitung	465	4.3	Druckversuch auf Grundlage von UIC Kodex 778-3	480
2	Rechenwerte zur Bestimmung der Druckfestigkeit von Mauerwerk	467	5	Forschungsergebnisse zum Verfahren der Fugenbohrkerne nach Berger	481
2.1	Mechanische Grundlagen der zentrischen Druckfestigkeit von Mauerwerk	467	5.1	Aktueller Stand des wissenschaftlichen Diskurses	481
2.2	Steindruckfestigkeit	468	5.2	Untersuchung des Geometriefaktors k und des Einflusses von Exzentrizitäten im Fugenbohrkern	481
2.3	Mörteldruckfestigkeit	472	5.3	Untersuchung des Verhältnisses von Fugendicke zu Steinhöhe	486
2.4	Mauerwerkdruckfestigkeit: Rechenwerte nach EC 6 und DIN 1053-1	474	5.4	Untersuchung des Einflusses hochfester Mauerziegel und Vergleich mit dem Verfahren nach UIC 778-3	488
3	Statistische Auswertung: Potenzformel (Eurocode 6)	475	5.5	Untersuchung des Einflusses hochfester Mauerziegel und Vergleich mit dem Verfahren nach UIC 778-3	491
4	Bohrkernproben mit Fugenteilen	477	6	Empfehlungen für die Praxis	494
4.1	Einführung	477	7	Literatur	495
4.2	Verfahren der Fugenbohrkerne nach Berger	477			
4.2.1	Ansatz	477			
4.2.2	Erforderliche mechanische Parameter	478			
4.2.3	Berücksichtigung des Mauerwerkgefüges	478			
4.2.4	Ermittlung der Mauerwerkdruckfestigkeit nach dem Berger-Verfahren	479			
E	Innovationen im Mauerwerksbau				
E 1	Digitale Transformation im Bauwesen – von der Theorie zur Anwendung	499			
	Mathias Obergrießer, Michael A. Kraus				
1	Einleitung	501	2.2	Einblick in verschiedene Digitalisierungsstrategien im Bauwesen/Wohnungsbau etc.	504
1.1	Aktueller Stand der Digitalisierung	501	2.2.1	Vorhandene Methoden und digitale Werkzeuge	504
1.2	Gründe und Potenziale für die Digitalisierung	501	2.2.2	Common Data Environment (CDE) und BIM-Anwendungsfälle	506
2	Theoretische Aspekte der digitalen Transformation	502	2.2.3	Nutzung kollaborativer Prozesslandschaft im Bauwesen	508
2.1	Der Weg vom analogen Planen und Bauen zur Vision Planen/Bauen 4.0	502	2.2.4	Robotik und KI als Wegbereiter zum seriellen Bauen	508

3	Stand der digitalen Transformation in der Anwendung 513	3.3	Der Weg zur breiten Adaption von digitalen Werkzeugen und interdisziplinärer Zusammenarbeit 515
3.1	Wie weit sind Akzeptanz und Implementierung der Methode BIM in der Praxis? 513	4	Fazit und Ausblick 517
3.2	Welche Awf lassen sich mit dem aktuellen Wissen wirtschaftlich umsetzen? 513	5	Literatur 518
E 2	Innovationen im Ziegelmauerwerksbau 521		
	Andreas Jäger, Mario Kubista, Meysam Taghavi, Stefan Puskas, Karina Breitwieser, Stephan Fasching, Clemens Kuhlemann, Gülnaz Atila		
1	Einleitung 523	3.3.2	Mörtelauftragssysteme 542
2	Material und Produktoptimierung 524	3.3.3	Neue Klebesysteme (Dryfix) 543
2.1	Entwicklung von modernen Tools zur Produktoptimierung (Virtual Labs) 524	4	Ressourcenschonende Produktionsprozesse und Technologien für nachhaltiges Bauen mit Ziegeln 545
2.2	Optimierung der Produkteigenschaften mit modernen Tools 527	4.1	Die 3-Säulen-Strategie für eine klimaneutrale Ziegelproduktion 545
2.3	Entwicklung von Systemlösungen für optimiertes Ziegelmauerwerk 529	4.2	Reduktion fossiler CO ₂ -Emissionen in der Ziegelproduktion 548
2.4	Anwendungsbeispiele für ein langlebiges monolithisches Ziegelmauerwerk im mehrgeschossigen Wohnungsbau 531	4.2.1	Ausgangssituation und Zielsetzung für den Energieverbrauch 548
2.4.1	Wohnhausanlage Morogasse, Klagenfurt 531	4.2.2	Projekt DemoPlant und DryFiciency zur Energierückgewinnung 548
2.4.2	Verwaltungsgebäude Cura Cosmetic, Innsbruck 531	5	Digitalisierung in der Bauindustrie 552
2.4.3	Bürobau Interpark FOCUS 40, Röthis 532	5.1	Entwicklung von Prozessen zur digitalen Kooperation mit Kunden 552
2.4.4	Wohn- und Bürobau Loft Living, Sonnwendviertel, Wien 532	5.2	BIM-Elemente für Mauerwerkssysteme 554
2.4.5	Wohnbau Wildgarten – Wohnen am Rosenhügel, Wien 533	5.2.1	Arbeitsweise der Planer im BIM-Projekt 554
3	Bauprozess und Automatisierung im Mauerwerksbau 533	5.2.2	Digitale Datenbereitstellung für Mauerwerkssysteme 555
3.1	Mauerwerksroboter für verschiedene Einsatzgebiete 533	5.2.3	Beispielhafte Lösungsansätze 556
3.2	Modulares Bauen – Vorfertigung mit Redbloc-Ziegelfertigteilen 537	5.2.3.1	Wienerberger BIM Suite (Belgien) 556
3.2.1	Modulbauweise und Ziegelfertigteile – Begriffsklärung 537	5.2.3.2	Wienerberger BIM-Plug-In (Tschechien) 557
3.2.2	Hohe Qualität bei individueller Anfertigung 538	5.2.4	Schnittstelle PIM-BIM – die Herausforderungen 557
3.2.3	Maßgenaue Wände durch vollautomatisierte Produktion 538	5.3	Entwicklung von Softwaretools für Tragwerksplaner 560
3.2.4	Schnelle, einfache und saubere Montage 539	5.3.1	Einleitung 560
3.2.5	Emissionsarmes Bauen mit Ziegelfertigteilen 540	5.3.2	Bemessung der vertikalen Tragfähigkeit – N _{Rd} -Pro-Tool 561
3.2.6	Anwendungsbeispiele 540	5.3.3	Bemessung der Schubtragfähigkeit – V _{Rd} -Pro-Tool 562
3.3	Planziegelmauerwerk – effiziente Mörtelauftragssysteme 541	5.4	Mauerwerksmodul für 3D-Finite-Elemente-Software RFEM von Dlubal 563
3.3.1	Planziegelmauerwerk 541	6	Fazit 565
		7	Literatur 565

E 3 Mauerwerk in XXL – Großformatiges Bauen mit bewehrten Porenbetonelementen, vertikal und horizontal 569

Markus Heße, Mario Schmitz, Andreas Radischewski

1	Einleitung	571	5.1	Statik	581
1.1	Der Baustoff	571	5.1.1	Bauteile ohne statische Berücksichtigung der Bewehrung	581
1.2	Herstellung von Porenbeton	571	5.1.2	Weitergehende Hinweise zur Bemessung von Bauteilen mit statisch nicht ansetzbarer Bewehrung	583
1.3	Normen und Zulassungen für die Herstellung und Anwendung von Porenbeton	571	5.1.3	Bewehrte Bauteile mit statischer Berücksichtigung der Bewehrung	583
1.4	Klassifizierung von bewehrten Porenbetonprodukten	572	5.2	Wärmeschutz	584
2	Einsatzmöglichkeiten in vertikaler oder horizontaler Ausführung	572	5.3	Brandschutz – brandsicher bauen mit bewehrten Porenbetonelementen	585
2.1	Stehend tragend	572	5.4	Schallschutz	587
2.2	Liegend tragend	574	6	Ausführung auf der Baustelle	588
2.3	Stehend nichttragend	575	6.1	Basisanforderungen	588
2.4	Horizontal nichttragend	575	6.2	Verlegung der XXL-Elemente	589
3	Anforderungen an die Produktion	576	6.3	Arbeitssicherheit	589
4	Architekturplanung mit XXL-Elementen am Beispiel von Systemwandelementen, stehend tragend	577	6.4	Vor- und Nachteile gegenüber Mauerwerk	589
4.1	Vereinbarung von Planungsgrundsätzen bei stehenden Systemwandelementen	577	7	Ein Blick in andere Länder	590
4.1.1	Grundrissplanung im Raster	577	7.1	Niederlande – Wohnungsbau mit liegenden Wandelementen	590
4.1.2	Höhenplanung	577	7.2	Türkei – Erdbebensicheres Bauen mit stehenden Wandelementen	590
4.1.3	Dach- und Giebelschnitte	577	7.3	Australien – Siegeszug der Elemente als Verkleidung von Holzkonstruktionen	592
4.1.4	Wandöffnungen im Raster	578	7.4	USA – Vorfertigung mit Leichtmetall-Ständerwänden und Beplankungen aus Porenbeton	593
4.1.5	Sonderbauteile mit Gehrungsschnitten	578	8	Wie geht es weiter – ein Ausblick auf mehr Effizienz am Bau	593
4.2	Vereinbarung von Planungsgrundsätzen bei liegenden Wandelementen	578	9	Literatur	594
4.3	Einsatz von BIM	579			
4.4	Weitergehende Hinweise für eine praxisgerechte Anwendung	580			
5	Bautechnologische Planung	581			

F Forschung

F 1 Übersicht über abgeschlossene und laufende Forschungsvorhaben im Mauerwerksbau 595

Jonathan Schmalz, Ludwig Wingerter

1	Abgeschlossene Forschungsvorhaben	601	1.2.3	Einsatz von Füllern aus fein gemahlenem Kalksandstein-Recycling-Material als Upcycling für Kalksandstein-, Beton- und Asphaltprodukte	602
1.1	Übersicht Forschungsprojekte und Forschungsstellen	601	1.2.4	Einsatz natürlicher mineralischer Füller für die Optimierung der Eigenschaftswerte von Kalksandsteinen – Reduzierung der Produktionskosten, des Energieverbrauchs und der CO ₂ -Emissionen	603
1.2	Kurzberichte	601			
1.2.1	Rezyklierte Gesteinskörnungen aus Kalksandstein für vegetationstechnische Bodenverbesserungsmaßnahmen im Erd- und Straßenbau	601			
1.2.2	Verbesserte Schalldämmung von Kalksandsteinmauerwerk durch Optimierung der produktionstechnischen Herstellungsparameter – Erhöhung des dynamischen E-Moduls des KS-Materials	602			

- | | | | |
|-------|---|--------|--|
| 1.2.5 | Untersuchungen zur Phasenbildung und Gefügeentwicklung bei der hydrothermalen Härtung von Porenbeton mittels In-situ-Röntgendiffraktometrie mit dem Ziel der Sulfatreduzierung und Prozessoptimierung 604 | 2.2.8 | Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Sicherstellung der Dampfgängigkeit von hochverdichteten Kalksandstein-Rohlingen für die werkseigene Produktionskontrolle 622 |
| 2 | Laufende Forschungsvorhaben 607 | 2.2.9 | Einsatz von calciniertem Ton zur Nutzung bislang ungeeigneter Sande für die Kalksandsteinproduktion „Alkalifänger“ 623 |
| 2.1 | Übersicht Forschungsprojekte und Forschungsstellen 607 | 2.2.10 | Eignung von Sägeschlämmen aus der Fertigung von Kalksandstein-Planelement-Bausätzen als Optimierungszusatz für die KS-Produktion 624 |
| 2.2 | Kurzberichte 608 | 2.2.11 | Planziegelmauerwerk – Bestimmung der Eingangswerte für die Bemessung auf Basis von Versuchen: Druckfestigkeitsprüfung an Wandprüfkörpern und Ersatzprüfverfahren 625 |
| 2.2.1 | KI-basierte Schadensdetektion für das innovative Über- und Unterwasserscansystem 3D HydroMapper 608 | 2.2.12 | Verhalten von Stahlbetonrahmen mit entkoppelten Mauerwerksausfachungen und Öffnungen unter seismischen Einwirkungen 629 |
| 2.2.2 | Fahrbahnwannen auf Gewölbebrücken 611 | 2.2.13 | Einfluss der exzentrischen Lasteinleitung am Außenwand-Decken-Knoten auf die Schubtragfähigkeit von monolithischen Außenwänden aus Ziegelmauerwerk 631 |
| 2.2.3 | Schaffung von Bemessungsgrundlagen für Lehmmauerwerk auf Basis von DIN EN 1996-3/NA mittels experimenteller und numerischer Untersuchungen 616 | 2.2.14 | Entwicklung eines innovativen Ansatzes zur Entkopplung von Ausfachungen und nichttragenden Trennwänden aus Mauerwerk von der Tragstruktur 633 |
| 2.2.4 | Nachhaltig und zuverlässig bauen mit Lehm – Entwicklung eines semiprobabilistischen Sicherheitskonzepts für feuchtebeeinflusstes Lehmmauerwerk 618 | 2.2.15 | Neue Ansätze für die realistische Bemessung von Mauerwerksbauten unter Horizontallasten 635 |
| 2.2.5 | Entwicklung von Seilrobotern für die Erstellung von Kalksandstein-Mauerwerk auf der Baustelle 619 | | |
| 2.2.6 | Einsatz von metallurgischen Schlacken bei der Kalksandsteinproduktion zur Erhöhung des baulichen Schallschutzes 621 | | |
| 2.2.7 | Kosteneinsparung und Steigerung der Ressourceneffizienz von Kalksandsteinen durch Ansatz von Druckhaltestufen bei der Hydrothermalhärtung – sog. „Treppenkurven“ – CO ₂ -Einsparung 622 | | |

B Gestaltung und Konstruktion (Neubau)

B 2 Die Beschwingte Fläche

Mauerwerksverbände als Musterkunst und
Kompositionswerkzeug – Genauso, wie man als
Architekt das Mauerwerk betrachten kann

Koen Mulder

ins Deutsche übersetzt von Usch Engelmann

Mauerwerk-Kalender 2022: Fassadengestaltung, Bauphysik, Innovationen.

Herausgegeben von Detleff Schermer und Eric Brehm.

© 2022 Ernst & Sohn GmbH & Co. KG. Published 2022 by Ernst & Sohn GmbH & Co. KG.

Inhaltsverzeichnis

1	Mit zusammengekniffenen Augen 129	11	Halbsteinverband 170
1.1	Die Brille 129	12	Exoskelett, Jacke, Kleid oder Maßanzug 172
1.2	Das Auge 129	12.1	Blattgold? 172
2	Primäre und sekundäre Muster 133	12.2	Maßanzug 173
2.1	Primäres Schichtungsmuster und sekundäres Motiv 133	12.3	Die Dinge um ihrer selbst Willen 173
2.2	Begegnung 135	12.4	Das Gebäude – Objekt oder Stadtinterieur? 174
3	Um die Ecke? 135	12.5	Jazz 175
3.1	Vom Block- zum Kreuzverband 135	13	Proportionslehre oder Maßsystem 175
3.2	England 136	13.1	Menschliche Vorlieben 175
3.3	Andere Randabschlüsse 136	13.2	Scharf stellen 180
4	Der Rand 137	13.3	In der Oberfläche haust ein Maßanzug 180
5	(Nach-)Fugen – Farbe, Schatten und Maß 138	14	Ausfüllen oder Entwerfen 183
5.1	Fugenmaterial 138	14.1	Zwei Methoden 183
5.2	Architekten 140	14.2	De Pijp 183
5.3	Fugenbreite 140	14.3	Arbeiten ohne Kniffe 184
5.4	Fugenfarbe 140	14.4	Bessere Werkzeuge 185
5.5	Schatten in der Fuge 140	15	Formel 185
5.6	Fugenmaß 142	15.1	Symmetrie 185
6	Bedeutung oder Zeichen 142	15.2	Musterlinien im Rand 185
7	Kreuzverband 145	15.3	Wiederholmaß 187
7.1	Pfeiler – und Öffnungsbreiten bei einem Dreiviertelstein in der Läuferschicht 145	15.4	Der Verband als Schraffurmuster 190
7.2	Pfeiler – und Öffnungsbreiten bei einem Viertelstein in der Binderschicht 148	16	Kombinationsverbände – das kleinste gemeinsame Vielfache 192
7.3	Flacher Abschluss 148	16.1	Varianten mit derselben Steinabfolge 198
8	Flämischer Verband 151	16.2	Die Richtung der Linienführung 200
9	Blockverband 157	16.3	Mit dem Motiv beginnen 204
9.1	Variante des Kettenverbands oder Verband mit Kettenlinien? 157	16.4	Schichtmuster, Meta-Motiv, Relief und Schatten 209
9.2	Linien zeichnen im Blockverband 158	16.5	Das ehrliche Flächenmuster der Schichtung 211
9.3	Eine breite Kettenlinie in der Mitte 159	16.6	Verblenden oder Finish? 211
9.4	Dearne's bond 159	16.7	An der Schnur entlang 214
10	„Einfacher“ wilder Verband 165		
10.1	Freiheit 166		
10.2	Historisieren 166		
10.3	Perfekte Willkür 166		
10.4	Systemfehler ... 166		
10.5	Pseudo 169		
10.6	Transformation von Ordnung zu Chaos 169		
10.7	Relief 169		
10.8	Wirkung 169		

Vorbemerkungen

Der vorliegende Beitrag enthält eine Auswahl von Abschnitten aus dem Buch „Die Beschwingte Fläche“ (diebeschwingteflaeche.de), das 2016 auf Niederländisch und 2018 auf Deutsch erschienen ist. Das Buch selbst ist ein Traktat, das das Thema skizziert, indem es dieses über Umwege streift, um so eine Kontur festzulegen. Und das stimmt in gewisser Weise. Trotzdem ist es möglich, einzelne Absätze herauszunehmen. In dem Buch geht es genauso um Fugen wie um Steine. Der Autor sucht vor allem die Ordnung, die den Dingen innewohnt.

Es muss dabei allerdings erwähnt werden, dass „Die Beschwingte Fläche“ die Übersetzung eines sehr niederländischen Buches ist. Und das beinhaltet natürlich viel Maurerjargon, den die meisten Niederländer auch nur noch aus Sprichwörtern und Redewendungen kennen und der kaum zu übersetzen ist. Wir haben versucht, für solche Begriffe deutsche Äquivalente zu finden. Aber in dem viel größeren deutschen Sprachgebiet gibt es mehr regionale Fachbegriffe. Und der Charakter deutscher Worte unterscheidet sich oft gravierend von dem niederländischer: der niederländische ‚kop‘ (Kopf, Binder) verweist auf die Seite, das Antlitz des Steins; der deutsche ‚Binder‘ hingegen verweist auf seine Funktion. Beim ‚Kopf‘ geht es um das 2D-Muster, beim ‚Binder‘ um den 3D-Zusammenhang. Einen Backstein in zwei Köpfe zu schneiden, verdoppelt ihn, ein durchgeschnittener Binder ist kein Binder mehr.

Auch haben wir uns Gedanken zur Übersetzung der Symbole in den Verbandsnotationen und Formeln gemacht (K = kop/Binder, S = strek/Läufer, V = voeg/Fuge, H = herhaling/Wiederholung). Wir hätten sie natürlich übersetzen können, uns letztlich aber dagegen entschieden, weil das Buch auch einen Link zu einer Muster-Software und Tabellenblättern beinhaltet. Es schien uns praktischer, hier die gleiche „Codierung“ beizubehalten wie im Niederländischen, damit zukünftige Ergänzungen direkt verfügbar und anwendbar sind.

Nicht umsonst ist ein ‚Holländer‘ im umgangssprachlichen Maurerdeutsch ein krummer, misslungener Stein. Wir wünschen Ihnen viel Freude beim Lesen und vielleicht sogar beim Entwerfen.

Eine Übersicht über die verschiedensten Mauerwerkverbände ist in Bild 1 dargestellt.

1 Mit zusammengekniffenen Augen

1.1 Die Brille

Mit zehn Jahren bekam ich meine erste Brille. Ein kleines Wunder geschah. Jahrelang hatte ich in einer Traumwelt mit weichen Formen gelebt, die mir ihre Details preisgaben, wenn sie dazu bereit waren. Legosteine zeigten ihre Besonderheiten genau da, wo ich sie fassen konnte; das konnte kein Zufall sein. Licht war ein irres Fest aus Strahlenkränzen, deren Muster ich

nach Belieben manipulieren konnte, indem ich mit meinen feuchten Augen zwinkerte. Die Dinge flossen ineinander. Als ich bereits damals Moiré-Muster über die Oberfläche schimmern sah, lag das an meinen schlechten Augen. Und dann kam also die Brille.

Als ich aus dem Brillengeschäft trat, sah ich die Steine der Mauerwerksfassaden, soweit mein Blick reichte. Die Ziegelsteine der Benschopperstraat waren vermutlich genauso gezeichnet wie im Dörfchen Benschop selbst. Es war ein beinahe beängstigender Gedanke, diese unendlich große Welt. Von nun an sollte ich alles sehen können, wenn ich nur meinen Blick darauf richtete.

Die Überraschung war groß, als ich entdeckte, dass es weiterhin Illusionen gab, denen man auch mit dem neuen, scharfen Blick nicht entkam. Zuerst bekam ich das Buch „De klepel en de klok“ (Der Klöppel und die Glocke) von *Mies Bouhuys*, voller optischer Illusionen. Später war ich fasziniert von *trompe-l'oeil*, der Grenze zwischen Malerei und Architektur. Einfacher, weniger auffällig, war ein Schwingen ganz in meiner Nähe. Wenn ich mir eine gemauerte Wand ansah, sah ich zwei Muster gleichzeitig. Natürlich sah ich die Steine genau wie jeder andere, aber, wenn ich mit zusammengekniffenen Augen durch die Brille schaute, sah ich neue Muster aus Linien, die über die Oberfläche spielten. Und danach sah ich sie zusammen, gleichzeitig auf der gleichen Mauer. Bei alten, nicht zu alten Mauern gelang das besser als bei den Neubauten, die in unserer Straße emporsprossen.

1.2 Das Auge

Ich spreche oft über das Auge, als ob es ein selbstständiges Individuum wäre, mit einem eigenen Willen. Das ist nicht ungewöhnlich, sicher nicht in der Kunstbetrachtung, und oft klingt es etwas metaphorisch. Aber Schönheit liegt im Auge des Betrachters. Ich bin mir bewusst, dass sich hinter dem Auge, und manchmal selbst hinter zweien, mehr Mensch versteckt. Die Netzhaut selbst ist eine Ausstülpung des Gehirns und was das Auge sieht, ist genauso abhängig vom Gehirn wie von der Welt, die es betrachtet. Der Grund, warum ich das Auge mutterseelenallein die Straße hinaufschicke, ist der unvermeidliche Charakter der Illusion, sein zwanghaftes Verlangen nach Mustern, seine Treulosigkeit gegenüber meinem Verstand.

Das Auge neigt dazu zu gruppieren; es sieht, was es versteht, nicht was ist. Das Auge scheint zu denken: „eins, zwei, drei, vier, viele ...“ Und dann sucht es irgendwo anders nach einer neuen Ordnung. Ein Fleckenmuster entsteht, ohne dass es die einzelnen Flecken sieht, sich kreuzende Linien entstehen, ohne dass es alle Linien unterscheiden kann (Bild 2). Die kleine Unregelmäßigkeit wächst zu einem nicht greifbaren, großen Muster. Eine Erschütterung zieht sich über die Fläche, sie macht es unmöglich, das Kleine und das Große gleichzeitig zu sehen.

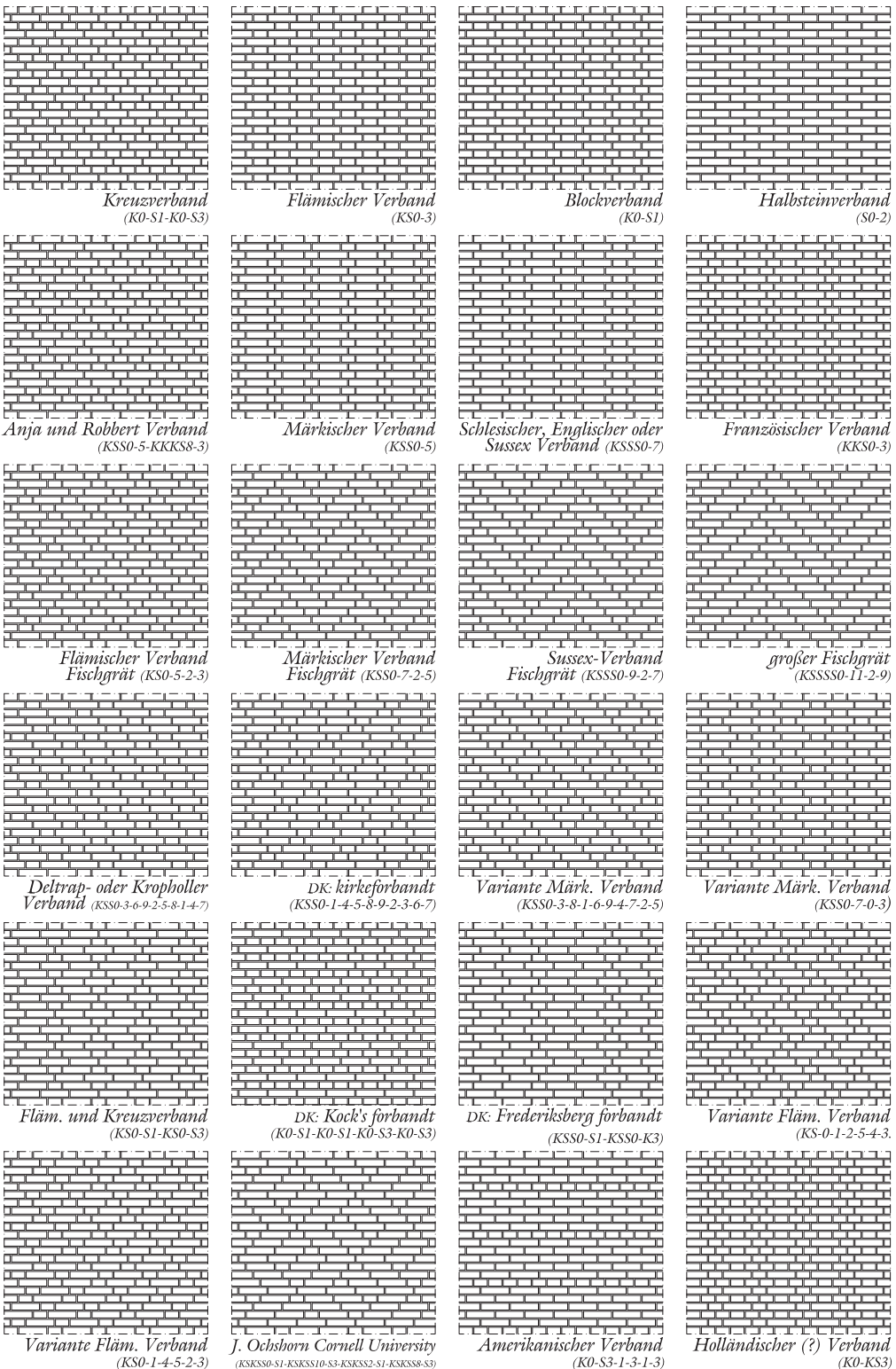


Bild 1. Verschiedene Verbände mit ihrem Namen und einer systematischen Beschreibung von Steinfolge, Position und Schichtreihenfolge

C Konstruktive Details (Bauphysik)

**C 1 Energieeffiziente Gebäude –
Das Gebäudeenergiegesetz – GEG**

Michael Gierga

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung 257	3.8	Nutzung erneuerbarer Energien 272
2	Historie der Regelungen zum energiesparenden Bauen 257	3.8.1	Regenerativ erzeugter elektrischer Strom 273
3	Anforderungen aus dem Gebäudeenergiegesetz 259	3.9	Aufrechterhaltung der energetischen Qualität 274
3.1	Gesamtenergiebedarf von Wohngebäuden 259	3.10	Energieausweise 274
3.2	Zulässige Transmissions- wärmeverluste 260	3.11	Vollzug des GEG 274
3.3	Weitere Randbedingungen zur Bilanzierung 260	4	Beispielhafte Anwendung des GEG auf ein Einfamilienwohnhaus 275
3.4	Luftdichtheit der Gebäudehülle 262	4.1	Einfamilien-Doppelhaushälfte 275
3.5	Wärmebrücken 262	4.2	Aufstellung der Energiebilanz 275
3.5.1	Geometrische Wärmebrücken 262	4.3	Effizienzhaus 55 279
3.5.2	Materialbedingte Wärmebrücken 263	4.4	GEG-Nachweis nach dem vereinfachten Verfahren 281
3.5.3	Konvektive Wärmebrücken 263	5	Fazit und Kritik 284
3.5.4	Zusätzliche Wärmeverluste 263	6	Literatur 285
3.5.5	Einfluss auf den Wärmebedarf 264		
3.6	Sommerlicher Wärmeschutz 264		
3.7	Anlagentechnik 264		
3.7.1	Trinkwassererwärmung 267		
3.7.2	Lüftungsanlagen 268		
3.7.3	Varianten der Heizwärmeerzeugung 269		
3.7.4	Bewertung unterschiedlicher Heizungstechniken 270		
3.7.5	Anlagen zur Kühlung 272		

1 Einführung

Mit der Veröffentlichung eines Gesetzespakets zur Vereinheitlichung des Energieeinsparrechts für Gebäude und zur Änderung weiterer Gesetze im August 2020 erfolgte das Zusammenführen der Anforderungen an die Gebäudeenergieeffizienz und die Nutzungspflicht erneuerbarer Energien. Hauptbestandteil dieses Pakets ist das „Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden“ auch Gebäudeenergiegesetz oder GEG genannt [1]. Das Gebäudeenergiegesetz hebt die ehemalige Energieeinsparverordnung (EnEV) mit den letztmalig 2016 verschärften Anforderungen an die Energieeffizienz von Neubauten [2] auf einen höheren Gesetzesstand und vereinigt sie mit dem nationalen Energieeinspargesetz (EnEG) [3] und dem Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG) [4]. Das GEG ist für neu zu errichtende Gebäude mit Bauantrag ab dem 1. November 2020 anzuwenden. Der gesetzlich eingeführte Effizienzstandard eines Niedrigstenergiegebäudes im Neubaubereich ist damit für die nächsten Jahre festgelegt. Eine Überprüfung des Gesetzes soll frühestens 2023 erfolgen.

Dieser Beitrag behandelt die Entwicklung des energiesparenden Bauens im Wohngebäudebereich bis hin zur aktuell gültigen Gesetzgebung und den flankierenden technischen Regeln. Er gibt zudem Hinweise zur praktischen Anwendung der Regelwerke, enthält aber auch kritische Anmerkungen zu den Zielvorgaben und zu ausgewählten Einzelaspekten in der praktischen Umsetzung. Dabei stützt sich der Beitrag auch auf den veröffentlichten Entwurf des Gebäudeenergiegesetzes mit der dort enthaltenen Begründung zu den getroffenen Änderungen gegenüber der Energieeinsparverordnung und dem Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz [5].

2 Historie der Regelungen zum energiesparenden Bauen

Im Jahr 1976 erließ der Bundestag mit Zustimmung des Bundesrates das erste Gesetz zur Einsparung von Energie in Gebäuden (EnEG), welches die Grundlage für die von der Bundesregierung erlassenen Rechtsverordnungen über einen energiesparenden Wärmeschutz von Gebäuden (Wärmeschutzverordnung) und über energiesparende Anforderungen an heizungstechnische Anlagen sowie Brauchwasseranlagen (Heizanlagen-Verordnung) bildete. Das Anforderungsniveau sollte zudem sicherstellen, dass die notwendigen Investitionen im Regelfall je nach Energiepreis und Bedingungen des Kapitalmarktes in der Gebäudenutzungsdauer erwirtschaftet werden können (Wirtschaftlichkeitsgebot).

In der ersten Wärmeschutzverordnung, die am 1. November 1977 in Kraft trat, wurden Anforderungen an die Wärmedurchgangskoeffizienten der wärmeübertragenden Umfassungsflächen von Gebäuden festge-

legt. Für ein durchschnittliches Einfamilien-Doppelhaus in Bild 1 mit der straßenseitigen Ansicht zweier Doppelhaushälften und mit einem eher ungünstigen Hüllflächen-/Volumen-Verhältnis (A/V) von $0,7 \text{ m}^{-1}$ war ein mittlerer Wärmedurchgangskoeffizient k_m von höchstens $0,9 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ sicherzustellen. Im Laufe der Novellierungen der Verordnungen wurden die Anforderungsgrößen von den betrachteten Transmissionswärmeverlusten erweitert, um die passiven Solargewinne, um die internen Wärmegewinne und um die Lüftungswärmeverluste und somit eine Raumwärmebilanz als Grundlage der Anforderungen seit der Wärmeschutzverordnung von 1994 zu berücksichtigen.

Mit Einführung der Energieeinsparverordnung 2002 (EnEV) wurden die alte Wärmeschutzverordnung und die bis dato geltende Heizungsanlagen-Verordnung zusammengeführt, sodass neben architektonischen Aspekten und dem Wärmeschutz der baulichen Komponenten auch die anlagentechnischen Einflüsse und die Art der Energieversorgung, d. h. der oder die Energieträger, mit bewertet wurden. Die Anforderungen sollten den Heizenergiebedarf für die Beheizung der Gebäude und die Warmwasserbereitung reduzieren und den dazu notwendigen Primärenergiebedarf als Hauptanforderung begrenzen. Daneben konnten alternative Energiequellen erstmalig mit ihrem Energiebeitrag zur Kompensation angerechnet werden. In einer Nebenanforderung wurden die Transmissionswärmeverluste der Gebäudehülle begrenzt, um den Standard des baulichen Wärmeschutzes nicht unter den der Wärmeschutzverordnung von 1995 absinken zu lassen.

Diese Begrenzung macht ein Vergleich zum zuvor zitierten Anforderungsniveau der siebziger Jahre deutlich: Für ein Doppelhaus mit einem A/V -Wert von $0,7 \text{ m}^{-1}$ durfte seitdem der mittlere spezifische Transmissionswärmeverlust, der in etwa dem mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten k_m entspricht, den Wert von $0,51 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ nicht überschreiten.

Da diese Festlegungen allein für den Neubaubereich galten und die energetische Ertüchtigung des Gebäudebestands noch ausklammerten, ist das EnEG im September 2005 umfänglich erweitert worden. Grund war die notwendige Umsetzung der europäischen Richtlinie 2002/91/EG über die „Gesamtennergieeffizienz von Gebäuden“ (EPBD) [6], die neben Regelungen zur Klimatisierung und elektrischen Beleuchtung von zu errichtenden Gebäuden die Erstellung von Energieausweisen auch für bestehende Gebäude erforderte.

In den Jahren danach trat aufgrund des nachhaltigen anthropogenen CO_2 -Anstiegs der Erdatmosphäre und der damit in Verbindung stehenden Klimaerwärmung der politische Zwang zu weiteren Energieeinsparungen im Gebäudesektor in den Vordergrund. Das Wirtschaftlichkeitsgebot energiesparender Maßnahmen und der „Bestandsschutz“ bei Altimmobilen wurden aufgeweicht. Die Verpflichtung zur Ausstellung von Energieausweisen sollte im Immobilienmarkt als Anreiz zur energetischen Ertüchtigung der Bestandsgebäude führen.



Bild 1. Fassadenansicht eines beispielhaften Einfamilienhauses mit Unterkellerung und ausgebautem Dachgeschoss

Die Vorschriften zur Energieeinsparung bei Neubauten sind mit der 2007 in Kraft getretenen Energieeinsparverordnung gegenüber der Verordnung von 2002 nicht verschärft worden. Die Nachweisverfahren für Wohngebäude blieben nahezu unverändert, lediglich bei Vorhandensein einer maschinellen Raumluftkühlung musste diese über pauschale Energiebilanzansätze mit bewertet werden. Im Bereich der Nichtwohngebäude entstand allerdings ein gegenüber der Vergangenheit erheblich erweiterter Nachweis- und Bearbeitungsumfang. Dieser resultierte aus der verpflichtenden Anwendung der DIN V 18599 [7], mit der die Berechnung beheizter, gekühlter und mit elektrischer Beleuchtung beaufschlagter Gebäude jeglicher Nutzung ermöglicht wurde.

Mit Einführung der EnEV 2009 wurden die Anforderungen an den zulässigen Jahresprimärenergiebedarf von Wohn- und Nichtwohngebäuden um durchschnittlich 30 % verschärft. Zudem wurde die Anwendung des Referenzgebäudeverfahrens auch für Wohngebäude obligatorisch. Seit dem 1. Oktober 2009 wird für die Festlegung der Anforderungshöhe ein synthetisches Gebäude (Referenzgebäude) herangezogen, welches die gleiche Geometrie, Nutzfläche und Ausrichtung aufweist, jedoch einen festgelegten baulichen Wärmeschutz erhält und über eine standardisierte Anlagentechnik zur Wärmeerzeugung verfügt. Dadurch wird jedem geplanten Neubau ein individueller Höchstwert für den zulässigen Jahresprimärenergiebedarf zugeordnet.

Weiterhin erfolgten Auflagen zur energetischen Ertüchtigung des Wohngebäudebestands, wie beispielsweise die Nachrüstverpflichtung von Gebäuden und Anlagen oder die Außerbetriebnahme von elektrischen Speicherheizsystemen. Die Nichtbeachtung der Maßgaben wurde durch die Bundesregierung stärker sanktioniert und führte zu Bußgeldtatbeständen.

Parallel zur Novellierung der EnEV 2009 trat darüber hinaus ein weiteres wichtiges Gesetz, das Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG) [4] in Kraft,

welches den Einsatz von regenerativen Energieträgern in Neubauten verbindlich vorschrieb. Zielsetzung war, den Anteil an erneuerbaren Energien am Endenergieverbrauch bis zum Jahr 2020 auf 14 % zu erhöhen. Dies betraf Raumwärme, Kühlenergie sowie die Warmwasserversorgung.

Mit Veröffentlichung der Europäischen Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (EPBD) 2010/31/EU vom 19. Mai 2010 [6] sind sämtliche EU-Mitgliedstaaten verpflichtet, diese in allen Punkten in nationales Recht umzusetzen. Damit sollte das ambitioniert Ziel erreicht werden, die Verbesserung der Energieeffizienz um 20 % und die Einsparung von CO₂-Emissionen um ebenfalls 20 % bis zum Jahr 2020 zu realisieren. Erklärtes Ziel war die Schaffung von Mindeststandards für die Energieeffizienz von Neubauten und energetisch renovierten Gebäuden. Die Umsetzung eines Niedrigstenergiegebäude-Standards im Neubaubereich bis zum Jahr 2021 war die zentrale Forderung sowie die Umsetzung eines Sanierungsfahrplans für Gebäude im Bestand, verbunden mit einer angestrebten Minderung des Primärenergiebedarfs im Gebäudebereich um insgesamt 80 %. Wesentliche technische Elemente der EPBD sind die Anrechenbarkeit der erneuerbaren Energien in den nationalen Berechnungsmethoden sowie eine plakative Darstellung von Energieverbräuchen in Form von Energieausweisen.

Im Juli 2013 wurde daraufhin das novellierte 4. Energieeinsparungsgesetz (EnEG) [3] veröffentlicht. Im Wesentlichen sah der dort definierte Wirtschaftlichkeitsbegriff dabei eine Refinanzierung der Aufwendungen bei der Erstellung eines Gebäudes durch die eingesparte Energie vor. Die im November 2013 veröffentlichte EnEV 2014 [2] führte die Regelungen der EnEV 2009 nahezu ohne materielle Änderungen unverändert fort. Seit dem 1. Januar 2016 galt für Neubauten eine 25%ige Verschärfung der Anforderungen an den zulässigen Primärenergiebedarf sowie eine Umstellung der Anforderungen an den baulichen Wärmeschutz von Wohngebäuden. Der zulässige Transmissi-

Primärenergiebedarf Doppelhaushälfte – Heizung [kWh/m²a]

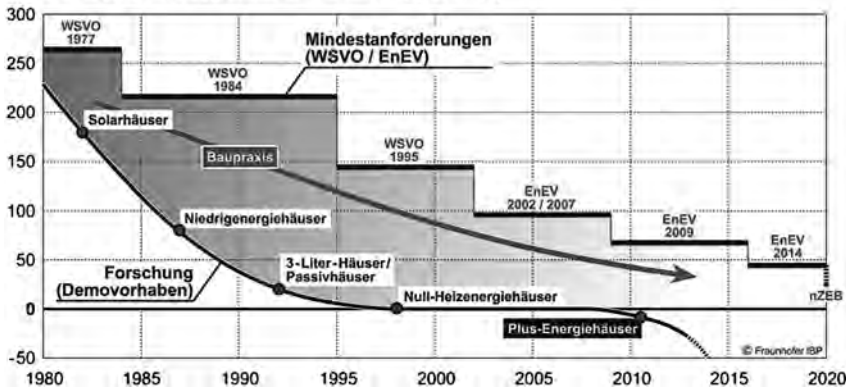


Bild 2. Entwicklung des energiesparenden Bauens am Beispiel des flächenbezogenen Primärenergiebedarfs für die Beheizung einer Doppelhaushälfte gemäß [8]

onswärmeverlust orientierte sich am Zahlenwert des Referenzgebäudes und war zusätzlich über tabellierte Werte in Abhängigkeit der Gebäudekubatur gedeckelt. Für das in Bild 1 dargestellte Doppelhaus bedeutete dies einen zulässigen Primärenergiebedarf von etwa $35 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ zur Beheizung und etwa $20 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ zur Deckung des Trinkwarmwasserbedarfs.

Die zeitliche Entwicklung des Primärenergiebedarfs zur Beheizung von Wohngebäuden in Deutschland kann anhand der vielfach veröffentlichten Grafik des Fraunhofer Instituts für Bauphysik für eine Einfamilien-Doppelhaushälfte [8] aufgezeigt werden (Bild 2). Die Grafik zeigt die stufenweise Absenkung des rechnerisch ermittelten Primärenergiebedarfs als Folge der Verschärfungen des baulichen Wärmeschutzes sowie ab 1995 auch des zulässigen Energiebedarfs aus der Gebäudeenergiebilanz. Darüber hinaus ist erkennbar, dass die baurechtlichen Anforderungen durch die Ausführungen in der Baupraxis übererfüllt wurden (Kurve mit Pfeil) und der Stand der Forschung bereits in den 1990er-Jahren sehr energiesparende Bauausführungen bis hin zu Nullenergiehäusern hervorbrachte. Seit etwa 10 Jahren erfolgt aber sichtbar eine Stagnation der Entwicklung zu geringeren Primärenergiebedarfswerten. Das GEG soll diesen Beharrungszustand beenden.

3 Anforderungen aus dem Gebäudeenergiegesetz

3.1 Gesamtenergiebedarf von Wohngebäuden

Im Folgenden werden die Anforderungen an energiesparende Wohngebäude beschrieben. Nichtwohngebäude werden an dieser Stelle ausgeklammert, da diese eine weitergehende differenzierte Betrachtung erfordern, die den Rahmen dieses Beitrags sprengen. Die Hauptanforderung an Wohngebäude sowie gemäß Definition auch an Wohn-, Alten- und Pflegeheime sowie

ähnliche Einrichtungen (GEG § 3, Satz 1) richtet sich an den einzuhaltenden Primärenergiebedarf der Wärmebereitstellung für Warmwasser, Heizung sowie Kühlung und an die Nutzung erneuerbarer Energien für den Gebäudebetrieb. Der auf die fiktive, aus der EnEV abgeleitete Gebäudenutzfläche A_N bezogene zulässige Primärenergiebedarf ist bereits seit Inkrafttreten der EnEV 2009 nicht mehr abhängig vom Hüllflächen-Volumen-Verhältnis A/V eines Gebäudes, sondern allein vom Energiebedarf des mit normierten Randbedingungen berechneten Referenzgebäudes (GEG § 15 und Anlage 1). Dabei gibt der rechnerisch ermittelte Primärenergiebedarf des sog. Referenzgebäudes als Abbild des real geplanten Gebäudes mit den im GEG festgelegten Referenzbauteilen und der dort definierten Referenz-Anlagentechnik den zulässigen Höchstwert für den Primärenergiebedarf des Neubaus vor. Die Erfüllung der Anforderungen kann technologieoffen durch unterschiedliche bauliche Maßnahmen in Kombination mit energieeffizienter Anlagentechnik erreicht werden und aus individuellen Lösungen bestehen. Eine Übersicht der vom Gesetzgeber festgelegten Randbedingungen zum Referenzgebäude zeigt Tabelle 1. Der Vorteil der Vorgehensweise besteht darin, dass der nicht existente Zusammenhang zwischen dem Kompaktheitsgrad (A/V -Verhältnis) des Gebäudes zu den Anlagenverlusten, den Lüftungswärmeverlusten und auch den internen und solaren Einträgen über die Fassaden den zulässigen Primärenergiebedarf sachgerecht beschreibt.

Wichtiger Hinweis:

Die Abhängigkeiten aus Fensterflächenanteilen der Fassaden sowie der Kompaktheitsgrad des architektonischen Entwurfs (A/V -Verhältnis) fließen nicht direkt in die Anforderungen an den baulichen Wärmeschutz ein. Zudem beschreibt die Referenzausführung einen Gebäudestandard, der seit der EnEV 2009 unverändert als Referenz gilt und heutzutage als Standardausführung eines

energieeffizienten Gebäudes überholt ist. Dies wird verdeutlicht durch die im Gesetz verankerte Multiplikation des Primärenergiebedarfs des Referenzgebäudes mit dem Faktor 0,75 zur Festlegung des zulässigen Höchstwertes.

Als Bezugsgröße für die Praxisdarstellung gilt der auf die beheizte und ggf. gekühlte Gebäudenutzfläche bezogene Primärenergiebedarf sowie informativ auch der im Energieausweis anzugebende Endenergiebedarf der verwendeten Energieträger. Die rechnerische Gebäudenutzfläche A_N ergibt sich aus dem Bruttovolumen V_e des beheizten bzw. gekühlten Gebäudeteils zu:

$$A_N = 0,32 \cdot V_e \quad (1)$$

Beträgt die Brutto-Geschosshöhe h_G mehr als 3 m oder weniger als 2,5 m, so ist A_N wie folgt zu ermitteln:

$$A_N = \left(\frac{1}{h_G} - 0,04 \frac{1}{m} \right) \cdot V_e \quad (2)$$

Die so berechnete Gebäudenutzfläche A_N stimmt im Regelfall nicht mit der Wohnfläche eines Gebäudes überein und ist lediglich eine für baurechtliche Nachweise und Angaben im Energieausweis normierte Bezugsfläche. Sie ist historisch entstanden und sämtliche in DIN V 4108-6 [9] und DIN V 4701-10 [10] festgelegten spezifischen Kennwerte basieren auf diesem Flächenansatz. In DIN V 18599 [7] wird dagegen auf die Nettogrundfläche eines Gebäudes oder einer Nutzungszone Bezug genommen, sodass eine weitere Umrechnung zwischen Nettogrundfläche und Gebäudenutzfläche erforderlich wird. So können zwischen den flächenbezogenen Kennwerten durchaus große Unterschiede auftreten, die sich erst nach Multiplikation mit den entsprechenden Flächen als kennzeichnende Absolutwerte eines Gebäudes angleichen. Absolutwerte für das Gesamtgebäude zeigen eine gute Übereinstimmung mit ausgeführten Objekten [11–14].

Die Berechnung des Endenergiebedarfs nach DIN V 18599 tendiert nach ersten publizierten Erkenntnissen zu geringeren Zahlenwerten als nach dem bisher gebräuchlichen Bilanzverfahren und erhöht damit die Übereinstimmung zwischen Endenergiebedarf und tatsächlichem Verbrauch von Wohngebäuden im Neubereich und von sanierten Objekten [15, 16].

3.2 Zulässige Transmissionswärmeverluste

Der zulässige Transmissionswärmeverlust eines zu errichtenden Wohngebäudes resultiert allein aus den Wärmeverlusten der wärmetauschenden Hüllfläche des Referenzgebäudes und stellt eine Fortführung der Anforderungen der EnEV dar. Die bislang begrenzende Festlegung tabellierter Höchstwerte der auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche bezogenen Transmissionswärmeverluste in Abhängigkeit der Gebäud kubatur entfällt ersatzlos. Dieses Vorgehen vereinfacht zwar die rechnerische Nachweisführung, ermöglicht aber die Planung und den Bau vollverglaster Wohngebäude, ohne durch Begrenzungen der Wärmedurchgangskoeffizienten regulierend auf das sommerliche

Temperaturverhalten einzuwirken. Dieser Entfall stellt eine deutliche didaktische Verschlechterung des baulichen Wärmeschutzes dar. Es ist abzusehen, dass eine Erhöhung der Gebäudeheizlast erfolgt und zusätzlich ein rechnerischer Kühlenergiebedarf auch in Wohngebäuden resultiert. Aus diesem Grund kommt dem rechnerischen Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes zur Begrenzung der solaren Wärmeeinträge durch Fenster weiterhin eine sehr wichtige Bedeutung zu.

3.3 Weitere Randbedingungen zur Bilanzierung

Die für die energetische Bilanzierung des Referenzgebäudes anzusetzenden Randbedingungen für Wohngebäude können der Tabelle 1 entnommen werden.

Die Primärenergiefaktoren f_p der zur Beheizung eingesetzten Energieträger werden wie bereits in der EnEV unverändert im GEG fortgeführt. Für den nicht erneuerbaren Anteil am Strom-Mix gilt seit 2016 der f_p -Wert von 1,8. Diese Reduktion berücksichtigt den steigenden Anteil der erneuerbaren Stromerzeugung der nächsten Jahre am Strom-Mix in Deutschland und favorisiert die rein elektrische Wärmeerzeugung über Wärmepumpentechnik.

Eine Neuerung des GEG stellt die verpflichtende Angabe der mit dem Gebäudebetrieb einhergehenden Treibhausgasemissionen als Produkt der CO_2 -Äquivalente aus dem Endenergiebedarf und den dazugehörigen Emissionsfaktoren dar. Die bisher freiwillige Angabe wird zukünftig mit standardisierten Emissionsfaktoren im Energieausweis als weitere Information erfolgen. Sie bedeutet allerdings keine neue oder zusätzliche Anforderungsgröße.

Als Referenzklima für Deutschland ist der Standort Potsdam mit den dort zugeordneten Klimadaten gemäß DIN V 18599-10 zu verwenden. Dies gilt sowohl für die energetische Bilanzierung von Heizung und Kühlung sowie für die im Rahmen dieser Berechnungen zu ermittelnden Heiz- und Kühllasten zur Bestimmung der Effizienz und Auslastung der Komponenten der Anlagentechnik. Diese Festlegung soll die Vergleichbarkeit der Gebäude mit einheitlichem Maßstab ermöglichen.

Wichtiger Hinweis:

Es soll nicht verschwiegen werden, dass vor allem bei der Nutzung regenerativer Energien der Gebäudestandort eine entscheidende Rolle spielt und sowohl die jährliche Heizzeit als auch das Solarstrahlungsangebot in Deutschland regional stark vom Referenzwert abweichen kann. Damit kann die Wirtschaftlichkeit regenerativer Energieeinsparmaßnahmen mit einem mittleren deutschen Klimastandort deutlich fehlbewertet werden und der baurechtliche rechnerische Wärmeschutznachweis als alleiniges Planungswerkzeug nicht ausreichend. Daher ist dringend zu beachten, dass diese Festlegungen des GEG den Planer nicht davon entbinden, die Auslegung der Heizung und ggf. Kälteerzeugung standortbezogen mit den dazu geltenden Normverfahren zu bestimmen.

Tabelle 1. Referenzausführung für Berechnungen gemäß DIN V 18599-2

Zeile	Bauteil/Systeme	Referenzausführung/Wert (Maßeinheit)
		Eigenschaft zu Zeilen 1–4
1.1	Außenwand (einschließlich Einbauten, wie Rollladenkästen), Geschossdecke gegen Außenluft	Wärmedurchgangskoeffizient $U = 0,28 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$
1.2	Außenwand gegen Erdreich, Bodenplatte, Wände und Decken zu unbeheizten Räumen	Wärmedurchgangskoeffizient $U = 0,35 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$
1.3	Dach, oberste Geschossdecke, Wände zu Abseiten	Wärmedurchgangskoeffizient $U = 0,20 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$
1.4	Fenster, Fenstertüren	Wärmedurchgangskoeffizient $U_w = 1,3 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ $g = 0,60$
1.5	Dachflächenfenster, Glasdächer und Lichtbänder	Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung Wärmedurchgangskoeffizient $U_w = 1,4 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ $g = 0,60$
1.6	Lichtkuppeln	Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung Wärmedurchgangskoeffizient $U_w = 2,7 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ $g = 0,64$
1.7	Außentüren, Türen gegen unbeheizte Räume	Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung Wärmedurchgangskoeffizient $U = 1,8 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$
2	Bauteile nach den Zeilen 1.1 bis 1.7	Wärmebrückenzuschlag $\Delta U_{\text{WB}} = 0,05 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$
3	Solare Wärmegewinne über opake Bauteile	wie das zu errichtende Gebäude
4	Luftdichtheit der Gebäudehülle	Bemessungswert n_{50}
5	Sonnenschutzvorrichtung	keine Sonnenschutzvorrichtung
6	Heizungsanlage	– Wärmeerzeugung durch Brennkessel (verbessert, bei der Berechnung nach § 20 Absatz 1 nach 1994), Erdgas, Aufstellung: • für Gebäude bis zu 500 m² Gebäudenutzfläche innerhalb der thermischen Hülle • für Gebäude mit mehr als 500 m² Gebäudenutzfläche außerhalb der thermischen Hülle – C I Energieeffiziente Gebäude – Das Gebäudeenergiegesetz – GEG Auslegungstemperatur 55/45 °C, zentrales Verteilsystem innerhalb der wärmeübertragenden Umfassungsfläche, innen liegende Stränge und Anbindeleitungen, Standard-Leitungslängen nach DIN V 4701-10:2003-08 Tabelle 5.3-2, Pumpe auf Bedarf ausgelegt (geregelt, Δp const), Rohrnetz ausschließlich statisch hydraulisch abgeglichen – Wärmeübergabe mit freien statischen Heizflächen, Anordnung an Außenwand, Thermostatventile mit P-Regler (nicht zertifiziert) nach DIN V 18599-5:2018-09
7	Anlage zur Warmwasserbereitung	– zentrale Warmwasserbereitung – gemeinsame Wärmebereitung mit Heizungsanlage nach Nummer 6 – bei Berechnung nach § 20 Absatz 1: - allgemeine Randbedingungen gemäß DIN V 18599-8:2018-09 Tabelle 6, Solaranlage mit Flachkollektor nach 1998 sowie Speicher ausgelegt gemäß DIN V 18599-8:2018-09 Abschnitt 6.4.3 – Verteilsystem mit Zirkulation, innerhalb der wärmeübertragenden Umfassungsfläche, innen liegende Stränge, gemeinsame Installationswand, Standard-Leitungslängen nach DIN V 4701-10:2003-08 Tabelle 5.1-2
8	Kühlung	keine Kühlung
9	Lüftung	Zentrale Abluftanlage, nicht bedarfsgeführt mit geregelter DC-Ventilator – nach DIN V 18599-10:2018-09: nutzungsbedingter Mindestaußenluftwechsel $n_{\text{Nutz}} = 0,55 \text{ h}^{-1}$
10	Gebäudeautomation	Klasse C nach DIN V 18599-11:2018-09

E Innovationen im Mauerwerksbau

**E 1 Digitale Transformation im Bauwesen –
von der Theorie zur Anwendung**

Mathias Obergrießer und Michael A. Kraus

Mauerwerk-Kalender 2022: Fassadengestaltung, Bauphysik, Innovationen.

Herausgegeben von Detleff Schermer und Eric Brehm.

© 2022 Ernst & Sohn GmbH & Co. KG. Published 2022 by Ernst & Sohn GmbH & Co. KG.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung 501	3	Stand der digitalen Transformation in der Anwendung 513
1.1	Aktueller Stand der Digitalisierung 501	3.1	Wie weit sind Akzeptanz und Implementierung der Methode BIM in der Praxis? 513
1.2	Gründe und Potenziale für die Digitalisierung 501	3.2	Welche Awf lassen sich mit dem aktuellen Wissen wirtschaftlich umsetzen? 513
2	Theoretische Aspekte der digitalen Transformation 502	3.3	Der Weg zur breiten Adaption von digitalen Werkzeugen und interdisziplinärer Zusammenarbeit 515
2.1	Der Weg vom analogen Planen und Bauen zur Vision Planen/Bauen 4.0 502	4	Fazit und Ausblick 517
2.2	Einblick in verschiedene Digitalisierungsstrategien im Bauwesen/Wohnungsbau etc. 504	5	Literatur 518
2.2.1	Vorhandene Methoden und digitale Werkzeuge 504		
2.2.2	Common Data Environment (CDE) und BIM-Anwendungsfälle 506		
2.2.3	Nutzung kollaborativer Prozesslandschaft im Bauwesen 508		
2.2.4	Robotik und KI als Wegbereiter zum seriellen Bauen 508		

1 Einleitung

1.1 Aktueller Stand der Digitalisierung

Nach *Henry Ford* besteht Erfolg darin, dass man genau die Fähigkeiten hat, welche im Moment gefragt sind. Diese Aussage gibt Grund zum Nachdenken und lässt sich auf viele Bereiche des Lebens übertragen, selbst auf die Digitalisierung im Bausektor. Um nun den aktuellen Erfolg der Digitalisierung in der Baubranche erkennen und einschätzen zu können, sollten folgenden Punkte genauer betrachtet werden: Wie viele und welche Digitalisierungsstrategien werden aktuell benötigt, welche Techniken stehen hierfür zur Verfügung und welche Fähigkeiten müssen diese Techniken, aber auch der darin involvierte Mensch besitzen, um eine praxisergebrachte und wirtschaftlich tragbare digitale Transformation der Baubranche durchführen zu können (vgl. Bild 1).

1.2 Gründe und Potenziale für die Digitalisierung

Derzeit erleben wir die Auswirkungen, Einschränkungen und Folgen einer Pandemie, die den Fokus auf künftige Formen des sozialen Miteinanders, des Wirtschaftens und des Umgangs mit Ressourcen lenken und noch stärker in den Fokus der Gesellschaft stellen wird. Die damit einhergehende Verknappung von Bauprodukten wirft zudem die Frage auf, inwiefern die digitale Transformation des Bauwesens als ein möglicher Lösungsansatz für agileres und situationsbedingtes Planen und Bauen betrachtet werden kann.

Stand heute befinden wir uns bereits seit einigen Jahren mitten in der Digitalisierung der Baubranche, die aktuell eine sehr zentrale Rolle in der Branche eingenommen hat. Hierzu wurde und wird eine Vielzahl an verschiedensten Strategien erprobt, neu entwickelt und in den unterschiedlichsten Bereichen der Branche eingeführt. Vor allem in der Phase zur Planung der Bauwerke existiert geradezu eine Vielzahl an digitalen Lö-

sungen, die beispielsweise eine integrierte Planung unterstützen, eine zentrale Haltung der Daten vorsehen oder eine durchgängige und konsistente Planungsphilosophie ermöglichen [1]. Informationen werden dabei nicht nur mehr auf Plänen oder Dokumenten abgesetzt, vielmehr werden sämtliche geometrischen und alphanumerischen Informationen des Bauwerks in einer Art visuellen Datenbank – dem 3D-Modell – abgelegt. Dabei spielt das 3D-Modell eine zentrale Rolle, da dieses die visuelle Kommunikationsplattform für den Menschen darstellt. Komplexe Datenstrukturen inklusive aller Bauteil- und Prozessabhängigkeiten, die während des Lebenszyklus eines Bauwerks auftreten, lassen sich erst dadurch konsistent und verständlich für den Menschen abbilden. Erst durch die datenbankorientierte Sichtweise, Verwaltung und Nutzung der lebenszyklusorientierten Informationen eines Bauwerks ist eine erfolgreiche Wandlung der Branche in eine digital verknüpfte und silofreie Bauwelt greifbar nahe.

Ziel kann und darf es aber nicht sein, die Daten nur zu sammeln, sondern diese auch zu nutzen. Aus diesem Grund stellt die aktuelle Digitalisierungsform nur einen Zwischenschritt zur nächsten Stufe der Digitalisierung dar, in der die Daten dazu genutzt werden, um die Baubranche noch effektiver, ressourcenschonender und nachhaltiger ausgestalten zu können. Eine Form dieser digitalen Transformation ist zum Beispiel der Einsatz von künstlicher Intelligenz (KI) mit der mittelfristig fast jede Person und jedes Unternehmen in Kontakt kommen wird. Die Frage ist also nicht wann, sondern wie die digitale Transformation erfolgreich und gewinnbringend in die Praxis, Forschung und Lehre implementiert werden kann.

Grundsätzlich verspricht die digitale Transformation eine Vielzahl an Potenzialen, die über die aktuell in der Praxis ankommende Methode des Building Information Model (BIM) bis hin zum künftigen Einsatz von KI und/oder (teil)autonomen Fahr- und Produktionssystemen als signifikante Verschiebung und Reduk-



Bild 1. Vision der digitalen Transformation im Bauwesen – Fähigkeiten, Technologien und vernetzte Wertschöpfungsstrategien anhand eines digitalen Zwillings

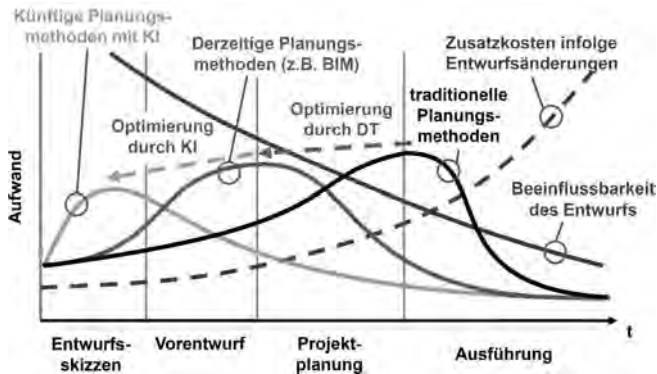


Bild 2. Effekte von BIM und KI auf die Verschiebung des Planungsaufwands gegenüber dem Status quo in verschiedenen Bauprojektphasen (aus [2])

tion des Planungs- und Herstellungsaufwands gegenüber dem aktuellen Status quo verläuft. Somit ergeben sich Kosteneinsparungen bei gleichzeitiger Steigerung der Effizienz und Entscheidungssicherheit durch die Berücksichtigung und Analyse der gesammelten Bauwerks- und Prozessdaten (vgl. Bild 2).

Im Zuge der Digitalisierung der Baubranche ist aber auch die Erkenntnis, dass digitale Systeme und insbesondere die KI auch in Zukunft nicht alle Arbeiten und Berufsbilder automatisieren sowie keine Entscheidungen automatisiert-datengestützt treffen werden, von großer Bedeutung. Mittelfristig wird sich hingegen deutlich abzeichnen, dass durch die Entwicklung und Etablierung sog. KI-Mensch-Interaktionssysteme signifikante technische und wirtschaftliche Vorteile gegenüber dem Status quo erzielt werden und somit der Mensch als finaler Entscheidungsträger weiterhin im Fokus und in der Verantwortung bleibt. Die Pareto-optimale Natur vieler technischer Probleme bedingt eine finale Entscheidung einer menschlichen Person mit Fachwissen, unabhängig davon, wie viele Daten zu einem Problem vorhanden, wie ausgeklügelt die KI-Algorithmen oder automatisiert vorhandene Prozesse sind. Auch in den nächsten beiden Dekaden wird die Technik den Menschen unterstützen und nicht umgekehrt.

Leider ist dieser technische, aber auch menschliche Wandel nicht einfach zu realisieren und muss aktuell eine Vielzahl an Hürden zur erfolgreichen Implementierung in die Praxis nehmen. Insbesondere die Kopplung der Modelldaten aus der Planungsphase in die Umsetzungsphase und wieder zurück stellt die Baubranche täglich vor große Herausforderungen.

2 Theoretische Aspekte der digitalen Transformation

2.1 Der Weg vom analogen Planen und Bauen zur Vision Planen/Bauen 4.0

Zum Einstieg in das komplexe Themengebiet der digitalen Transformation soll zunächst ein kurzer Überblick über die Entwicklung der Vision der digitalen

Transformation „Planen und Bauen 4.0“ gegeben werden. Dieser Abschnitt dient zur Verdeutlichung, woher wir kommen, wohin wir gehen und zum besseren Verständnis und der Nachvollziehbarkeit des aktuellen Entwicklungsprozesses und dessen aktueller Entwicklungsgeschwindigkeit im Sinne einer Art Technologiefolgenabschätzung.

Seit Beginn der Menschheit plant, baut und betreibt der Mensch Bauwerke. Zuerst nutzte er die von der Natur geschaffenen Höhlen, dann baute er mobile Zelte in Form einer Art historischen Baukastensystems. Anschließend wurde er sesshaft, was zur Folge hatte, dass seine Bauwerke massiver wurden, um einen längeren Betriebslebenszyklus des Bauwerks sicherstellen zu können. Oberflächlich betrachtet befindet er sich in dieser Phase immer noch, wobei sich die Größe, der Komfort, die Komplexität, der Anspruch oder die Vielfalt der Bauwerke über die Jahre verändert haben. Mittlerweile gibt es Bauwerke, die mobil verlagert werden können und solche, die digital vernetzt sind (Smart Building) oder Bauwerke, die bis fast 1000 m in den Himmel ragen. Alle diese Besonderheiten sind eine Errungenschaft des technischen Fortschritts und der damit einhergehenden Technologien [3].

In Bild 3 sind hierzu die verschiedenen Evolutionsstufen vom ursprünglichen Planen und Bauen in der Antike bis hin zum automatisierten und industrialisierten Planen und Bauen – im Sinne eines Planen und Bauen 4.0 als Pendant zu Industrie 4.0 – dargestellt. Dabei gilt es hervorzuheben, dass sich über die gesamten Entwicklungsstufen hinweg der Prozess zur Umsetzung eines Bauprojekts von Grund auf nicht verändert hat. Nach wie vor gelten die generellen Prozessbausteine Entwerfen und Planen eines Bauwerks, Vorbereitungen zur Umsetzung eines Bauwerks, Errichtung und Betrieb des Bauwerks bis hin zum Rückbau bzw. Umbau des Bauwerks. Verändert hat sich über die Jahre nur die Art und Weise mit welcher Technik geplant und gebaut wird.

In der Planung manifestiert sich dies durch den Wechsel vom Gedankenmodell im Kopf und der mündlichen Informationsübermittlung auf der Baustelle hin zur Abbildung und Kommunikation der Bauwerksdaten auf dem Papier, die mithilfe von Stift, Lineal



Bild 3. Historische Entwicklung Planen und Bauen 4.0

und Zirkel erzeugt wurden. Dieser papierbasierte Planungsprozess wurde industrialisiert, indem Zeichenbretter und Rapidographen zur Anwendung kamen. Der Wechsel von dieser analogen Welt in die digitale Welt erfolgte durch die Einführung digitaler Werkzeuge, wie zum Beispiel 2D-CAD-Systeme, die aktuell durch eine vernetzte und modellbasierte Arbeitsweise revolutioniert werden. Dabei erfolgt die Planung eines Bauwerks anhand eines datenbankorientierten und mit vielen alphanumerischen und geometrischen Informationen angereicherten dreidimensionalen Bauwerksinformationsmodells – kurz BIM.

Zukünftig soll auf Basis dieser strukturierten, koordinierten und modellorientierten Informationsverwaltungsplattform – dem BIM-Modell – beispielsweise die Steuerung der Fertigungsmaschinen in der Baufabrik oder die Steuerung der Maschinen auf der Baustelle zur (teil)automatisierten Herstellung einzelner Bauteile oder ganzer Bauwerke erfolgen. Eine hohe Ausnutzung der Wertschöpfungskette der einmal digital generierten Daten ist die Folge.

Für die Bauumsetzung lässt sich ein analoges Schema ableiten. Zu Beginn wurden die Bauteile händisch und ohne technische Hilfsmittel hergestellt. Heutzutage gibt es ein reiches Set an „Helferlein“ auf der Baustelle bzw. im Werk, die die Umsetzung der Bauaufgabe enorm erleichtern. Angefangen von der Betonmischmaschine bis hin zur hochleistungsfähigen CNC-Fräsanlage oder modernsten Vermessungsgeräten wie zum Beispiel Laserscanner oder Coptersysteme. Dabei erfolgt die Realisierung des Bauwerks entweder traditionell auf Basis von Plandaten oder direkt durch eine integrierte Übergabe der digitalen Bauwerks- bzw. Bauteilinformationen an die Fertigungs- bzw. Baumaschinen oder Vermessungsgeräte. Die Herstellung des Bauteils bleibt aber im Grundsatz gleich, nur die Art und Weise, wie es hergestellt wird, hat sich durch den Einsatz neuer Technologien verändert.

Hieraus kann nun der Rückschluss gezogen werden, dass während unserer gesamten Baugeschichte eine kontinuierliche Modernisierung unsere Bautätigkeit, egal ob beim Planen oder beim Bauen, stattgefunden hat. Die Art und der Umfang des Modernisierungsle-

vels orientiert sich dabei einerseits an dem aktuellen Baubedarf und der Komplexität der zu errichtenden und betreibenden Bauwerke. Andererseits stellen aber auch die vorhandenen Ressourcen zur Umsetzung der Bauaufgabe oder die aktuell zur Verfügung stehenden technologischen Möglichkeiten weitere wichtige Faktoren dar. Die digitale Transformation ist somit das Resultat unserer bisherigen Innovationen und der nächste Schritt in die evolutionäre Zukunft.

Es gilt aber auch festzuhalten, dass die Digitalisierungs-offensive nicht nur das Ergebnis unseres bisherigen Schaffens ist. Es resultiert auch aus der Erkenntnis, dass gewisse wiederkehrende Muster während der Planung, der Umsetzung und des Betriebs eines Bauwerks auftreten. Erst nach Erlangen dieser Erkenntnis war es möglich, eine wirtschaftliche Implementierung von Digitalisierungsansätzen und -strategien und den daraus resultierenden digitalen Werkzeugen durchzuführen. Standards stellen dabei eine essenzielle Grundlage zur Digitalisierung eines Prozesses dar.

Dies bedeutet aber nicht, dass sich standardisierte Abläufe und kreatives, flexibles Schaffen gegenseitig ausschließen! Eher gilt der Grundsatz, Standards und Kreativität in Einklang zu bringen, indem interdisziplinäre, integrierte und digital vernetzte Strategien entwickelt werden, die beiden Ansprüchen entsprechen können. Dabei geht es vornehmlich nicht nur um die Entwicklung von digitalen Werkzeugen, sondern um die Schärfung des Bewusstseins, wie zukünftig geplant und gebaut wird. Nicht isoliert als Insel, sondern als kollaboratives, fächerübergreifendes und partnerschaftliches Team. Am besten über alle Lebenszyklusphasen eines Bauwerks hinweg, was eine große Herausforderung in der Architektur- und Baubranche darstellt.

Dabei gilt es, das Merkmal, dass die Digitalisierung als ein Querschnittsthema einzustufen ist, stets in Erinnerung zu rufen. Insbesondere dann, wenn die einzelnen Projektphasen und die hierzu erforderlichen Prozessbausteine nur für sich allein als Insel betrachtet werden – zwar digital, aber nicht vernetzt. Diese Isolation führt trotz der Digitalisierungsanstrengungen und -investitionen häufig dazu, dass die Digitalisierung eines Ablaufs keine Minderung des Workloads, sondern

eher einen deutlichen Anstieg des Workloads hervorruft. Ein wirtschaftlich negatives Ergebnis kann die Folge sein.

Aktuell ist dieser Effekt in der aufwendigen Attributierung und geometrischen Detaillierung der 3D-Bauwerksmodelle in der Planungsphase erkennbar, da der Nutzen der Daten erst in einer späteren Lebenszyklusphase, wie z. B. der Bauausführung oder des Betriebs, eintritt! Planer können häufig keinen Mehrwert daraus erkennen bzw. generieren. Diesen Effekt nutzen Skeptiker der Digitalisierung gern, um den mangelhaften wirtschaftlichen Mehrwert der Digitalisierung belegen zu können (vgl. Bild 9a). Die Betrachtung des wirtschaftlichen und ressourcen-technischen Potenzials, die sich aus der Digitalisierung über den gesamten Lebenszyklus ergibt, bleibt dabei oftmals außen vor.

Zur Lösung dieses Problems gilt es daher drei Punkte zu beachten. Erstens, die Entwicklung von digitalen Werkzeugen, die es ermöglichen, den höheren Workload, der sich aus der Digitalisierung ergibt, zu kompensieren. Zweitens, die digitale Vernetzung der einzelnen am Projekt beteiligten Personen, Organisationen und Technologien durch die Förderung und Umsetzung einer interdisziplinären und kollaborativen Denk- und Arbeitsweise zu steigern. Drittens, die Entwicklung bzw. die Anwendung praktikabler Digitalisierungsstrategien im Projekt oder im Unternehmen umzusetzen, indem effektive Prozessabläufe durch die Analyse und Visualisierung der bestehenden Prozesslandschaft herausgearbeitet werden.

2.2 Einblick in verschiedene Digitalisierungsstrategien im Bauwesen/Wohnungsbau etc.

2.2.1 Vorhandene Methoden und digitale Werkzeuge

Unter dem Schlagwort der „digitalen Transformation“ wird ein großes Portfolio an Methoden, Technologien und Kollaborationsstrategien verstanden. Wie bereits eingangs erwähnt, ist eine der am Bau bekanntesten Digitalisierungsmethode die Methode des Building Information Model (BIM). Kurz gesagt hat BIM als Ziel, alle geometrischen und alphanumerischen Informationen, die während des Lebenszyklus eines Bauwerks entstehen, anhand eines zentral verwalteten und digitalen Bauwerksinformationsmodells, dem sogenannten digitalen Zwilling, abzubilden. Momentan existieren mehrere Definitionen eines digitalen Zwillings, deren Inhalte sich je nach Disziplin mehr oder weniger stark unterscheiden. Allen Definitionen gemein ist die Quintessenz, dass ein digitaler Zwilling ein digitales Replikat eines physisch gebauten Objekts darstellt, welches eine Verbindung zum physischen Zwilling besitzt [4–10]. Mit diesem Ansatz kann eine dynamische virtuelle Darstellung über den gesamten Lebenszyklus hinweg garantiert werden. Zudem erlaubt die Verwendung von (Echtzeit-)Daten ein Verständnis,

Lernen, Nachsteuern und dynamisches Neukalibrieren des digitalen Zwillings zu beliebigen Zeitpunkten. Durch Analysen mithilfe des digitalen Zwillings stehen weiterhin probabilistische Simulationen zur Systemoptimierung und verbesserten Entscheidungsfindung zur Verfügung. Derzeit werden digitale Zwillinge in verschiedenen Industriebereichen eingesetzt, um Planung, Betrieb und Wartung von physischen Assets bzw. Anlagen, Systemen und Herstellungsprozessen zu optimieren. Dabei können physische Objekte virtuell leben und mit anderen Objekten, Maschinen und Personen interagieren.

Im Gegensatz zum digitalen Zwilling grenzen sich die Begriffe des digitalen Modells (z. B. ein BIM-Modell, vgl. Bild 4, links) sowie des digitalen Schattens (Bild 4, Mitte) mit keiner bzw. unidirektionaler Verbindung zum physischen Zwilling ab.

Für die physischen und digitalen Zwillinge selbst kann ein Lebenszyklus definiert werden, welcher synchron zur PLM- bzw. Lebenszyklusphase eingeteilt wird. Insbesondere ist die BIM-Technologie von derjenigen der Zwillinge eingeschlossen. Die nahtlose Übertragung von Daten und Informationen ist durch die Synchronisierung von physischer und virtueller Welt sichergestellt, sodass die virtuelle Einheit die Lebensdauer ihres entsprechenden physischen Systems widerspiegelt und Entscheidungsinformationen an die reale Welt zurücksenden kann. Zwischen dem digitalen und dem realen Zwilling werden drei Arten von Informationen ausgetauscht: faktische/physische, anleitende sowie semantische [12].

Es ist zu beobachten, dass die derzeitige akademische und populärwissenschaftliche Literaturlage im Bauwesen häufig nicht scharf zwischen den Begriffen des digitalen Zwillings und BIM abgrenzt, vielmehr werden beide Begriffe häufig synonym verwendet. Ein wesentliches Merkmal eines digitalen Zwillings ist aber die Interaktion mit dem physischen Zwilling, sodass an dieser Stelle in Übereinstimmung mit [7, 13, 15, 16] betont werden soll, dass eine Gleichheit von BIM und digitalem Zwilling nicht per se gegeben ist. Digitale Zwillinge werden heutzutage im Bauwesen hauptsächlich in der Betriebs- und Instandhaltungsphase [10, 16] eingesetzt. Insbesondere hat sich u. a. bei öffentlichen und privaten Auftraggebern aber die Erkenntnis eingestellt, dass die Informationen aus den BIM-Modellen von baulichen Anlagen einen über den baulichen Wert der Anlage hinausgehenden Wert besitzen. Diese bilden den digitalen Ausgangspunkt mehrskaliger Informationssysteme, zum optimalen Betrieb einzelner Anlagen auf der Mesoskala und sogar ganzer Anlagensysteme auf der Makroskala. Der Lebenszyklus von BIM-Modellen, wo neben dem as-built (gebauten Zustand) auch die Zustände as-planned (planmäßig) und as-designed (wie entworfen) sowie as-performed (ausgeführt) zu berücksichtigen sind, erzwingt ein lebenszyklusbegleitendes Update [13, 16] und ermöglicht die synonyme Betrachtung von BIM-Modellen als eine Art digitalen Zwilling.

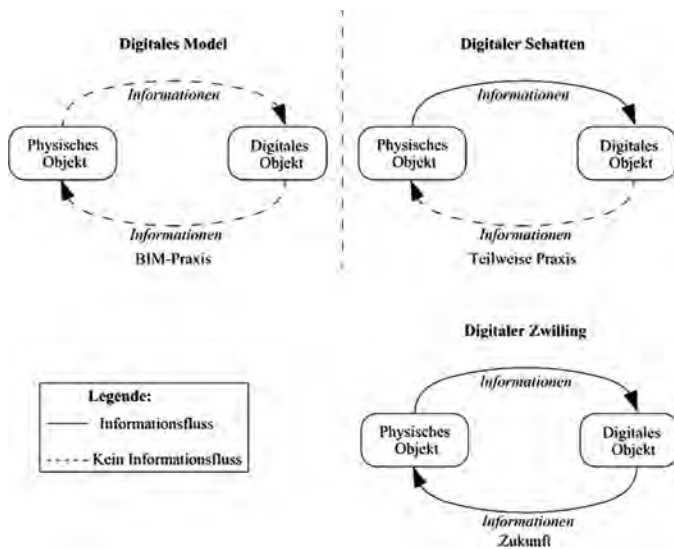


Bild 4. Veranschaulichung der Begriffe des digitalen Modells, eines digitalen Schattens und eines digitalen Zwillings (aus [11])

Durch die Einführung eines zentral verwalteten und lebenszyklusorientierten BIM-Modells/digitalen Zwillings ist nun die multiple Nutzung der einmal im digitalen Informationsmodell hinterlegten Bauwerksdaten möglich, was sich in einer Minimierung der Informationsverluste und einer Steigerung der Informationsqualität widerspiegelt. Die Methode BIM dient im Sinne eines Bauwerksinformationsmodellierungsprozesses aber nicht nur dazu, Daten anhand eines virtuellen Abbilds/digitalen Zwillings zu sammeln, sondern ermöglicht es auch, eine koordinierte Verteilung der Informationen und die Steuerung der Prozesse zur Planung, Umsetzung, zum Betrieb und Rückbau eines Bauwerks zu managen. Der Reifegrad des virtuellen, aber auch des realen Bauwerks dient dabei als Indikator für die Ableitung und Koordination der verschiedenen Informationsstufen sowie Prozessphasen und Prozessbausteine. BIM lässt sich somit als eine digital vernetzte und kooperative Arbeitsmethode auf Basis eines digitalen Zwillings auffassen, mit dessen Hilfe sich die notwendigen Lebenszyklusprozesse eines Bauwerks umsetzen lassen. Digitale Werkzeuge unterstützen dabei diesen komplexen Vorgang.

Durch den Einsatz digitaler Werkzeuge und die Anwendung eines modellbasierten Ansatzes ist es nun mithilfe von BIM möglich, den Prozess zur Planung eines Bauwerks in eine frühere Leistungsphase zu verlagern (vgl. Bild 2). Dies führt zu dem positiven Effekt, dass die Kosten zur Planung und zur Umsetzung eines Bauwerks aufgrund der höheren Informationstiefe zu einem früheren Zeitpunkt besser bewertet und beeinflusst werden können. Diese Verlagerung führt aber nach [17] auch zu dem Nebeneffekt, dass zu einem früheren Zeitpunkt die erforderlichen Bauwerksinformationen zur Planung und Umsetzung des Bauwerks definiert werden bzw. vorgehalten werden müssen (vgl. Bild 5a). Oftmals existieren diese Informatio-

nen noch nicht oder benötigen noch eine Abstimmung mit den verschiedenen Prozessbeteiligten, die zu diesem Zeitpunkt aufgrund der klassischen leistungphasen-orientierten Vergabeform teilweise noch nicht feststehen (z. B. Baufirma, Betreiber etc.). Selbst der Bauherr kann oftmals keine ausreichende Informationstiefe liefern, da er sich zu diesem frühen Zeitpunkt noch keine Gedanken über die Details gemacht hat (welche Fliesen, welche Putzstruktur, wo liegen die Lampen und Steckdosen, welche Heizung etc.).

Aktuell wird dieses Problem in der Praxis gelöst, indem vorgefertigte digitale Bauteil-Bibliotheken (Assistenten, Familien, Favoriten etc.) eingesetzt werden, die mit einer Vielzahl von Attributen und geometrischen Informationen ausgestattet sind. Die Entwicklung derartiger digitaler Werkzeuge stellt einen der zentralen Schlüssel zur erfolgreichen Implementierung der Methode BIM in der Planungspraxis dar. Leider existieren derartige Tools noch viel zu wenig am Markt, wie aus Bild 5b ersichtlich ist [18]. Aus diesem Grund ist in vielen Bereichen des Bauwesens, wie z. B. zur Modellgenerierung, zur Modelldatennutzung und -auswertung, aber auch zur Pflege der Modelldaten oder zur Rückkopplung der Bauwerksdaten ins Modell, noch eine Vielzahl an software-spezifischen Entwicklungsarbeiten zu leisten.

Zusammenfassend kann somit festgestellt werden, dass derzeit neben den technischen Schwierigkeiten auch theoretisch-fachwissenschaftliche Fragen zu BIM und digitalen Zwillingen offenbleiben. Ein wirtschaftlicher Einsatz der BIM-Methode in der täglichen Praxis zum Beispiel zur Erzeugung eines digitalen Zwillings ist derzeit nicht ohne Weiteres möglich, stellt aber einen vielversprechenden Ansatzpunkt dar.

Es gilt aber auch festzuhalten, dass die Anwendung der Methode BIM allein noch keine vollständige Digitalisierung der Baubranche darstellt. Weitere agile Metho-

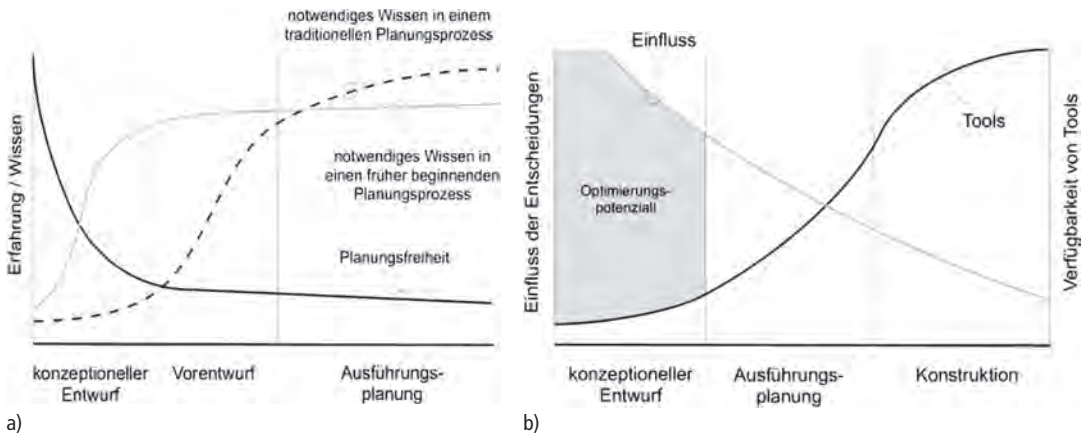


Bild 5. Nebeneffekt bei der Anwendung von BIM a) auf das erforderliche Knowhow (nach [17]) und b) auf die Technologie (nach [18])

den wie Lean Management, Last Planner oder Scrum, aber auch Automatisierungsstrategien, die den Einsatz von robotergestützten Linienproduktionen bzw. digital vernetzter Baumaschinensteuerung bis hin zu autonom fahrenden Baugeräten oder der Nutzung von KI vorsehen, sind notwendige Komponenten, um eine vollständige und effiziente Digitalisierung der Baubranche umsetzen zu können. Selbst die Anwendung neuer modularer, serieller Bauweisen gilt es zu prüfen.

2.2.2 Common Data Environment (CDE) und BIM-Anwendungsfälle

Wie in den vorangegangenen Abschnitten erwähnt, stellt die Umsetzung eines BIM-Modells keine triviale Aufgabenstellung dar. Besonders, da der Anspruch vorherrscht, sämtliche Daten des Bauwerks, die über den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks entstehen, anhand eines zentralen Datenmodells strukturiert und bauteilorientiert vorzuhalten und verwalten zu wollen [1]. Eine echtzeit-orientierte Nutzung der Bauwerksdaten innerhalb einer digital strukturierten Umgebung, die z. B. eine Versionierung und Verwaltung der Bauwerksinformationen automatisch vornimmt oder ein synchrones Arbeiten an einem Bauteil erlaubt, ist das primäre Ziel. In der Softwarelandschaft werden diese Plattformen als Common Data Environment (CDE) bezeichnet. Leider konnten sich am derzeitigen Markt noch keine CDE-Systeme in der Praxis etablieren, da zum einen die komplexe und stark fragmentierte Prozess- und Datenstruktur bei gleichzeitig ständigem Wechsel der Projektbeteiligten eine große Hürde darstellt. Ständig müssen die Fragen geklärt werden: Wer besitzt und betreibt die Plattform?, Wem gehören die Daten?, Wer hat welche Rechte? u. v. m. Zum anderen stellt die Vision, sämtliche Daten und Abläufe anhand eines zentralen Datenmodells zu steuern, höchste Ansprüche an die Technologie. Es

existieren zwar erste Ansätze in der Forschung, wie eine zeitgleiche Nutzung der Modelldaten von mehreren Nutzern möglich ist [19], für den täglichen Einsatz in der Praxis sind diese aber noch zu unausgereift. Daher wurde die komplexe Vision eines zentral verwalteten und synchron genutzten Datenmodells in ingenieurmäßiger Manier vereinfacht, indem das Bauwerksmodell analog zu den Fachdisziplinen aus der Bauplanung und Bauumsetzung in kleinere Fachmodelle wie zum Beispiel Architekturmodell, Tragwerks- und technische Gebäudeausrüstungsmodelle oder andere Simulationsmodelle unterteilt (vgl. Bild 6).

Dadurch konnte die sehr komplexe Datenstruktur eines zentralen Modells auf eine Vielzahl an kleineren Datenstrukturen reduziert und in eine prozessorientierte sowie parallel nutzbare Informationsverwaltungsstrategie transformiert werden. Häufig werden in der Praxis diese BIM-Fachmodelle auch als BIM-Anwendungsfälle bezeichnet, da das Fachmodell letztendlich das visuelle Resultat der Arbeitstätigkeit aus der BIM-Anwendung darstellt. Ein weiterer Nebeneffekt dieser Unterteilung ist, dass die seit jeher bekannten Arbeitsstrukturen zum Planen, Bauen und Betreiben eines Bauwerks nicht stark verändert werden, was sich in einer größeren Akzeptanz durch die Anwendenden und in einer schnelleren Adaption der Technologie in der Praxis widerspiegelt. Die aktuell bekanntesten BIM-Anwendungsfälle bzw. die daraus resultierenden BIM-Fachmodelle sind im Bild 7 in Anlehnung an [20] aufgeführt.

Es gilt aber auch anzumerken, dass jede Unterteilung einer Aufgabe in kleiner Unteraufgaben bestimmte Nebeneffekte hervorruft. In diesem Fall ist es insbesondere die Vorhaltung von Schnittstellen, die eine Zusammenführung der Bauwerksdaten zu einem gemeinsamen Datenmodell in der CDE oder zu einer anderen Informationsmanagementplattform ermöglicht. Dabei haben sich in der Praxis zwei Ansätze durchge-