

11 Vorgefertigte Betonerzeugnisse

11.1 Produktgruppen und Betonarten

Die *werksmäßige Herstellung* von *Betonerzeugnissen* ist so alt wie die Betonanwendung. In stationären Betonwerken werden heutzutage eine Vielzahl von verschiedenen Betonwaren, wie z. B. Betonpflastersteine, Betonmauersteine, Betonrohre, und von großformatigen Betonfertigteilen, wie z. B. Wände, Decken, Stützen, aber auch ganze Gebäudeeinheiten, wie z. B. Garagen, Raumzellen, hergestellt [Ste1, BGB1]. Da die stationären Herstellverfahren für die verschiedenen Produktarten sehr unterschiedlich sind, unterscheiden sich auch die jeweils verwendeten Betonarten. In der **Tafel II.11.1-1** sind für die wesentlichen Produktgruppen, die in den Betonwerken hergestellt werden, die üblicherweise verwendeten Betonarten angegeben.

Die Auswahl der jeweiligen Betonart ergibt sich aus der Erfüllung der Produkteigenschaften und aus den Bedingungen einer technisch und wirtschaftlich optimalen Produktionsmethode. Sinnvollerweise erfolgt bei jedem industriellen Fertigungsprozess eine Optimierung der Einzelschritte. Für die Fertigung in Betonwerken bedeutet dies z. B. die Festlegung der Betonart bzw. die Wahl der Frisch- und Festbetoneigenschaften. Die große Variationsbreite, die die moderne Betontechnologie bietet, ermöglicht optimal auf die Herstelltechnik und die Produkteigenschaften abgestimmte Betonrezepturen.

Es gehört zu den Grundanforderungen an die Betontechnologie bei der werkmäßigen Herstellung von Betonwaren oder Betonfertigteilen, dass die Erzeugnisse nach der Formgebung so früh

Tafel II.11.1-1: Wesentliche Produktgruppen der in Betonwerken hergestellten Betonfertigteile und Betonwaren mit Hinweisen zu den dafür im Allgemeinen verwendeten Betonarten

Produktgruppe	Produktnorm
tragende/großformatige Betonfertigteile – Wand-, Decken-, Dach- und Skelettbauteile – Raumzellen, z. B. Garagen – massive Wände mit hoher Wärmedämmung	DIN EN 206-1 sowie DIN 1045-2 und -4 DIN EN 13978-1 DIN 4232 (prEN 1520) Zulassung (prEN 1520)
Mauersteine aus Beton – Hüttensteine – Hohlblöcke – Vollsteine, Vollblöcke – Steine aus Normalbeton – Porenbetonsteine	DIN 398 DIN 18151 DIN 18152 (prEN 771-3) DIN 18153 DIN 4165 (prEN 771-4)
Straßenbauerzeugnisse aus Beton – Pflastersteine – Platten – Bordsteine	DIN EN 1338 (DIN 18501) DIN EN 1339 (DIN 485) DIN EN 1340 (DIN 483)
Rohre und Schächte aus Beton – unbewehrte Betonrohre – Schächte – Stahlbetonrohre	DIN 4032 DIN 4034 DIN 4035
Betonmaste	DIN EN 12843
Betondachsteine	DIN EN 490
Spannbetonschwellen	DIN EN 13230-2

	Erhärtung		übliche Betonarten
	in Form	sofort entformt	
	X		– jeweils Normalbeton und gefügedichter Leichtbeton
	X X (im Autoklaven)		– haufwerksporiger Leichtbeton – Porenbeton
		X	– gefügedichter Beton oder haufwerksporiger Leichtbeton
	X (im Autoklaven)		– Porenbeton
		X X X	erdfeuchter Beton, gefügedicht mit möglichst hoher Grünstandfestigkeit überwiegend in zweischichtiger Ausführung
	X	X X	möglichst dichter Normalbeton erdfeucht mit hoher Grünstandfestigkeit oder plastischer Konsistenz Einsatz je nach Herstellverfahren
	X		Normalbeton, verarbeitet im Schleuderbeton-Verfahren
		X	erdfeuchter Beton
	X		Normalbeton hoher Festigkeit

wie möglich die nötige Festigkeit erreichen, damit sie aus der Form herausgehoben oder gedrückt werden können und dass sie außerhalb des Produktionsbereichs bis zum Transport zur Einbaustelle lagern können [Dah4, Wie3]. Daraus resultieren zwei grundlegende Produktionsweisen:

1. Beton mit plastischer Konsistenz wird in Formen gefüllt, durch Außenrüttler verdichtet und erhärtet dort, bis das entstandene Bauteil aus der Form gehoben und zur weiteren Erhärtung gelagert werden kann.

Um eine hohe *Frühfestigkeit* zu erreichen, werden im Allgemeinen Betone mit einem, im Vergleich zu Ortbetonen relativ geringem Wasserzementwert und mit möglichst schnell erhärtenden Zementen eingesetzt. Zur weiteren Frühfestigkeitssteigerung kann eine Wärmebehandlung (s. Abschnitt II.11.2) zur Erhärtungsbeschleunigung angewendet werden.

2. Ein *erdfeuchter Beton* wird in eine Form gefüllt und unter hoher Intensität (Rüttel-Press-Verdichtung) so verdichtet, dass aufgrund der so genannten *Grünstandfestigkeit* ein sofortiges Entformen möglich ist und sich das frische Produkt praktisch nicht verformt [Wie1]. In diesem Zustand erhärtet das Produkt.

Ein erdfeucht zu verarbeitender Beton hat einen geringen Wasserzementwert, der in der Regel bei 0,36 bis 0,38 liegt. Er resultiert aus einem für das Erreichen der Grünstandfestigkeit erforderlichen niedrigen Wassergehalt der Mischung.

Die erzielbare Grünstandfestigkeit hängt im Wesentlichen von der Menge des Mehlkorns und dem Wassergehalt sowie von der einsetzbaren Verdichtungsenergie ab. Erfahrungsgemäß lässt sich eine Optimierung der Frischbetonzusammensetzung nur produktionsspezifisch durchführen. Dabei ist die vertretbare Schwankungsbreite beim Wassergehalt sehr

gering. Denn die Spanne zwischen der Wassermenge im Feinmörtel, die eine möglichst gute Verdichtbarkeit erlaubt, und derjenigen, die die nötige Formstabilität bzw. das Zusammenhaltevermögen/die Kohäsion ergibt, ist sehr eng. Ein Maß für die Grünstandfestigkeit ist die Grün-Druckfestigkeit, d. h. die Festigkeit eines sofort entformten, also noch nicht hydraulisch erhärteten Betonkörpers (s. Abschnitt II.9.4).

Neben diesen beiden Herstellmöglichkeiten, für die je nach Zusammensetzung Normal- oder Leichtbeton oder auch hochfeste Betone eingesetzt werden können, kommen in Betonwerken die beiden nachfolgend beschriebenen Betonarten zum Einsatz, wenn Bauteile mit hoher Wärmedämmung gefordert sind.

Haufwerksporiger Leichtbeton

Eine spezielle Variante des Leichtbetons ist der *haufwerksporige Leichtbeton*. Er besteht aus leichten Gesteinskörnungen gem. DIN 4226-2, die mit Zementleim bzw. -mörtel umhüllt und punktweise verbunden bzw. „verklebt“ sind. Das Porenvolumen kann durch die Zusammensetzung der Mischung, d. h. durch die Kornabstufung der Gesteinskörnung, den Leim- bzw. Mörtelgehalt sowie deren Zusammensetzung und Konsistenz variiert werden. Dadurch können *Rohdichten*, z. B. bei Wänden gem. DIN 4232, zwischen 0,5 und 2,0 kg/dm³ sowie Festigkeiten von LB 2 bis LB 8 eingestellt werden. Entsprechend der Rohdichteunterschiede variieren auch die Wärmedämmfähigkeiten. Im Bereich der Rohdichte von 0,6 bis 0,8 kg/dm³ liegen die Rechenwerte der *Wärmeleitfähigkeit* bei 0,15 bis 0,24 W/m · K. In ähnlicher Größenordnung liegen die Werte für gemauerte Wände aus haufwerksporigen Leichtbetonsteinen [Bra 1].

Aus haufwerksporigem Leichtbeton werden Mauersteine und unbewehrte Platten für Wände sowie großformatige Wand- und Deckenbauteile gefertigt.

Haufwerksporige, mit normaler Gesteinskörnung hergestellte Betone, d. h. Einkornbetone, eignen sich aufgrund der Porosität für Drainage- oder versickerungsfähige Betonwaren, z. B. Filterrohre oder wasserdurchlässige Pflastersteine.

Porenbeton

Porenbeton ist hinsichtlich der Porenstruktur und der mineralischen Matrix eine besondere Art des Leichtbetons. Er wird hergestellt, indem einem Mörtel aus feingemahlenem, quarzhaltigen Sand, Zement und/oder Kalk und Wasser ein Treibmittel, z. B. Aluminiumpulver, zugesetzt wird. Bei der Reaktion des Aluminiums mit dem alkalischen Wasser entsteht Wasserstoff, der den Mörtel aufbläht und dabei die Makroporen mit einem Durchmesser von 0,5 bis 1,5 mm bildet. Es erfolgt eine Dampfhärtung im Autoklaven bei rd. 190 °C und einem Druck von 12 bar innerhalb von sechs bis zwölf Stunden. Dadurch bildet sich die druckfeste Mörtelmatrix, die im Wesentlichen aus Calcium-Silicat-Hydraten besteht.

Die Rohdichte dieses porösen mineralischen Baustoffs liegt zwischen 0,30 und 1,00 kg/dm³ und die Druckfestigkeit zwischen 2,5 und 10,0 N/mm². Aufgrund des hohen Porenvolumens – rd. 80 Vol.-% im unteren Rohdichtebereich – besitzt Porenbeton eine geringe Wärmeleitfähigkeit von 0,15 bis 0,20 W/m · K.

Aus Porenbeton werden Mauersteine, Bauplatten und großformatige bewehrte Bauteile gefertigt [Web2].

11.2 Wärmebehandlung von Beton

Die Steigerung der Frühfestigkeit von Beton kann neben gezielten betontechnologischen Maßnahmen durch eine Erhöhung der *Frischbetontemperatur (Warmbeton)* oder durch eine Wärmezufuhr nach dem Verdichten des Betons (*Wärmebehandlung*) erreicht werden.

Wenngleich derzeit aus Gründen der Energieeinsparung die Erhärtungsbeschleunigung durch Wärmezufuhr nur noch in relativ geringem Umfang angewendet wird, so kann sie dennoch bei bestimmten Serienfertigungen technisch und wirtschaftlich von Vorteil sein. Eine ohne Energieverbrauch mögliche und daher immer stärker verbreitete „Wärmebehandlung“ in Betonwerken ist die Ausnutzung der Hydratationswärme, z. B. durch wärmedämmende Abdeckungen von Formtischen oder die Lagerung von erhärtenden Betonwaren in geschlossenen und isolierten Hochregallagern.

Zur Ausführung einer schnelleren Betonerhärtung mittels Zufuhr von Wärme enthält die „Richtlinie zur Wärmebehandlung von Beton“ des DAfStb [Ri17] Hinweise zu den Maßnahmen und Grenzwerten für die einzuhaltenden Temperaturen in den einzelnen Phasen der Wärmebehandlung. Aus Gründen der *Dauerhaftigkeit* müssen bei der Wärmebehandlung Temperaturgrenzwerte in Abhängigkeit von den Nutzungsbedingungen der Bauteile – trockene (WO) oder feuchte (WF) Umgebung – eingehalten werden. Die Richtlinie gilt sowohl für das Erwärmen des Frischbetons als auch für die Wärmebehandlung. Mit den Temperaturvorgaben sollen Gefügestörungen infolge Wärmedehnung während der Wärmebehandlung sowie Gefügeschäden infolge sekundärer *Phasenneubildungen*, z. B. Ettringit- bzw. Thaumasilbildung, (s. Abschnitt I.5.8) vermieden werden [Odl3, Ale1, Hei1].

Für die „Erhöhung der Frischbetontemperatur“ gibt es zwei Möglichkeiten, das Vorwärmen einzelner Ausgangsstoffe oder das Dampfmischen. Bei letzterem wird während des Mischvorgangs Wärme in Form von Dampf dem Beton zugeführt. Durch eine Erhöhung der Frischbetontemperatur von 20 °C auf 40 °C kann in den ersten sechs bis neun Stunden eine rd. doppelt so hohe Frühfestigkeit erzielt werden. Die Festigkeitsentwicklung

Tafel II.11.2-1: Grenzwerte für das Erwärmen des Frischbetons [Ri17]

Maximaltemperatur in °C	Nutzungsbedingungen	
	trocken WO	feucht WF
im verdichteten Frischbeton	50	30
im Beton während der Erhärtung	80 ^{*)}	80 ^{*)}

^{*)} Einzelwerte dürfen um bis zu 5 °C höher sein

im frühen Stadium lässt sich vor allem beim Warmbeton dadurch steigern, dass der Beton nach dem Verdichten vor Abkühlung geschützt gelagert wird. Durch die Erwärmung des Frischbetons kann bei Zement einer höheren Festigkeitsklasse die Verarbeitbarkeit der Mischung deutlich verkürzt werden; dies umso stärker, je steifer die Ausgangskonsistenz des Betons ist. Diese Wirkung muss durch Erstprüfungen (Eignungsprüfungen) überprüft werden.

Zur Anwendung des Dampfmisch-Verfahrens enthält das „Merkblatt für die Anwendung des Betonmischens mit Dampfzuführung“ [Me2] Hinweise und Anforderungen zur Verfahrensweise. Diese sind zu beachten, wenn die in DIN 1045-3 genannte Grenze von 30 °C für die Frischbetontemperatur überschritten werden soll. Die Maximaltemperaturen bei einer Frischbetonerwärmung sind gemäß der Wärmebehandlungsrichtlinie des DAfStb je nach Nutzungsbedingungen (**Tafel II.11.2-1**) für die Bauteile festzulegen.

Für eine „Wärmebehandlung“, d. h. das Erwärmen des in die Schalung/Form eingebrachten verdichteten Betons, gibt es verschiedene Verfahren. Die verbreitetste ist die Dampfbehandlung; hierbei wird der Beton in besonderen Kammern einer Wärme-

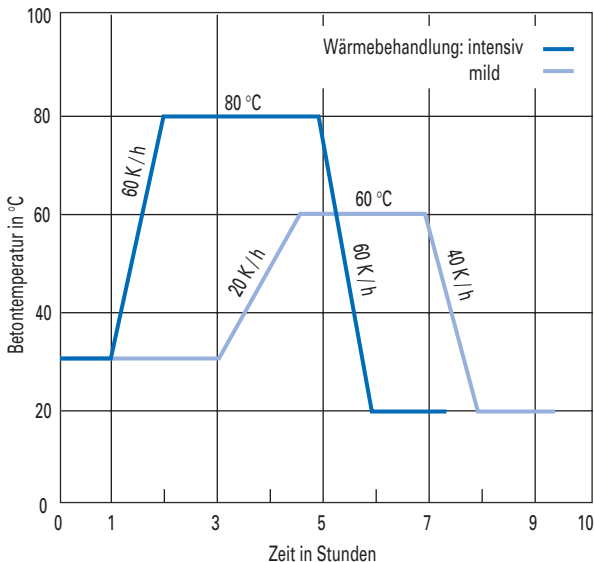


Bild II.11.2-1: Beispiele für Temperatur/Zeit-Verläufe von Wärmebehandlungsprogrammen unterschiedlicher Intensität

zufuhr durch ungespannten Dampf ausgesetzt. Weitere Möglichkeiten sind das Beheizen der Schalungen, Warmluftbehandlungen sowie auch Infrarotbestrahlung oder Mikrowellenaufheizung.

Durch die Temperaturen und den zeitlichen Ablauf einer Wärmebehandlung, d. h. Temperatur und Zeitspanne bis zum Beginn der Aufheizung (Vorlagerung), Höhe der Maximaltemperatur und Dauer der Haltephase, können die Höhe der Frühfestigkeit und der Zeitpunkt, zu dem sie erreicht sein soll, in einer relativ

Tafel II.11.2-2: Grenzwerte für eine Wärmebehandlung von Beton in der Form nach dem Verdichten [Ri17]

Kriterien		Nutzungsbedingungen		
		trocken WO	feucht WF	
Vorlagerung	Minstdauer h	1	alternativ 3 4	
	Temperatur im Beton °C	30	30	40
Temperatur im Beton während der Erhärtung °C		80*)	60*)	
Aufheizrate K/h		20	20	

*) Einzelwerte dürfen um bis zu 5 °C höher sein

weiten Spanne variiert werden. Je höher die Festigkeit und je kürzer der Zeitraum für die Erhärtung sein soll, desto intensiver muss die Wärmebehandlung sein. **Bild II.11.2-1** zeigt Temperatur/Zeit-Verläufe für unterschiedlich intensive Wärmebehandlungsprogramme. Mit steigender Intensität, d. h. früher Erwärmungsbeginn und hohe Maximaltemperatur, steigt allerdings das Risiko einer Beeinträchtigung der Betonfestigkeit und der Dauerhaftigkeit. Die Richtlinie des DAfStb für die Ausführung der Wärmebehandlung von Beton enthält Temperaturgrenzwerte (**Tafel II.11.2-2**), bei denen ungünstige Auswirkungen für die langfristige Gebrauchstauglichkeit der Bauteile nicht eintreten. Die Richtlinie enthält darüber hinaus grundlegende Erläuterungen zu Sinn und Zweck dieser Vorgaben. In [Sy11, Nec3, Wis7, Bol1] sind weitergehend und praxisbezogen die chemisch-mineralogischen und die betontechnologischen Zusammenhänge dargestellt, die zu Langzeitschäden führen können, und es werden Angaben gemacht, wie diese zu vermeiden sind.

Die Einhaltung vor allem der Zeit- und Temperaturvorgaben für

die Vorlagerung sind notwendig, um Dauerhaftigkeitsschäden zu vermeiden. Durch eine zu kurze Vorlagerung, bis zur Erhöhung der Temperatur, können Gefügestörungen infolge des unterschiedlichen Wärmedehnverhaltens von ungebundenem Wasser und den Feststoffen im Frischbeton (bzw. jungen Beton) verursacht werden. Zum anderen kann die Sulfatbindung (primäre Ettringitbildung) behindert werden. Bei derart vorgeschädigten Bauteilen, die beispielsweise als Außenbauteile der Feuchte ausgesetzt sind, kann Wasser in das Gefüge eindringen. Frostwechsel können zu einer fortschreitenden Gefügeschädigung führen. Nicht ausreichend gebundenes, d. h., durch Lösung mobilisierbares Sulfat kann zu Phasenneubildungen, wie Ettringit und Thaumasit, führen, die zu weiteren Gefügestörungen beitragen. Wie sich in der Praxis gezeigt hat, treten im Laufe der Nutzungsdauer bei derartig vorgeschädigtem Beton Rissstrukturen auf, die dreidimensional kontinuierlich anwachsen. Dadurch nimmt die Festigkeit sukzessive ab.