

## Zur Normung von Zement

Anmerkungen und Erläuterungen zur Neubearbeitung  
der deutschen Zementnorm DIN 1164 — Fassung Juni 1970

Von Gerd Wischers, Düsseldorf

### Übersicht

*Die Zementnorm DIN 1164 hat verschiedene Aufgaben zu erfüllen sie ist zugleich Stoff-, Prüf-, Güte- und Liefernorm. Die DIN 1164 behandelt Portland-, Eisenportland-, Hochofen- und Traßzement. Diese Normzemente unterscheiden sich in ihrer stofflichen Zusammensetzung; sie werden jedoch nach den gleichen Prüfungen beurteilt und müssen innerhalb der verschiedenen Klassen den gleichen Anforderungen genügen. Sie sind auch untereinander verträglich.*

*Der weitaus überwiegende Anteil des Zements wird zu Beton verarbeitet. Daher interessiert den Zementverbraucher in erster Linie das Verhalten des Zements im Beton, insbesondere sein Beitrag zur Festigkeitsentwicklung des Betons. Da die Betoneigenschaften jedoch von mehreren Einflußgrößen abhängen, könnte der Einfluß des Zements nur an einer stets gleichen Normbeton-Mischung geprüft werden, was die Normprüfung der Zemente schon allein wegen der Menge und Kosten für den dann überall gleichen Normzuschlag erschweren würde. Man prüft und beurteilt das Verhalten des Zements im Beton daher indirekt durch sogenannte Analogie-Prüfverfahren, die hinsichtlich der für den Beton zu erwartenden Eigenschaften aussagekräftig, ferner ausreichend reproduzierbar und einfach sind. Das Erstarren prüft man an Zementbrei, ebenso die Raumbeständigkeit und die Hydratationswärme. Zur Festigkeitsprüfung dient ein Normmörtel. Andere Eigenschaften, wie z. B. den Sulfatwiderstand, beurteilt man aufgrund der stofflichen Zusammensetzung des Zements.*

*Die wichtigste Neuerung in der Zementnorm DIN 1164, Fassung Juni 1970, ist zweifellos die zusätzliche obere Begrenzung der Festigkeit in den einzelnen Klassen. Durch die damit gegebene untere und obere Festigkeitsbegrenzung wird eine hohe Gleichmäßigkeit der 28-Tage-Festigkeit veranlaßt. Da bei der Prüfung und Überwachung kein Einzelwert außerhalb der Festigkeitsgrenzen liegen darf, wird die Durchschnittsfestigkeit jedes Zements etwa in der Mitte des Festigkeitsbereichs der jeweiligen Klassen liegen. Bei einer der Norm zugrunde gelegten Standardabweichung von 30 kp/cm<sup>2</sup> (Prüf- und Qualitätsstreuung) werden 90 % aller Prüfwerte eines Zements um weniger als  $\pm 50$  kp/cm<sup>2</sup> von seinem Mittelwert abweichen. Das bedeutet eine sehr hohe und völlig ausreichende Sicherheit für das zuverlässige Einhalten einer bestimmten Betonfestigkeit, wenn bei einer Betonmischung vom Mittelwert des Festigkeitsbereichs der jeweiligen Zementklasse ausgegangen wird. Diese neue Regelung dient so nicht nur der Gleichmäßigkeit und Sicherheit; sie fördert durch Vereinfachung auch die Rationalisierung und Vereinheitlichung der Betonherstellung.*

## 1. Allgemeines

Den Baustoff Zement kann man als Erzeugnis nicht unmittelbar verwenden, wie beispielsweise Glas, Ziegel oder Stahl, sondern man stellt aus ihm den eigentlichen Baustoff erst her. Die Anwendungsformen reichen von Mörtel und Beton über Bodenverfestigungen und Injektionen bis zum zementgebundenen Anstrich; dabei dürfte die Verarbeitung zu Beton sicherlich mehr als drei Viertel der Zementverwendung ausmachen.

Die Herstellung und Verarbeitung des Betons verlagert sich ständig mehr von einer ursprünglich weitgehend handwerklichen Tätigkeit auf eine zunehmende industrielle Fertigung. Ursache hierfür sind die durch steigenden Kostendruck erzwungene Rationalisierung, aber auch eine angestrebte Nutzung höherwertiger Betone. Hand in Hand damit ging die Entwicklung sowohl der Technologie als auch der dafür notwendigen technischen Einrichtungen, d. h. der Aufbereitungs- und Verarbeitungsanlagen. Die Betonherstellung im industriellen Maßstab hat bereits in den letzten Jahrzehnten einen hohen Grad angenommen. So werden heute rd. 30 % des Zements zu Betonwaren und -fertigteilen verarbeitet, weitere rd. 30 % zu Transportbeton, und auf zahlreichen Mittel- und Großbaustellen werden mobile, weit entwickelte Betonaufbereitungsanlagen benutzt.

Die zunehmenden Anforderungen an die Güte, Gleichmäßigkeit und Wirtschaftlichkeit des Betons bedingen nicht nur teurere Fertigungsanlagen, sondern auch entsprechend gesteigerte Anforderungen an die Ausgangsstoffe des Betons, also an Zement und Zuschlag.

Die industrielle Herstellung des Massenbaustoffs Beton fordert somit auch einen homogenen, in den Eigenschaften immer gleichmäßigen Ausgangsstoff Zement. Demgegenüber tritt für den Durchschnittsfall diese oder jene Eigenart einzelner Zemente immer stärker zurück.

Daneben veranlaßt die Vielfalt der Anwendungsgebiete allerdings auch eine zunehmende Nachfrage nach zusätzlichen Sondereigenschaften. Sondereigenschaften können bei besonderen Verhältnissen der Verarbeitung des Betons nützlich sein, z. B. bei der Herstellung von Schleuderbeton, oder für Bauteile notwendig werden, an die Forderungen hinsichtlich chemischer Widerstandsfähigkeit oder Farbe gestellt werden.

All dem wurde bei der Neubearbeitung der Zementnorm DIN 1164, die vor mehr als 10 Jahren aufgenommen und Mitte letzten Jahres abgeschlossen wurde, Rechnung getragen, soweit dies der Stand der Zementtechnik erlaubt.

## 2. Zement – Erzeugnis der Steine-und-Erden-Industrie

Zement ist ein hydraulisches Bindemittel, das als Zementleim (Gemisch aus Zement und Wasser) die Gesteinskörner des Zuschlags verbindet. Dieses Bindemittel benötigt nur Wasser, erhärtet dann selbständig sowohl an Luft als auch unter Wasser und bleibt wasserfest sowie unter allen gewöhnlichen Umweltbedingungen beständig. Kein anderes organisches oder anorganisches Bindemittel weist zugleich diese Sonderheiten auf.

Im Jahre 1970 wurden in der Bundesrepublik Deutschland nahezu 35 Mill. t Zement verbaut. — Zum Umfang und zu der Vielartigkeit der Anwendung trägt sicher auch der niedrige Preis bei, der ab Werk trotz aller Kostensteigerungen der letzten Jahre noch immer unter 0,05 DM/kg liegt. Das ist nur durch die Weiterentwicklung der Verfahrenstechnik der Zementherstellung ermöglicht worden, die zwar zu hohen Investitionen führte, jedoch den Arbeitsaufwand auf unter 1 Std. je Tonne Zement gesenkt hat. Die großen Maschineneinheiten — Drehrohröfen mit einer Leistung von über 3000 t je Tag und Zementmühlen mit über 100 t je Std. — haben zusammen mit der verfeinerten Meß- und Regeltechnik wesentlich zur Vergleichmäßigung der Zementeigenschaften beigetragen.

Dennoch ist zu beachten, daß es sich bei Zement um ein Massenerzeugnis der Steine-und-Erden-Industrie handelt, dessen Basis wenig einheitliche mineralische Rohstoffe sind, die aufbereitet und verhüttet werden (Gesteinshüttenbetrieb). Gewisse Eigenheiten eines Rohstoffvorkommens müssen dabei hingenommen werden, weil sie mit wirtschaftlich vertretbarem Aufwand nicht zu ändern sind. Zwar ist es in gewissen Grenzen möglich, fehlende Komponenten zu ergänzen; es ist jedoch kaum möglich, zu stark im Rohmaterial vertretene Stoffe vor der Verarbeitung zu entziehen.

Die Zemente können wohl auf wesentliche Eigenschaften, wie z. B. eine 28-Tage-Druckfestigkeit, eingestellt werden, andere Eigenschaften, wie z. B. die früheren Festigkeiten, sind dann aber durch das Rohstoffvorkommen weitgehend geprägt und nur in Grenzen veränderbar. Bei weniger wichtigen Eigenschaften, wie z. B. der Mahlfeinheit, sind Schwankungen, die allerdings bautechnisch kaum spürbar sind, sogar unvermeidlich, weil die Mahlfeinheit eine wichtige Regelgröße für eine gleichmäßige 28-Tage-Festigkeit ist.

### **3. Prüfverfahren — Grundlage der Normung**

Schon in der ersten Zementnorm aus dem Jahre 1877 waren Prüfungen und Anforderungen für die drei kennzeichnenden und wichtigsten Eigenschaften des Zements (langsames Erstarren, Entwicklung der Festigkeit und Beständigkeit nach dem Erhärten) enthalten; sie gehören wegen ihrer Bedeutung auch heute noch zum wesentlichen Bestand der neuesten Zementnorm.

Auch das Wesen der Zementnorm hat sich in Deutschland über die vielen Jahre hinweg nicht geändert; sie ist u. a. zugleich eine Stoff-, Prüf-, Güte- und Liefernorm<sup>1)</sup>.

Güte- und Liefernormen setzen Prüfverfahren und Maßstäbe voraus, auf die sich die Güteanforderungen beziehen und die dem Nachweis der Lieferverpflichtung dienen.

Die Erwartungen des Verbrauchers richten sich unmittelbar auf den mit Zement hergestellten Baustoff, also auf Beton, und nur mittelbar auf den Zement, von dem allerdings ein entscheidender

<sup>1)</sup> Grundsätzlich ist z. B. zwischen Abmessungsnormen, Stoffnormen, Gütenormen, Prüfnormen, Verfahrensnormen, Liefernormen u. a. m. zu unterscheiden. Viele Normen schließen jedoch mehrere dieser Typen ein.

Beitrag für die gewünschten Eigenschaften des Betons erwartet wird. Da die Eigenschaften des Betons von vielen weiteren Einflüssen abhängen, sind mit den Eigenschaften des Zements allein nicht ohne weiteres auch bestimmte Betoneigenschaften gewährleistet; hierzu sind weitere betontechnologische Bedingungen zu erfüllen. Aus dem gleichen Grund kann man daher auch nicht aus den Eigenschaften des Betons ohne weiteres auf die Eigenschaften des Zements schließen, wie dies in der Praxis häufig irrtümlicherweise unterstellt wird.

Andererseits besteht ein berechtigtes Interesse des Verbrauchers an dem Beitrag des Zements zu den Eigenschaften des Betons, insbesondere zur Festigkeit des Betons. Die Prüfverfahren für Zement und die darauf bezogenen genormten Güteanforderungen müssen daher ein Maß für die bautechnischen Eigenschaften des Zements im Beton sein.

Für eine Güte- und Liefernorm würden Prüfverfahren, die nur die bautechnischen Eigenschaften des Zements erfassen, möglicherweise ausreichen. Die Zementnorm ist jedoch auch eine Stoffnorm, die für die Erzeugung einen Rahmen gibt, in dem die gewünschten bautechnischen Eigenschaften erreichbar sind. Die bloße Nachprüfung des fertigen Zements reicht also nicht aus; z. B. müssen von der chemischen Zusammensetzung des Rohstoffs oder seiner Feinheit her schon vielfältige Messungen, Steuerungen und Regelungen bereits am Ausgangspunkt der Erzeugung einsetzen.

Allgemein sollte jedes Prüfverfahren drei grundlegenden Bedingungen entsprechen. Zunächst muß es aussagekräftig hinsichtlich des Prüfzwecks sein; das ist an sich selbstverständlich, wird jedoch bei der Entwicklung von Prüfverfahren manchmal weniger beachtet. Prüfverfahren, die bei der Beurteilung maßgeblicher Eigenschaften eine graduelle Abstufung erlauben, sind im allgemeinen aussagekräftiger. Bei Randbedingungen, die weniger wesentlich sind, deren Bestehen lediglich eine Voraussetzung für die Brauchbarkeit ist, können sogenannte Ja-Nein-Prüfungen sogar zweckmäßiger sein.

Prüfverfahren müssen außerdem in jedem Fall eine ausreichende Reproduzierbarkeit aufweisen, d. h., wenn man mit dem gleichen Stoff die gleiche Prüfung durchführt, dann sollte man in jeder Prüfstelle Prüfergebnisse mit möglichst kleiner Abweichung erhalten. Natürlich nimmt mit abnehmender Prüfstreuung die Schärfe der Beurteilung des Erzeugnisses zu. Es ist jedoch nicht sinnvoll, der Reproduzierbarkeit eines Prüfverfahrens auf Kosten seiner eigentlichen Aufgabe unbedingten Vorrang zu geben; denn es kann durchaus ein Prüfverfahren mit hoher Aussagekraft, aber noch angemessener mäßiger Reproduzierbarkeit zweckmäßiger sein als ein umgekehrtes Verhältnis.

Zum Dritten sollte ein Prüfverfahren möglichst einfach und mit begrenztem Aufwand auszuführen sein. Letzteres gilt vor allem für verhältnismäßig billige Massenerzeugnisse, wie z. B. Zement. Häufig läßt sich eine über das erforderliche Mindestmaß hinausgehende Reproduzierbarkeit nur mit wesentlich höheren Kosten erreichen.

Im Hinblick auf die besondere Bedeutung eines Prüfverfahrens für die bautechnische Beurteilung des Zements liegt der Gedanke

nahe, Zement mittels Beton zu prüfen. Da die Eigenschaften des Betons jedoch nicht nur vom Zement, sondern in gleichem oder stärkerem Maße von anderen Einflußgrößen abhängen, wie z. B. dem Wasserzementwert, müßten alle diese anderen Einflüsse gleichgehalten werden, was zu einer für die Zementprüfung festzulegenden Normbeton-Mischung führen würde. Soweit dem Verfasser bekannt, ist dieser Weg – allerdings aus anderen Gründen – bislang lediglich in Großbritannien 1958 [1] zusätzlich für eine Prüfung der Zementfestigkeit beschritten worden. Dabei ist für den Beton kein bestimmter Normzuschlag vorgeschrieben worden, sondern es kann jeder irgendwo verfügbare natürliche Zuschlag, der bestimmten Eigenschaften entspricht, verwendet werden. Es kann trotzdem nicht unbeachtet bleiben, daß die verschiedenartigen Zuschläge dabei zu gewissen systematischen Unterschieden in der Festigkeit Anlaß geben können.

Ob eine Normbeton-Mischung für den Festigkeitsbeitrag des Zements im Beton aussagekräftiger ist als eine zweckmäßig zusammengesetzte Normmörtel-Mischung, wie sie alle anderen Zementnormen vorschreiben, erscheint fraglich, insbesondere weil auch die Normbetonmischung nur *einen* bestimmten Wasserzementwert vorsieht. Die Reproduzierbarkeit dürfte auf keinen Fall besser, sondern eher schlechter sein. Auf jeden Fall wäre eine solche Prüfung wesentlich aufwendiger, zum einen wegen der großen Mengen Normzuschlag und zum anderen wegen der wesentlich größeren Prüfkörper, Geräte, Lagerbehälter und Prüfmaschinen. Außerdem würde die Prüfung anderer bautechnischer Eigenschaften, wie z. B. des Erstarrens, der Raumbeständigkeit oder des Sulfatwiderstands, mit der Normbeton-Mischung einen ungewöhnlich großen Aufwand verlangen.

Solange man daher Zement prüft und normt – also seit rd. 100 Jahren –, hat man alle bautechnischen Eigenschaften nicht unmittelbar, sondern mittelbar durch sogenannte Analogie-Prüfverfahren untersucht und beurteilt, die mehr oder weniger aussagekräftig im Hinblick auf das Verhalten des Zements im Beton sind. Bei einigen Verfahren gehen daher die Auffassungen der Fachleute auseinander, ohne daß es in diesen Fällen bisher gelungen ist, ähnlich einfache, jedoch aussagekräftigere Verfahren zu finden. Den weiteren allgemeinen Anforderungen an Prüfverfahren genügen sie jedoch, d. h., sie haben eine ausreichende Reproduzierbarkeit, sie sind meist einfach und erfordern auch nur einen zumutbaren Aufwand.

#### **4. Zement – Hauptbestandteile und Zementarten**

Der feingemahlene Zement besteht im wesentlichen aus bestimmten Verbindungen von Calciumoxid, Siliciumdioxid, Aluminiumoxid und Eisenoxid, die im allgemeinen künstlich durch Sintern oder Schmelzen entstanden sind oder an einzelnen Stellen als puzzolansischer Rohstoff (Traß) in der Natur vorkommen. Die deutsche Zementnorm DIN 1164, Ausgabe Juni 1970, führt als Hauptbestandteile Portlandzementklinker, Hüttensand (granulierte Hochofenschlacke) und Traß auf sowie als Nebenbestandteile u. a. das zur Regelung des Erstarrens zugesetzte Calciumsulfat

#### 4.1 Portlandzementklinker

Portlandzementklinker entsteht durch Brennen bis zur Sinterung einer fein aufbereiteten Mischung aus Kalkstein und Ton, die in der Natur als Kalkmergel vorkommt oder aus mehreren Rohstoffkomponenten zusammengesetzt wird. Träger der Erhärtung sind im wesentlichen die beim Brennen entstehenden Verbindungen des Kalks mit der Kieselsäure, die Calciumsilicate. Das Rohmehl muß jedoch einen geringen Anteil an Tonerde und Eisenoxid besitzen, weil nur dann die Calciumsilicate mit einem technisch und wirtschaftlich zu vertretenden Aufwand beim Brennen entstehen. Fein gemahlener Portlandzementklinker erhärtet selbständig.

Bei dem Zement als einem in großen Mengen hergestellten Gesteinshüttenerzeugnis kann man nicht unterstellen, daß es vollständig homogen ist, d. h., daß jedes Zementkorn genau die gleiche chemische Zusammensetzung aufweist oder immer gleichartig gebrannt ist. Geringfügige Unterschiede sind unvermeidbar. Damit jedoch der aus dem Werksbetrieb stammende Anteil an nichtgebrannten Stoffen so klein bleibt, daß er keinerlei nachteiligen Einfluß hat, begrenzt die neue Norm den Glühverlust, den Kohlendioxidgehalt und den unlöslichen Rückstand des fertigen Zements. Dadurch werden auch mögliche Beimengungen, wie z. B. andere Mineralstoffe, in einem zum Regeln des Erstarrens zu gegebenen Gipsstein mit erfaßt. Der damit abgegrenzte höchstzulässige Gehalt an nichtgebrannten Bestandteilen schließt mit Sicherheit jeden nachteiligen Einfluß aus. (Als einzige Zementnorm schreibt dementsprechend die DIN 1164 eine Grenze für den Kohlendioxidgehalt vor, die Carbonate, die beim Salzsäureaufschluß als solche nicht erkennbar werden, wirksam begrenzt.)

#### 4.2 Hüttensand

Granulierte Hochofenschlacke bezeichnet man als Hüttensand; er entsteht durch schnelles Abkühlen feuerflüssiger Hochofenschlacke aus dem Eisenhüttenbetrieb. „Saure“ Schlacken sind im allgemeinen weniger geeignet. Daher schreibt die deutsche Norm vor, daß das Gewichtsverhältnis von Kalk plus Magnesia plus Tonerde zu Kieselsäure gleich oder größer 1,00 ist. Diese Formel schließt Hüttensande aus, die in der Mischung mit dem Portlandzementklinker (z. B. für Eisenportland- oder Hochofenzement) zur Erhärtung nichts oder zuwenig beitragen; andererseits sind jedoch nicht alle Hüttensande, die der Formel entsprechen, besonders geeignet. Aus diesem Grunde weisen ausländische Zementnormen dieses Beurteilungskriterium häufig nicht auf, nehmen aber andererseits in Kauf, daß möglicherweise wenig hydraulische Hüttensande Verwendung finden. Fein gemahlener Hüttensand ist latent hydraulisch, d. h., er bedarf im wesentlichen eines Anregers, um die ihm eigene Hydraulizität hinreichend schnell zu entfalten. Als Anreger ist in Deutschland bei Normzement nur Portlandzementklinker zugelassen. Andere Anreger, wie z. B. Kalk und Sulfat, wären gleichfalls möglich, liefern jedoch insgesamt weniger günstige Bindemittel.

#### 4.3 Traß

Traß ist ein natürlicher, puzzolanischer Stoff, d. h., er enthält durch Reaktion mit Kalk hydraulische Eigenschaften. Der genormte Traß-

zement ist ein fein gemahlenes Gemisch aus Portlandzementklinker und Traß, bei dem der während des Erhärtens des Portlandzementklinkers abgespaltene Kalk mit dem Traß hydraulische Verbindungen eingeht. Traß muß den Anforderungen der Traßnorm DIN 51043 entsprechen. Seine Puzzolanität wird mit einem Traß-Kalk-Normmörtel nachgewiesen, der nach Wasserlagerung bestimmte Mindestfestigkeiten erreichen muß.

In Italien prüft man nicht den puzzolanischen Stoff, sondern den fertigen Puzzolanzement, der erstens eine ausreichende Festigkeit aufweisen und bei dem zweitens als Nachweis der puzzolanischen Reaktion der Kalkgehalt des Wassers einer Puzzolanzement-Wasser-Suspension unterhalb der Kalksättigung liegen muß.

#### 4.4 Zementarten

Die verschiedenen genormten Zementarten unterscheiden sich stofflich durch unterschiedliche Anteile der drei Hauptbestandteile. In die neue deutsche Norm wurden jedoch nur Mischungen aus Portlandzementklinker und jeweils einem der beiden anderen, nicht selbständig erhärtenden Hauptbestandteile (Hüttensand bzw. Traß) aufgenommen. Andere Zemente, wie Traßhochofenzement und Ölschieferzement, die jeweils nur in einem Bundesland erzeugt werden, dürfen jedoch ebenfalls gemäß ihrer bauaufsichtlichen Zulassung für tragende Beton- und Stahlbetonbauteile verwendet werden.

Bezogen auf die Hauptbestandteile weisen die vier genormten Zementarten die in Tafel 1 wiedergegebene Zusammensetzung auf.

Tafel 1 Zusammensetzung der Normzemente nach DIN 1164 (Juni 1970)

Summe aus Portlandzementklinker und Hüttensand bzw. Traß gleich 100% gesetzt

Zementart	Portlandzement- klinker	Hüttensand	Traß
	Gew.-%	Gew.-%	Gew.-%
Portlandzement	100	—	—
Eisenportlandzement	65 ... 99	1 ... 35	—
Hochofenzement	15 ... 64	36 ... 85	—
Traßzement	60 ... 80	—	20 ... 40

Die für Hüttensand charakteristischen Eigenschaften wirken sich naturgemäß mit zunehmendem Anteil stärker auf die Zement-eigenschaften aus; praktisch besteht ein kontinuierlicher Übergang vom Portlandzement über den Eisenportlandzement mit geringem Hüttensandgehalt zum hüttensandreichen Hochofenzement mit einem Anteil von 70 bis 85 Gew.-%. Der zwischen Eisenportland- und Hochofenzement jetzt in der neuen deutschen Zementnorm festgelegte Grenz-Hüttensandgehalt von 35 Gew.-% ist weniger durch bautechnische Eigenschaften bedingt als vielmehr eine Konvention, die der ISO-Empfehlung Nr. 771 folgt. Auch für den

in einigen Ländern zusätzlich festgelegten Mindesthüttensandgehalt von 20 Gew.-% für Eisenportlandzement gibt es kaum eine bautechnische Begründung. Demgegenüber haben Hochofenzemente mit hohem Hüttensandgehalt, insbesondere jene mit mehr als 70 Gew.-% Hüttensandanteil, eindeutig besondere bautechnische Eigenschaften, z. B. hohen Sulfatwiderstand und im allgemeinen auch niedrige Hydratationswärme.

Traßzement muß einen Traßgehalt von wenigstens 20 Gew.-% aufweisen, damit sich die besonderen Eigenschaften des Trasses, z. B. sein Wasserrückhaltevermögen, im Frischbeton durch den Traßzement entsprechend auswirken.

Bei der Herstellung von Eisenportland-, Hochofen- und Traßzement müssen Portlandzementklinker und Hüttensand bzw. Traß im Werk gemeinsam miteinander vermahlen werden. Technisch ist es auch möglich, diese Stoffe getrennt zu vermahlen und dann homogen zu vermischen. In der Norm ist jedoch nur die gemeinsame Vermahlung aufgenommen worden, weil hierdurch eine homogene Verteilung der Ausgangsstoffe ohne weiteres sichergestellt ist. Diese Voraussetzung wäre anderenfalls nur mit besonderen Verfahren möglich, die bislang in der Zementindustrie noch nicht allgemein üblich und erprobt sind. Aufgabe einer Norm ist es jedoch, den häufiger angewendeten und gesicherten Stand zu erfassen, während für abweichende Verfahren allgemein der Weg über eine besondere Zulassung möglich ist.

## 5. Erstarren

Das Erstarren des Betons hängt von vielen Einflußgrößen ab. Zwar bewirkt immer der Zement das anfängliche Versteifen, das in zunehmendes Erhärten übergeht, doch können sich andere Einflüsse, wie z. B. die Konsistenz, die Temperatur oder der Wasserzementwert, u. U. wesentlich stärker auf den zeitlichen Ablauf auswirken als das hinsichtlich des Erstarrens unterschiedliche Verhalten verschiedener Zemente.

Die Baupraxis stellt die Forderung, daß der Beton nach dem Anmachen ausreichend lange verarbeitbar bleibt. Welcher Zeitraum hierfür angemessen ist, darüber gehen die Meinungen auseinander. Schwierig ist eine einheitliche Beurteilung beim Beton, weil es bislang kein allgemein übernommenes Prüfverfahren für sein Erstarren gibt. Man kann zwar durch das Messen der Konsistenz in bestimmten Zeitabständen das Versteifen des Betons erfassen, Regeln für die Durchführung und Auswertung gibt es jedoch nicht. Immerhin bietet die amerikanische Norm ASTM C 403-70 [2] ein Verfahren, mit dem die Versteifung durch den Widerstand eines Stabes beim Eindringen in den Feinmörtel des Betons gemessen wird.

Das Erstarren des Zements wird praktisch auf der ganzen Welt mit dem Nadelgerät nach Vicat geprüft (siehe DIN 1164 Blatt 5), bei dem der Widerstand eines nur mit Wasser angemachten Zementbreis gegen das Eindringen einer zylindrischen Nadel von 1 mm<sup>2</sup> Querschnitt gemessen wird. (Die amerikanischen Prüfnormen führen neben dem Gerät von Vicat auch das Gerät von Gillmore auf, das nach einem ähnlichen Prinzip arbeitet.)

Der frisch angemachte Zementbrei muß bei der Prüfung nach Vicat eine vorgeschriebene Konsistenz haben, die man als Normsteife bezeichnet und die man mit dem gleichen Gerät bestimmen kann, indem man die Vicatnadel durch einen Tauchstab ersetzt. Je nach der Mahlfeinheit des Zements, seiner Zusammensetzung und auch je nach der Intensität der Bearbeitung des Zementbreis beim Anmachen von Hand benötigt der Zement für die Normsteife einen verschieden hohen Wasserzusatz zwischen 23 und 30 Gew.-%.

Die rein konventionellen Festlegungen dieses Prüfverfahrens gehen aus der stark vereinfachten, schematischen Darstellung in Bild 1 hervor. Ausgangspunkt ist ein Zementbrei mit Normsteife. Mit zunehmender Zeit nimmt auch der Widerstand gegen Verformung zu, zunächst wenig, dann stärker, bis das Erstarren in das Erhärten übergeht. Den Erstarrungsbeginn hat man so definiert, daß die Vicatnadel mit einem Gewicht von 300 g durch eine 40 mm dicke Breischicht nicht mehr ganz durchstößt, sondern 3 bis 5 mm über dem Boden der Schicht steckenbleibt. Der Widerstand beim Erstarrungsende muß so groß sein, daß die Nadel höchstens 1 mm in den erstarrten Brei eindringt. Durch wiederholtes Prüfen an dem versteifenden Zementbrei wird die Zeit nach dem Anmachen bis zum Erstarrungsbeginn und bis zum Erstarrungsende festgestellt.

Das Prüfverfahren mit dem Nadelgerät ist einfach und erfordert keinen großen Aufwand. Die Reproduzierbarkeit ist allerdings nicht besonders gut. So betrug bei einer größeren Vergleichsprüfung die Standardabweichung für den Erstarrungsbeginn rd. 30 Minuten, was einem Variationskoeffizienten von über 16 % entsprach. Die DIN 1164 Blatt 5, Fassung Juni 1970, sieht darum vor, daß der Zementbrei nicht mehr von Hand, sondern 3 Minuten im Mörtelmischer gemischt wird, um die Reproduzierbarkeit zu verbessern.

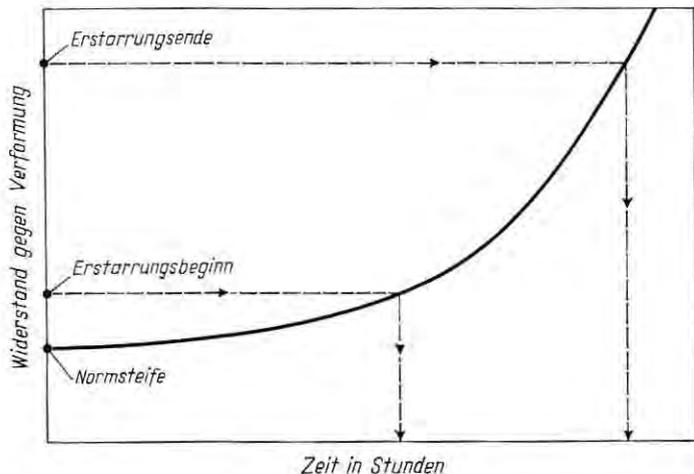


Bild 1 Schematische Darstellung des Versteifens von Zementbrei (Ermittlung des Erstarrungsbeginns und -endes eines Zements)

Ob die Ergebnisse mit dem Vicatgerät direkt auf das Verhalten des Zements im Beton übertragen werden können – ob also z. B. ein doppelt so langer Erstarrungsbeginn nach Vicat auch eine doppelt so lange Verarbeitungszeit eines Betons ergibt –, ist nach Wissen des Verfassers bislang noch nicht untersucht oder veröffentlicht worden, vermutlich, weil es für das Erstarren des Betons kein geeignetes Prüfverfahren gibt. Man kann daher auch nicht umgekehrt aus den Erfordernissen der Betonpraxis die Grenzwerte für das Verfahren nach Vicat ableiten, sondern man kann allenfalls beurteilen, ob die bisherigen Festlegungen den praktischen Bedürfnissen entsprechen. Wie bisher schreibt die DIN 1164, Fassung Juni 1970, vor, daß der Erstarrungsbeginn nicht vor einer Stunde eintreten darf und daß das Erstarrungsende innerhalb von 12 Stunden eingetreten sein muß.

Bautechnische Bedeutung hat im allgemeinen nur der Erstarrungsbeginn. Die Festlegung, daß der Erstarrungsbeginn nicht vor einer Stunde eintreten darf, reicht im allgemeinen für die Praxis aus. Für Betonwaren kann im Hinblick auf eine baldige Mindestfestigkeit des jungen Betons ein Erstarrungsbeginn, der nur wenig über einer Stunde liegt, erwünscht sein. Umgekehrt kann für Transportbeton im Hinblick auf ein vorzeitiges Ansteifen bei sehr langen Anfahrwegen ein später eintretender Erstarrungsbeginn zweckmäßig sein.

Interessant ist in diesem Zusammenhang eine Auswertung von 43 internationalen Zementnormen nach [3]. Fünf Länder erlauben einen Erstarrungsbeginn bereits nach 30 Minuten, ungefähr ein Drittel der Länder nach 45 Minuten und nahezu die Hälfte aller Länder nach einer Stunde. In einem Land wird ein Erstarrungsbeginn frühestens nach 3 Stunden vorgeschrieben.

Tafel 2 Festlegung über Erstarrungsbeginn und -ende in verschiedenen Ländern nach [3]

Erstarrungsbeginn		Erstarrungsende	
Zeit in Minuten	Anzahl der Länder	Zeit in Stunden	Anzahl der Länder
frühestens nach 30	5	frühestens nach 3	2
frühestens nach 40	1	frühestens nach 4	1
frühestens nach 45	14	spätestens nach 6	1
frühestens nach 60	20	frühestens nach 7	1
frühestens nach 120	1	spätestens nach 8	3
frühestens nach 150	1	spätestens nach 10	14
frühestens nach 180	1	spätestens nach 12	8
		spätestens nach 15	2

Etwa ein Viertel aller Länder verzichtet auf eine zeitliche Begrenzung des Erstarrungsendes, was nach Auffassung des Verfassers auch keine nachteiligen Folgen haben muß, da der Zement zusätzlich nach bestimmten Zeiten den Festigkeitsansprüchen genügen muß. Die Hälfte aller Länder schreibt jedoch ein Erstarrungsende innerhalb von 10 oder 12 Stunden vor, so auch Deutschland. Im Hinblick auf den 8-Stunden-Arbeitstag ist die Prüfung

des Erstarrungsendes, das für durchschnittliche Verhältnisse des Betonbaus keine bautechnische Bedeutung hat, nicht praktisch, so daß bei einer späteren Überarbeitung diese Festlegung überprüft werden sollte.

Insgesamt entsprechen die Festlegungen hinsichtlich des Erstarrens in der neuen deutschen Zementnorm den international am weitesten verbreiteten Gepflogenheiten.

## **6. Erhärten des Zements – Festigkeitsklassen**

Der erstarrte Zementleim gewinnt zunehmend an Festigkeit und wird damit zum Zementstein. Die Festigkeit von Normalbeton wird im wesentlichen nur vom Wasserzementwert und von dem Festigkeitsbeitrag des jeweiligen Zements bestimmt. Sowohl das Prüfverfahren für die Festigkeit des Zements als auch die auf den Prüfergebnissen beruhende Einteilung der Zemente in Festigkeitsklassen müssen den Festigkeitsbeitrag des Zements im Beton zuverlässig erfassen und kennzeichnen.

### **6.1 Prüfverfahren für die Festigkeit des Zements**

Wenn man von der bereits erwähnten, in Großbritannien alternativ zugelassenen Festigkeitsprüfung des Zements mit einem Normbeton absieht, dann wird – soweit dem Verfasser bekannt – auf der ganzen Welt die Festigkeit des Zements an genormten Zementmörteln geprüft. Die Festlegungen hinsichtlich des Prüfmörtels sind in den einzelnen Ländern allerdings sehr verschieden. Die unterschiedlichen Festlegungen gehen im Grunde auf die verschiedene Beantwortung der beiden Fragen zurück,

1. ob man einen gleichen Wassergehalt für alle Zemente festlegen oder eine gleiche Mörtelkonsistenz für jeden Zement einstellen soll und
2. ob man die Konsistenz so weich festlegen soll, daß keine Verdichtung nötig ist, oder ob man bei einem steiferen Mörtel die Verdichtung genau festlegen soll.

Wie in den meisten anderen Ländern sieht die neue deutsche Zementnorm – ebenso wie die vorangegangenen Ausgaben – einen konstanten Wassergehalt für den Normmörtel vor. Dieser Entscheidung liegt die Überlegung zugrunde, daß der Wasseranspruch üblichen Betons für eine bestimmte Konsistenz in erster Linie vom Zuschlaggemisch bestimmt wird und daß man daher den Einfluß des Zements auf die Konsistenz vernachlässigen kann. Dies trifft sicherlich für Betone mit geringem und mittlerem Zementgehalt sowie für Zemente geringer und mittlerer Feinheit zu. Sehr zementreiche Betonmischungen (mehr als  $350 \text{ kg/m}^3$ ) aus Zementen sehr hoher Mahlfineinheit (mehr als  $5000 \text{ cm}^2/\text{g}$ ) haben jedoch einen deutlich höheren Wasseranspruch für eine bestimmte Konsistenz. Die bei einer Zementprüfung mit einem konstanten Wassergehalt an sehr feinen Zementen ermittelten hohen Festigkeiten ergeben daher häufig wegen des gesteigerten Wasseranspruchs unter baupraktischen Bedingungen keinen entsprechend hohen Festigkeitsbeitrag im Beton. Da die Zemente mit sehr hoher Mahlfineinheit nur einige wenige Prozente der Erzeugung ausmachen, ist es gerechtfertigt, die für die überwiegende Zahl aller Zemente brauchbare

Beurteilung durch einen Prüfmörtel mit konstantem Wassergehalt zu wählen.

Nach der amerikanischen Prüfvorschrift ASTM C 109-70 wird andererseits der Wassergehalt nicht konstant festgelegt, sondern muß so groß gewählt werden, daß der Prüfmörtel eine vorgeschriebene Konsistenz aufweist. Sehr feine Zemente werden nach dieser Norm aufgrund ihres meist größeren Wasseranspruchs mit einem höheren Wasserzementwert geprüft als grobe und mittelfeine Zemente und liefern daher eine relativ kleinere Normfestigkeit als bei Prüfung mit konstantem Wassergehalt.

Bei der Prüfung mit konstantem Wassergehalt ist dieser in den Zementnormen der verschiedenen Länder unterschiedlich hoch. Ausgedrückt als Wasserzementwert liegen die Festlegungen in dem weiten Bereich von 0,30 bis 0,65. Da es sich immer um sehr zementreiche Prüfmörtel handelt, wird die Konsistenz des Prüfmörtels vom Wasserzementwert bestimmt. So entsteht mit einem Wasserzementwert von 0,30 ein pastenförmiger Zementleim, mit einem Wasserzementwert von 0,65 hingegen ein dünnflüssiger Zementleim. Dabei ist auch zu beachten, daß schon Zementleime mit Wasserzementwerten über 0,40 je nach Zement mehr oder weniger zum Wasserabsondern (Bluten) neigen.

Konsistenz und Wasserabsondern hängen ferner vom Normsand im Prüfmörtel ab, und zwar sowohl von dem Mischungsverhältnis Zement zu Normsand als auch von der Kornzusammensetzung des Normsands. Das Mischungsverhältnis Zement zu Sand ist in allen Normen festgelegt; in 38 von 44 Ländern beträgt es 1 : 3 [4]. In Japan gilt ein Mischungsverhältnis von 1 : 2, in den USA sowie in weiteren vier amerikanischen Staaten ein Mischungsverhältnis von 1 : 2,75. Die neue deutsche Zementnorm – ebenso wie die vorangegangenen Ausgaben – verwendet ebenfalls ein Mischungsverhältnis 1 : 3 und entspricht darin ebenso wie in anderen Festlegungen der ISO-Recommendation No. 772. Diese ISO-Empfehlung gibt das Prüfverfahren wieder, das in den 50er Jahren von den im Cembureau zusammengeschlossenen westeuropäischen Zementinstituten (Federführung Belgien) ausgearbeitet wurde und das auch von RILEM übernommen wurde.

Die Kornzusammensetzung der Normsande unterscheidet sich in den verschiedenen Normen zum Teil erheblich, sowohl was das Größtkorn und den Verlauf der Sieblinie als auch was die zulässigen Abweichungen betrifft. Der neue deutsche Normsand weist eine stetig verlaufende Sieblinie mit eng begrenzten zulässigen Abweichungen und einem Größtkorn von 2,0 mm auf. Der Normsand der bisherigen deutschen Zementnorm (Ausgabe 1942) setzte sich aus zwei eng begrenzten Korngruppen mit einem Größtkorn von 1,25 mm zusammen und entsprach einer „Ausfallkörnung“. Der neue Normsand mit stetiger Kornverteilung hat den Vorteil, daß sein Wasserrückhaltevermögen wesentlich größer ist als das des bisherigen Normsands, d. h., er wirkt einem Wasserabsondern (Bluten) des Prüfmörtels entgegen.

Die deutsche Zementnorm vor 1942 schrieb einen Wasserzementwert von 0,32 vor, der einen erdfeuchten Normmörtel lieferte. Dieser sehr steife Prüfmörtel mußte einer starken, definierten Verdichtung (Einschlagen mit einem Hammerapparat) unterzogen werden. Nach der bisherigen Zementnorm (Ausgabe 1942) betrug

der Wasserzementwert 0,60. Dabei entstand weicher Zementmörtel, der sich mit dem Handstampfer leicht verdichten ließ und bei dem daher die Verdichtungsart und -intensität praktisch ohne Einfluß auf das Ergebnis war. Andererseits neigte dieser Prüfmörtel wegen seines hohen Wasserzementwerts und seiner wenig günstigen Kornzusammensetzung des Normsand es zum Wasserabsondern, und zwar um so mehr, je geringer das Wasserrückhaltevermögen des Zements war. Nach dem Wasserabsondern des in der Form verdichteten Prüfmörtels lag der wahre Wasserzementwert daher nicht bei dem Anmachwasserzementwert von 0,60, sondern darunter, und zwar – je nach Zement – bis hinab zu 0,50 oder sogar in Einzelfällen noch tiefer.

Diesen Nachteil des unterschiedlich starken Wasserabsonderns hat der Normmörtel der neuen deutschen Zementnorm nicht, weil sein Wasserzementwert auf 0,50 vermindert wurde und weil der Normsand mit stetiger Kornverteilung ein besseres Wasserrückhaltevermögen hat. Andererseits bedarf dieser nun nicht mehr weiche, sondern plastische Normmörtel einer definierten Verdichtung. Die ISO-Empfehlung schlägt für die Verdichtung einen Schocktisch vor; in der neuen deutschen Norm wurde hierfür ein Rütteltisch vorgeschrieben, der gleiche Ergebnisse liefert, jedoch praktischer in der Handhabung ist. Die bisherige Erfahrung hat gezeigt, daß der im Vergleich zu früher jetzt zähklebrigere Prüfmörtel beim Mischen etwas Luft einzieht und daß das vollständige Austreiben der feinsten Luftporen auch bei intensiver Verdichtung schwierig ist. Hierauf ist ein Teil der Prüfstreuungen zurückzuführen.

Zur Beurteilung der Aussagekraft des Prüfverfahrens wurden insgesamt 29 Zemente, die repräsentativ für alle in Deutschland hergestellten Zementarten und Festigkeitsklassen waren, nach der neuen DIN 1164 (1970), der alten DIN 1164 (1942) sowie vergleichsweise auch nach ASTM C 109 geprüft. Außerdem wurde mit allen Zementen ein sonst gleicher Beton hergestellt, der bei einem Zementgehalt von rd.  $300 \text{ kg/m}^3$  und einem Wasserzementwert von 0,60 eine für die Praxis durchschnittliche Zusammensetzung aufwies. Zur Auswertung wurde in erster Linie die 28-Tage-Druckfestigkeit von Zement und Beton herangezogen<sup>2)</sup>. Bild 2 enthält die Ergebnisse; auf der Ordinate ist die Betondruckfestigkeit und auf der Abszisse die Zementdruckfestigkeit nach den drei Prüfverfahren aufgetragen.

Lineare Regressionen zwischen der Beton- und der jeweiligen Zementfestigkeit lieferten die in Bild 2 eingezeichneten Geraden. Die Aussagekraft eines Zementprüfverfahrens hinsichtlich des Festigkeitsbeitrags, den die einzelnen Zemente im Beton leisten, ist um so größer, je näher die Meßpunkte an der jeweiligen Re-

<sup>2)</sup> Diese Auswertung wird dem amerikanischen Zementprüfverfahren ASTM C 109 nicht ganz gerecht, weil bei der Zementprüfung eine gleiche Konsistenz des Prüfmörtels, bei der Betonprüfung hingegen ohne Berücksichtigung der Betonkonsistenz stets die gleiche Zusammensetzung gewählt wurde. Die Unterschiede in der Betonkonsistenz waren jedoch nicht sehr groß, so daß eine Korrektur keinen großen Einfluß auf das Ergebnis gehabt hätte.

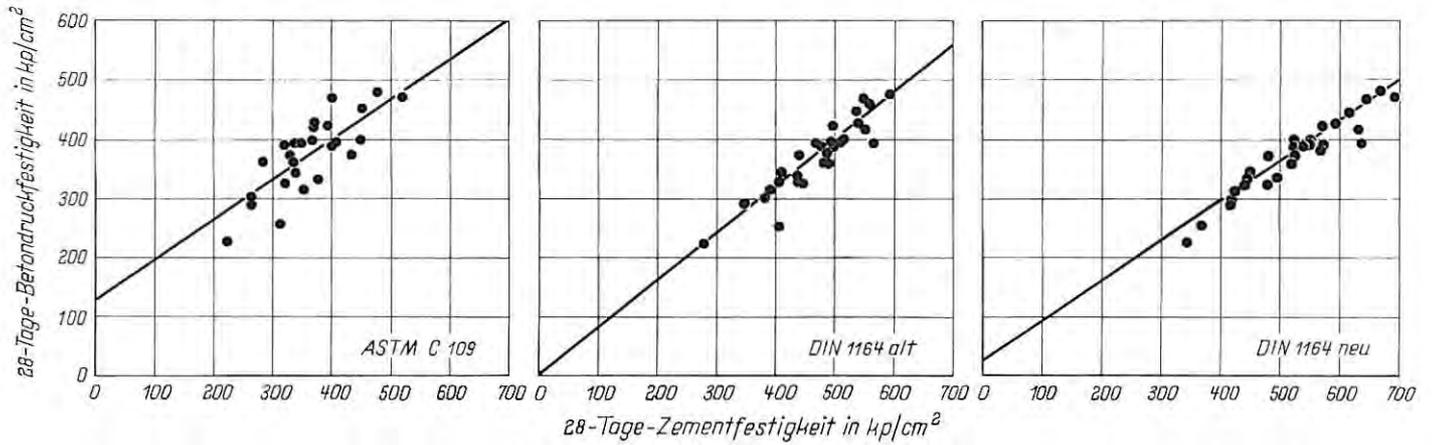


Bild 2 Beziehung zwischen der 28-Tage-Betondruckfestigkeit und der 28-Tage-Zementfestigkeit, ermittelt nach ASTM C 109, DIN 1164 alt (1942) und DIN 1164 neu (1970; entspricht ISO-Verfahren)

gressionsgeraden liegen. Eine zahlenmäßige Beurteilung hierfür stellt das Bestimmtheitsmaß dar. Für die drei Zementprüfverfahren errechnete es sich für ASTM C 109 zu 56 %, für DIN 1164 alt (1942) zu 85 % und für DIN 1164 neu (1970) zu 91 %. Für technische Vorgänge bedeuten bereits Bestimmtheitsmaße über 80 % ein hohes Maß an Zuverlässigkeit und eine Grundlage für Regelvorgänge. Das den ISO-Empfehlungen entsprechende Prüfverfahren der neuen deutschen Zementnorm DIN 1164 besitzt somit eine hohe Aussagekraft hinsichtlich des Festigkeitsbeitrags des Zements im Beton. Aber auch das bisherige Prüfverfahren nach DIN 1164 alt (1942) entsprach dieser Forderung, was auch bislang eine verhältnismäßig zuverlässige Berechnung von Betonmischungen erlaubte.

Neben seiner Aussagekraft muß ein Prüfverfahren reproduzierbare Ergebnisse liefern. Hierzu wurden umfangreiche Vergleichsversuche innerhalb einer Arbeitsgruppe des Cembureaus, ferner im Arbeitskreis „Festigkeit“ des VDZ und im Forschungsinstitut der Zementindustrie durchgeführt. Die Erwartungen hinsichtlich der Reproduzierbarkeit, die möglicherweise ursprünglich etwas zu hoch waren, haben sich bislang noch nicht ganz erfüllt, obwohl das Prüfverfahren in DIN 1164 Blatt 7 (1970) einschließlich der zulässigen Toleranzen für die Prüfeinrichtungen sehr detailliert beschrieben ist. Nur in Laboratorien, die hinsichtlich der Klimatisierung, der Ebenheit der Formen, der Mechanik der Prüfmaschine, der Belastungsgeschwindigkeit u. a. m. einen über das Übliche hinausgehenden Aufwand treiben und deren Laboranten ständig Übung mit der Zementprüfung haben, kann bei Wiederholungsprüfungen am gleichen Zement eine Standardabweichung von 10 bis 15 kp/cm<sup>2</sup> erreicht werden, was einem Variationskoeffizienten in der Größenordnung von 2 % entspricht. Bei Vergleichsversuchen mehrerer, entsprechend gut eingerichteter Laboratorien lag die Standardabweichung um 20 kp/cm<sup>2</sup>. Wenn verschiedene Zemente und alle für die Zementprüfung amtlich anerkannten Prüfstellen einbezogen wurden, überschritt die Standardabweichung 25 kp/cm<sup>2</sup> deutlich. Ein gleiches Ergebnis wurde auch bei einem Vergleichsversuch unter 6 Referenzlaboratorien der EWG gefunden, bei dem der Variationskoeffizient ebenfalls 5 % überschritt. Selbst bei weiterer Einarbeitung mit dem neuen Prüfverfahren muß damit gerechnet werden, daß die durchschnittliche Standardabweichung in der Größenordnung von 20 bis 25 kp/cm<sup>2</sup> liegen wird. Das bisherige Prüfverfahren nach DIN 1164 alt (1942) hatte trotz jahrelanger Einarbeitung sogar eine noch etwas größere durchschnittliche Standardabweichung, die vermutlich in erster Linie durch das mehr oder weniger unterschiedliche Bluten des Prüfmörtels bedingt war. Insgesamt kann man das der ISO entsprechende Prüfverfahren DIN 1164 (1970) nach dem derzeitigen Stand als das hinsichtlich Aussagekraft und Reproduzierbarkeit beste Prüfverfahren bezeichnen; das Verfahren ist allerdings nicht ganz einfach, es erfordert hohe Sorgfalt und verursacht auch nicht unbedeutende Kosten.

## 6.2 Festigkeitsklassen der Zemente

Ebenso wie alle anderen Zementnormen sah auch die bisherige DIN 1164 für die verschiedenen Festigkeitsklassen nur Mindest-

festigkeiten zu verschiedenen Zeitpunkten vor; sie konnten beliebig hoch überschritten werden. Die über die nach der Mindestfestigkeit bezeichnete Klasse hinausgehende Überfestigkeit war von Zement zu Zement unterschiedlich und — insbesondere bei der unteren Klasse Z 275 — teilweise beträchtlich. Daher war die Festigkeitsklasse auch kein ausreichendes Kriterium für die Beurteilung des Festigkeitsbeitrags eines Zements im Beton, so daß bei den Zementverbrauchern ein berechtigtes Interesse an der wahren Normfestigkeit eines Zements vorlag. Bauaufsichtlich und rechtlich hatte die Einteilung nach der Mindestfestigkeit den Nachteil, daß nur die Mindestfestigkeit garantiert und überwacht war, daß daher Schwankungen oberhalb der Mindestfestigkeit keiner Begrenzung unterlagen und daß dadurch gewisse Unsicherheiten entstehen konnten.

Die Einteilung der Festigkeitsklassen nach der neuen deutschen Zementnorm will vor allem diesen Mangel beheben. Bei den Überlegungen hierzu wurde von einem Zielwert für die 28-Tage-Festigkeit ausgegangen, der für alle Zemente einer Klasse unabhängig von ihrer Art anzustreben ist. Nun sind die Einstellmöglichkeiten für die 28-Tage-Druckfestigkeit des Erzeugnisses Zement (siehe auch Abschnitt 2) beschränkt. Wenn z.B. die bestimmte Norm-Druckfestigkeit von  $450 \text{ kp/cm}^2$  angezielt wird, so ist eine Abweichung davon in einer Größenordnung von rd.  $\pm 20 \text{ kp/cm}^2$  dem Einfluß des Herstellers entzogen. Außerdem weist das Prüfverfahren, mit dem die Einhaltung des Zielwerts überwacht wird, die im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen, relativ großen Streuungen auf. Es müssen also Toleranzen von dem Zielwert zugestanden werden, die die sich geometrisch addierenden Prüf- und Qualitätsstreuungen berücksichtigen.

Ursprünglich war daran gedacht — ähnlich wie dies bei anderen Erzeugnissen geregelt ist —, relativ enge Grenzen anzugeben, z. B.  $\pm 50 \text{ kp/cm}^2$ , die von einer bestimmten Fraktile, z. B. einer 5%-Fraktile, unter- bzw. überschritten werden durften. Diese Regelung hätte jedoch vertragsrechtliche Schwierigkeiten enthalten, weil der Nachweis, ob z. B. nur 5% aller Werte einer Lieferung unterhalb der Grenze liegen würden, eine Vielzahl von Prüfungen vorausgesetzt hätte. Man hat sich daher entschlossen, die vom Zielwert abweichenden Toleranzgrenzen bei gleicher statistischer Sicherheit so groß zu machen, daß jede Einzelprüfung innerhalb dieses Bereichs liegen muß. Da die Prüfstreuung allein bereits  $25 \text{ kp/cm}^2$  beträgt, wurde für die geometrische Summe aus Prüf- und Qualitätsstreuung eine Standardabweichung  $s$  von  $30 \text{ kp/cm}^2$  zugrunde gelegt (bei der also die Prüfstreuung eindeutig dominiert). Wenn 100% aller Einzelprüfungen innerhalb des Toleranzbereiches liegen sollen (was nach strenger statistischer Auslegung nicht möglich ist), dann muß der Bereich wenigstens  $\pm 3 s$  betragen (entspricht 99,7%), d. h., kein Einzelwert darf den Zielwert um mehr als  $90 \text{ kp/cm}^2$  unter- oder überschreiten (gewählt wurden in der Norm  $100 \text{ kp/cm}^2$ ).

In die Norm selbst wurde nicht der Zielwert aufgenommen und zur Bezeichnung der Festigkeitsklasse gewählt, sondern aus mehr formalen Gründen (Übereinstimmung mit anderen Baunormen) der untere Toleranzwert als Mindestfestigkeit und der obere Toleranzwert als obere Festigkeitsgrenze, die beide bei keiner Einzel-

prüfung überschritten werden dürfen. Die Spanne zwischen unterer und oberer Festigkeitsgrenze beträgt mithin  $200 \text{ kp/cm}^2$ , was auf den ersten Blick groß erscheint. In Wirklichkeit ist dies eine strenge Forderung; um sie einzuhalten, muß bei der Zementherstellung ein Wert in der Mitte zwischen unterer und oberer Festigkeitsgrenze angezielt werden, damit alle Prüfergebnisse innerhalb der zulässigen Festigkeitsspanne liegen. Damit kann man davon ausgehen, daß 90 % aller Festigkeitswerte von diesem Mittelwert nur um  $\pm 50 \text{ kp/cm}^2$  abweichen (5 %- und 95 %-Fraktile) und daß zwei Drittel aller Werte sogar nur um rd.  $\pm 30 \text{ kp/cm}^2$  hiervon abweichen. Die Grenzen sind in Wirklichkeit daher angemessen eng.

Statt der bisherigen Güteklassen Z 275, Z 375 und Z 475 sind in der neuen deutschen Zementnorm die Festigkeitsklassen Z 350, Z 450 und Z 550 festgelegt worden (die Zahlen geben jeweils die Mindestfestigkeit nach 28 Tagen an). Auch wenn man berücksichtigt, daß durch das neue Prüfverfahren für den gleichen Zement im allgemeinen etwas höhere Festigkeitswerte ermittelt werden, so sind doch in der neuen Norm die Mindestfestigkeiten um rd.  $50 \text{ kp/cm}^2$  angehoben worden. Für die beiden Klassen Z 350 und Z 450 sind die um  $200 \text{ kp/cm}^2$  höher liegenden, oberen Festigkeitsgrenzen eingeführt worden. Für die oberste Festigkeitsklasse Z 550 erübrigte sich die Festlegung einer oberen Grenze, weil hier die Technologie der Zementherstellung Grenzen setzt und weil eine nach noch höherer Festigkeit gerichtete Entwicklung des Zements nicht behindert werden sollte.

Neu geschaffen worden ist außerdem die Festigkeitsklasse Z 250. Zemente dieser Festigkeitsklasse, die ebenfalls eine um  $200 \text{ kp/cm}^2$  höher liegende, obere Festigkeitsgrenze aufweist, müssen stets besondere Eigenschaften, wie niedrige Hydratationswärme und/oder hohen Sulfatwiderstand, besitzen. In dieser neuen Klasse, die z. B. für sehr massige Betonbauten zweckmäßig sein kann, werden also ausschließlich Zemente mit besonderen Eigenschaften hergestellt. In anderen Festigkeitsklassen können dagegen zum Teil normale Zemente oder solche mit besonderen Eigenschaften wahlweise geliefert werden (extreme Wünsche, wie z. B. sehr hohe Festigkeit eines Z 550 und niedrige Hydratationswärme, schließen sich dabei allerdings aus zementtechnischen Gründen aus).

Die vier neuen Festigkeitsklassen unterscheiden sich in der Mindestfestigkeit nach 28 Tagen um  $100 \text{ kp/cm}^2$ . Da der Bereich zwischen Mindest- und Höchstfestigkeit  $200 \text{ kp/cm}^2$  beträgt, überschneiden sich die zu den einzelnen Klassen gehörenden Festigkeitsbereiche. Unter Berücksichtigung der Ausführungen in Abschnitt 6.1 ist es praktisch nicht möglich, einen Zement im Überschneidungsbereich zweier benachbarter Festigkeitsklassen herzustellen. Denn für jeden Zement ergibt sich bei einer großen Zahl von Prüfungen eine Häufigkeitsverteilung, wie sie in Bild 3 dargestellt ist. Für Z 350 sind beispielsweise der Mittelwert ( $450 \text{ kp/cm}^2$ ) sowie unterhalb der Abszisse der gesamte zulässige Bereich für Einzelprüfungen ( $200 \text{ kp/cm}^2$  von  $350$  bis  $550 \text{ kp/cm}^2$ ) und die 5 %- bzw. 95 %-Fraktile ( $400$  und  $500 \text{ kp/cm}^2$ ) eingetragen. Es liegen also (siehe Abschnitt 6.1) 90 % aller Werte von Einzelprüfungen in einem Kernbereich von  $400$  bis  $500 \text{ kp/cm}^2$ . Diese Kernbereiche der einzelnen Festigkeitsklassen überschneiden sich

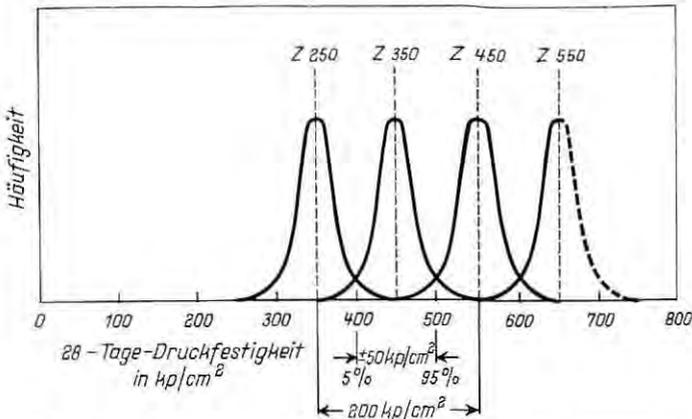


Bild 3 Häufigkeitsverteilung sehr vieler Einzelprüfungen von Zementen, die nach DIN 1164 neu (1970) hergestellt werden

somit nicht. Nur jeweils 5 % der Einzelwerte liegen in dem Kernbereich der angrenzenden, niedrigeren bzw. höheren Festigkeitsklasse. Wie in Abschnitt 6.1 dargelegt, sind die Gesamtstreuungen in erster Linie auf die Prüfstreuungen zurückzuführen, d. h., die wahre Festigkeit und damit der Festigkeitsbeitrag des Zements im Beton werden wesentlich weniger streuen und innerhalb des Kernbereichs der jeweiligen Klasse liegen.

Die neue Zementnorm DIN 1164 (1970) berücksichtigt daher zwei wesentliche Wünsche der Bauaufsicht und der Verbraucher: Sie erzwingt eine für ein Steine- und Erden-Erzeugnis bislang nicht geforderte Gleichmäßigkeit, und sie legt außerdem die Festigkeit aller Zemente einer Festigkeitsklasse auf einem einheitlichen Niveau fest.

Erst die Voraussetzung einer etwa gleichen mittleren Festigkeit der Zemente einer Klasse und der geringen Streuungen der wahren Festigkeit ermöglichte die Aufnahme der Bedingungen für einen „Rezeptbeton“ in die neue deutsche Betonnorm DIN 1045 (1971). Tafel 3 gibt den Mindestzementgehalt von Z 350 für Rezeptbetone mit einem Größtkorn von 32 mm der Festigkeitsklassen Bn 50 bis Bn 250 in Abhängigkeit vom Sieblinienbereich des Zuschlags und der Konsistenz wieder. Der Zementgehalt muß bei Zement der Klasse Z 250 um 15 % erhöht, er darf bei Z 450 um höchstens 10 % verringert werden. Auch bei einem kleineren Größtkorn als 32 mm muß der Zementgehalt erhöht werden; andererseits kann er bei einem größeren Größtkorn als 32 mm verringert werden.

Die Festlegungen der neuen Zementnorm DIN 1164 (1970) haben ebenfalls Vorteile für Beton B II, der aufgrund einer Eignungsprüfung zusammengesetzt wird. Für den Mischungsentwurf war bisher die Kenntnis der mittleren Normdruckfestigkeit und möglicher Schwankungen erforderlich. Nach der neuen Zementnorm

Tafel 3 Mindestzementgehalt für Z 350 nach DIN 1045 (1971) für Beton I mit einem Größtkorn von 32 mm

Festigkeits- klasse des Betons	Sieblinien- bereich des Zuschlags	Mindestzementgehalt in kg je m <sup>3</sup> verdichteten Betons für Konsistenzbereich		
		K 1 <sup>1)</sup>	K 2	K 3
Bn 50 *)	günstig brauchbar	140	160	—
		160	180	—
Bn 100 *)	günstig brauchbar	190	210	230
		210	230	260
Bn 150	günstig brauchbar	240	270	300
		270	300	330
Bn 250	günstig brauchbar	280	310	340
		310	340	380

<sup>1)</sup> Nur für unbewehrten Beton.

kann eine durchschnittliche Normfestigkeit des Zements in der Mitte zwischen unterer und oberer Festigkeitsgrenze sowie eine Standardabweichung (einschließlich Prüfstreuung) von 30 kp/cm<sup>2</sup> vorausgesetzt werden. Es ist daher möglich, für jede Festigkeitsklasse unmitttelbar die von K. Walz [5] veröffentlichten Kurven (Bild 4) zu verwenden und daraus für den Mischungsentwurf den für eine bestimmte Betondruckfestigkeit höchstzulässigen Wasserzementwert abzulesen. Damit entfällt auch für den Betontechnologen die bisherige Bedeutung von Jahresmittelwerten und Einzelergebnissen von Zementprüfungen. Im Hinblick auf die unvermeidbaren Prüfstreuungen ist es vielmehr abwegig, einem Mischungsentwurf Zementfestigkeiten von Einzelprüfungen zugrunde zu legen.

Neben der 28-Tage-Druckfestigkeit kann auch die Festigkeitsentwicklung, also die Anfangsfestigkeit nach einigen Tagen, eine wichtige Kenngröße für einen Zement sein; sie hat baupraktische Bedeutung, z. B. für das Ausschalen, Vorspannen oder Betonieren bei niedriger Temperatur. Die Festigkeitsentwicklung hängt im wesentlichen von den Rohstoffen und der Mahlfineinheit des Zements ab. Bei einem gegebenen Rohstoff ist es technisch nicht möglich, zugleich die Anfangs- und die 28-Tage-Druckfestigkeit eines Zements beliebig zu ändern. Muß eine bestimmte 28-Tage-Druckfestigkeit erreicht werden, dann kann die Anfangsfestigkeit nur in relativ engen Grenzen verändert werden, d. h., es stellt sich eine von Rohstoff, Zusammensetzung und Mahlfineinheit abhängige, nicht weiter regelbare Anfangsfestigkeit ein. Bild 5 zeigt schematisch die unterschiedliche Festigkeitsentwicklung von zwei Zementen gleicher 28-Tage-Druckfestigkeit.

Bisher wurde in Deutschland — wie in vielen anderen Ländern — die Anfangsfestigkeit der Zemente nicht einheitlich zu einem bestimmten Zeitpunkt, sondern bei Zementen hoher Anfangsfestigkeit früher als bei den anderen Zementen geprüft. Das hatte zwar für die Praxis zum Teil eine Berechtigung, erschwerte jedoch den Vergleich der Anfangsfestigkeit verschiedener Zemente. Auch war der Prüfaufwand bei besonders frühesten Zementen durch vier Prüftermine im Vergleich zu der dadurch gewonnenen erweiterten

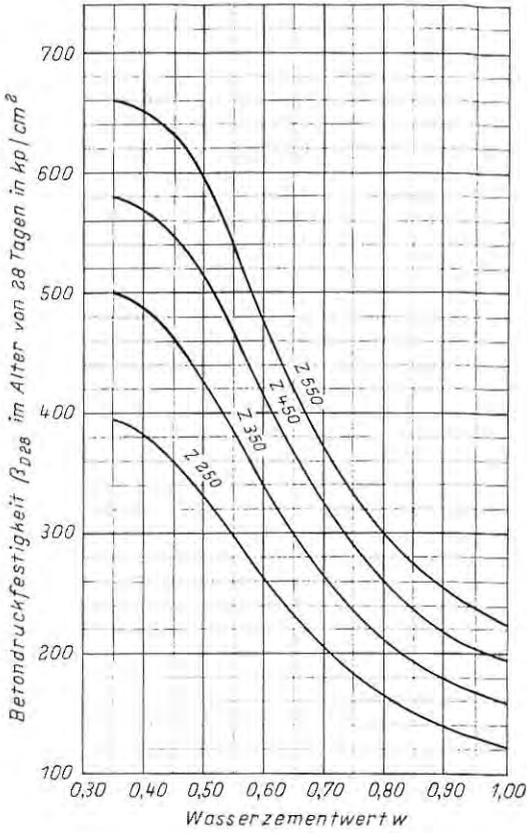


Bild 4  
Abhängigkeit  
der Betondruck-  
festigkeit vom  
Wasserzement-  
wert und von  
der Festigkeits-  
klasse des  
Zements ge-  
mäß DIN 1164  
(1970) nach  
K. Walz [5]

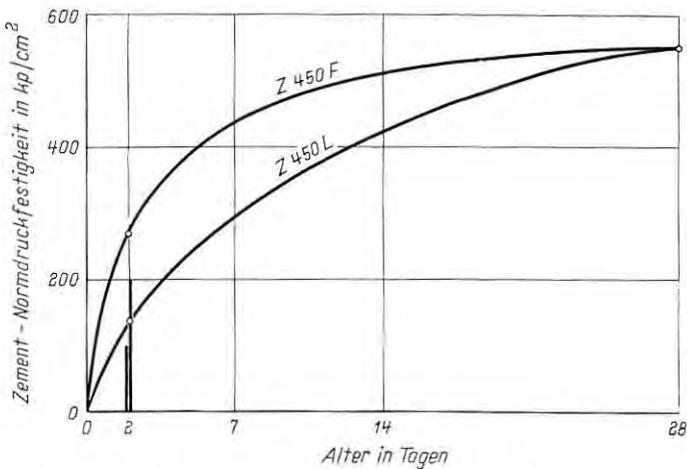


Bild 5 Schematische Darstellung der unterschiedlichen Festigkeitsentwicklung von zwei Zementen mit gleicher 28-Tage-Druckfestigkeit

Beurteilung sehr hoch. Zur Kennzeichnung der frühen Festigkeitsentwicklung reicht es aus, wenn neben der 28-Tage-Druckfestigkeit die Anfangsfestigkeit nur zu einem charakteristischen Zeitpunkt bestimmt wird. Allerdings ist dieser Zeitpunkt je nach Festigkeitsentwicklung des Zements verschieden (bei hochfesten Zementen früher). Um dem Wunsch nach Vergleichbarkeit der Zemente zu entsprechen, wurde in der neuen deutschen Zementnorm DIN 1164 (1970) für die Anfangsfestigkeit zunächst nur ein einheitlicher Prüftermin nach 2 Tagen vorgesehen. Man fand jedoch, daß die 2-Tage-Festigkeit für die langsamerer erhärtenden Zemente der Festigkeitsklassen Z 250 und Z 350 wenig Bedeutung hat, so daß der Grundsatz der Vergleichbarkeit sämtlicher Zemente

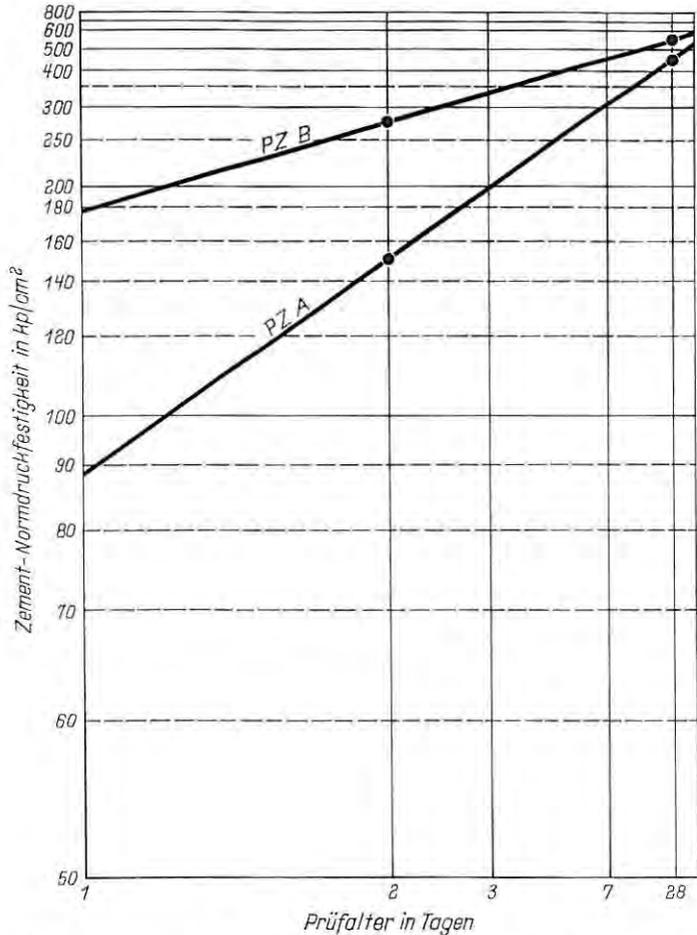


Bild 6 Nomogramm zur Ermittlung der Druckfestigkeit von Zementmörtel in Abhängigkeit vom Prüftermin nach G. Sadran und R. Delyes [6]. Aus der Festigkeit nach beispielsweise 2 und 28 Tagen kann die Festigkeit zu einem anderen Zeitpunkt, z. B. nach 1 oder 7 Tagen, bestimmt werden

verlassen werden mußte und für diese beiden Zemente eine Prüfung erst nach 7 Tagen festgelegt wurde. Man kann aber einen Vergleich mit der 2-Tage-Festigkeit anstellen. Sind nämlich die Festigkeiten an zwei Prüfterminen bekannt, dann kann man mit dem von G. Sadran und R. Dellyes [6] entwickelten Nomogramm (Bild 6) einfach und – wie sich erwies – zuverlässig die Festigkeit zu einem anderen frühen Zeitpunkt graphisch ermitteln.

Die Zemente Z 350 und Z 450, die mehr als 95 % der Erzeugung ausmachen, weisen bei jeweils gleicher 28-Tage-Druckfestigkeit je nach ihrer Zusammensetzung unterschiedliche Anfangsfestigkeiten auf (vergleiche Bild 5). Diese beiden Festigkeitsklassen sind daher in Zemente mit langsamerer Anfangserhärtung (zusätzliches Kennzeichen L) und solche mit höherer Anfangsfestigkeit (zusätzliches Kennzeichen F) unterteilt worden. Für die Klasse Z 250, in der praktisch nur Zemente mit langsamerer Anfangserhärtung hergestellt werden, und für die Klasse Z 550 mit besonders hoher Anfangsfestigkeit schien eine Unterteilung in L und F dagegen nicht notwendig.

Tafel 4 enthält die in der neuen deutschen Zementnorm DIN 1164 (1970) festgelegten Festigkeitsklassen mit den dafür maßgeblichen Anforderungen.

Tafel 4 Zementfestigkeitsklassen nach DIN 1164  
(Ausgabe Juni 1970)

Festigkeits- klasse	Druckfestigkeit in kp/cm <sup>2</sup> nach			
	2 Tagen min	7 Tagen min	28 Tagen	
			min	max
250 *)	–	100	250	450
350	L	–	350	550
	F	100		
450	L	100	450	650
	F	200		
550	300	–	550	–

\*) Nur für Zement mit niedriger Hydratationswärme und/oder hohem Sulfatwiderstand

Das Festigkeitsniveau dieser Klassen liegt um etwa 5 bis 20 % über den Anforderungen der meisten anderen Zementnormen; das gilt für die 28-Tage-Druckfestigkeit, insbesondere jedoch für die Anfangsfestigkeit des Z 450 F und des Z 550. Um nämlich die geforderten Mindestfestigkeiten von 200 bzw. 300 kp/cm<sup>2</sup> nach zwei Tagen zuverlässig einhalten zu können, ist ein darüber hinausgehendes Vorhaltemaß von etwa 40 bis 50 kp/cm<sup>2</sup> notwendig. Die bisherigen Erfahrungen zeigen jedoch, daß diese Anforderungen bei dem heutigen Stand der Zementherstellung erfüllbar sind, wogegen sie erhöhte Herstellkosten verursachen.

## 7. Raumbeständigkeit

Der Zementleim muß nach dem Anmachen nicht nur fest werden, er muß auch als Zementstein fest und raumbeständig bleiben. Das

Prüfen der Beständigkeit ist schon allein deswegen problematisch, weil die Beständigkeit in Wirklichkeit dauernd gewährleistet sein muß, die Prüfung sich hingegen allenfalls nur über Tage erstreckt, so daß es sich stets um ein Schnellprüfverfahren handelt. Selbst bei solchen Schnellprüfverfahren, die eine graduelle Abstufung liefern, ist häufig die Beziehung des Ergebnisses zum langjährigen Verhalten unter praktischen Bedingungen direkt nicht gegeben und – ebenfalls aus zeitlichen Gründen – selten systematisch untersucht worden. In vielen Fällen werden daher Anforderungen anhand von Schnellprüfverfahren gestellt, die sehr auf der sicheren Seite liegen, d. h. unangemessen scharf sind.

Die Beständigkeit des Zementsteins kann durch die Zusammensetzung des Zements und durch äußere Einflüsse in Frage gestellt sein. Zu den vom Zement herrührenden Ursachen gehören in erster Linie das Überschreiten eines bestimmten Gehalts an freiem, hart gebranntem Kalk oder an freiem Magnesiumoxid im Portlandzementklinker sowie an Sulfat im Zement. Die äußeren Ursachen sind physikalische und chemische Einwirkungen.

Alle Schnellprüfverfahren der Raumbeständigkeit hinsichtlich freien Kalks und zum Teil auch Magnesia sehen eine Alterung durch Warmbehandlung vor, z. B. durch Kochen, Darren in Dampf oder Härten im Autoklaven. Hierzu werden heute in den Zementnormen überwiegend drei Prüfverfahren verwendet, und zwar der Kochversuch, der Le-Chatelier-Versuch und der Autoklavversuch. Daneben ist vielfach der 28tägige Kaltwasserversuch vorgeschrieben.

### **7.1 Kochversuch**

Hierzu wird ein Kuchen aus Zementbrei (Wasserszementwert wie bei der Prüfung des Erstarrens zwischen 0,23 und 0,30) auf einer Glasplatte hergestellt und nach 24stündigem Erhärten in feuchtigkeitsgesättigter Luft in einen Topf mit kaltem Wasser gelegt, das in einer Viertelstunde zum Kochen gebracht wird. Der Kuchen soll in der Mitte 1,0 bis 1,5 cm dick sein und etwa 10 cm Durchmesser haben. Nach dem Kochen muß der Kuchen scharfkantig und rissfrei sein und darf sich nicht erheblich verkrümmt haben. In der neuen deutschen Zementnorm DIN 1164, Ausgabe Juni 1970, wurde erstmalig festgelegt, was unter „erheblich“ verkrümmt zu verstehen ist, nämlich ein Stich der vor dem Kochen ebenen Bodenfläche des Kuchens von mehr als 2 mm.

Von den in [4] erfaßten Zementnormen von 44 Ländern sehen 18 den Kochversuch als alleinige oder eine unter mehreren Raumbeständigkeitsprüfungen vor. Recht unterschiedlich ist allerdings die vorgeschriebene Dauer des Kochens; sie liegt zwischen  $\frac{1}{2}$  und 6 Stunden und beträgt meist 2 oder 3 Stunden. Ein längeres Kochen verschärft zwar in gewissem Grade das Prüfverfahren, jedoch dürfte ein über 2 oder 3 Stunden hinausgehendes Kochen bei der nur augenscheinlichen Beurteilung kaum zu einer gesicherteren Aussage führen. In Deutschland ist sowohl in der bisherigen als auch in der neuen Zementnorm eine Kochdauer von 2 Stunden vorgeschrieben.

Der Kochversuch ist eine Ja-Nein-Prüfung, die in erster Linie den Gehalt an freiem, hart gebranntem Kalk auf ein für nahezu alle Anwendungsfälle unschädliches Maß begrenzt. Ist der Zement noch sehr frisch, dann kann das Prüfverfahren übertrieben scharf ansprechen, d. h., obwohl die Prüfung nicht bestanden wird, ist der Zement dennoch für normalerhärtenden Beton geeignet. Aus diesem Grunde sehen die meisten Zementnormen vor, daß bei einem negativen Prüfbefund der Zement 3 oder 7 Tage an Luft auszubreiten und die Prüfung mit diesem Zement zu wiederholen ist; maßgebend ist dann die zweite Prüfung.

Warmbehandelte oder dampfgehärtete Betone aus zementreichen, sehr steifen und besonders stark verdichteten Mischungen sind während der Behandlung wesentlich empfindlicher hinsichtlich irgendwelcher Einflüsse auf die Raumbeständigkeit als normalerhärtende Betone. In solchen Fällen kann es sein, daß die Aussagekraft des Kochversuchs beim seltenen Zusammentreffen mehrerer ungünstiger Einflüsse nicht ausreicht. In einigen Ländern enthalten die Zementnormen daher zusätzliche schärfere Prüfungen, die jedoch gesondert vereinbart werden müssen, oder es ist in der Norm die Anforderung an „Sonderzement für Warmbehandlung“ festgelegt.

Unter Berücksichtigung der Aussagekraft dieses in seiner Durchführung einfachen und nur wenig Kosten verursachenden Ja-Nein-Prüfverfahrens ist die Reproduzierbarkeit des Kochversuchs ausreichend.

## 7.2 Le-Chatelier-Versuch

Bei dem nach dem französischen Zementchemiker benannten Versuch handelt es sich im Prinzip um den Kochversuch, mit dem Unterschied, daß der Wasserzusatz des Zementbreis etwas geringer ist und daß mit einer einfachen Versuchseinrichtung (Manschette mit zwei 16,5 cm langen Nadeln) die Dehnung eines Zylinders von 30 mm Durchmesser in Millimeter gemessen wird. Man erhält bei der Prüfung also Zahlenwerte und umgeht damit die Unsicherheiten einer Beurteilung nach Augenschein. Die Messungen sind damit zwar eindeutig, jedoch wird die Aussagekraft des Prüfverfahrens dadurch nicht verbessert, weil die Relation zwischen den so gefundenen Meßwerten und der Raumbeständigkeit des Betons unter den verschiedensten Bedingungen nicht bekannt ist, möglicherweise auch gar nicht hinreichend korreliert. Das geht auch aus den auf praktischer Erfahrung beruhenden Festlegungen der noch zulässigen Dehnung in den Zementnormen der Länder hervor, in denen der Le-Chatelier-Versuch für die Raumbeständigkeit des Zements maßgebend ist (mehr als die Hälfte aller Länder benutzt diese Prüfung).

Ähnlich wie beim Kochversuch liegt die vorgeschriebene Dauer des Kochens zwischen 1 und 6 Stunden, überwiegend bei 3 Stunden. In einigen Ländern muß die Kochdauer verlängert werden, wenn der MgO-Gehalt 3,0 Gew.-% übersteigt. Der Beurteilung der Meßwerte liegen in den verschiedenen Ländern sehr unterschiedlich höchstzulässige Dehnungen zwischen 3 und 10 mm zugrunde, meist allerdings 10 mm nach einer Kochdauer von 1 bis 6 Stun-

den. Zwei Länder schreiben für verschiedene Zementarten bzw. -typen bei gleicher Kochdauer verschiedene obere Grenzwerte vor. Ebenso wie beim Kochversuch darf in den meisten Ländern der Le-Chatelier-Versuch an 7 Tage an Luft ausgebreitetem Zement wiederholt werden, wenn die Prüfung zunächst nicht bestanden wurde. Wenn für die erste Prüfung eine relativ große Dehnung von 10 mm zugestanden wird, dann darf bei der Wiederholung am 7 Tage lang belüfteten Zement die Dehnung häufig nur noch 5 mm erreichen.

Hinsichtlich Aussagekraft und Reproduzierbarkeit sind der Koch- und der Le-Chatelier-Versuch etwa gleich. Das objektive Messen von Dehnungen beim Le-Chatelier-Versuch ermöglicht jedoch unterschiedliche Anforderungen, z. B. bei der Wiederholung oder bei Zementen für spezielle Anwendungsbereiche. Andererseits ist noch offen, ob bei einem so stark und grob vereinfachenden Schnellprüfverfahren, wie es das Kochen eines 1 Tag alten Zementsteins darstellt, die Beurteilung mittels Zahlenwerten nicht eine Aussagekraft vortäuscht, die in Wirklichkeit gar nicht vorhanden ist, so daß eine Ja-Nein-Beurteilung für ein solches Schnellverfahren angemessener ist.

### 7.3 Autoklav-Versuch

Beim Autoklav-Versuch, der in Nord- und Südamerika fast ausschließlich in den Normen vorgeschrieben ist, wird ein Zementbrei mit Normensteife in Prismenformen  $2,5 \times 2,5 \times 25$  cm gefüllt und nach 24stündigem Erhärten in einem Autoklav innerhalb von rd. 1 Stunde auf rd. 21 atü und  $216^{\circ}\text{C}$  gebracht und unter diesen Bedingungen 3 Stunden dampfgehärtet. Nach dem ebenfalls in bestimmter Weise vorgeschriebenen Abkühlen wird die Dehnung gemessen. Während durch Koch- und Le-Chatelier-Versuch nur die Dehnungen durch den freien Kalk vollständig erfaßt werden, erfaßt der Autoklav-Versuch zusätzlich etwaige Dehnungen infolge eines unzulässig hohen MgO-Gehalts vollständig. Auch für die Autoklav-Schnellprüfung gibt es keine durch umfangreiche Langzeitversuche gesicherten Relationen zum Verhalten des Zements im Beton, so daß die Anforderungen in den Normen lediglich auf der sicheren Seite liegende Erfahrungen der Praxis darstellen. Die vorgeschriebenen höchstzulässigen Dehnungen sind in den verschiedenen Normen recht unterschiedlich festgelegt; sie liegen zwischen 0,2 und 1,0 ‰, in der Mehrzahl bei 0,8 bis 1,0 ‰.

Im Vergleich zum Koch- und Le-Chatelier-Versuch hat der Autoklav-Versuch den Vorteil, daß er einen kritischen Gehalt an freiem MgO durch das Prüfverfahren erfaßt. Wird die Gefahr eines MgO-Treibens durch Festlegen einer Grenze für den MgO-Gehalt ausgeschlossen (siehe Abschnitt 7.5), dann sind die Aussagekraft und Reproduzierbarkeit des Autoklav-Versuchs nicht besser als die des Koch- oder Le-Chatelier-Versuchs. Das Verfahren ist andererseits nicht so einfach in der Durchführung, und es ist vor allem apparativ sehr aufwendig, so daß unter Berücksichtigung sämtlicher Kriterien für ein genormtes, allgemein verbindliches Prüfverfahren bei Eingrenzung des MgO-Gehalts für einzelne Zementarten dem Koch- oder Le-Chatelier-Versuch der Vorzug zu geben ist. Das schließt nicht aus, daß der Autoklav-Versuch in besonde-

ren Fällen ein aufschlußreiches Prüfverfahren darstellt, z. B. wenn aus Rohstoffgründen Zemente mit überhöhtem MgO-Gehalt hergestellt werden sollen.

#### **7.4 Kaltwasser-Versuch**

Gleiche Kuchen aus Zementbrei wie beim Kochversuch werden bis zum Alter von 28 Tagen unter Wasser von rd. 20 °C gelagert und anschließend nach Augenschein beurteilt. Der Kaltwasserversuch ist von allen Raumbeständigkeitsprüfungen am einfachsten durchzuführen. Seine Aussagekraft ist jedoch beschränkt, weil bei diesen Lagerungsbedingungen innerhalb von 4 Wochen ein Treiben infolge eines zu hohen Anteils an freiem, hart gebranntem Kalk oder an Sulfat nicht unbedingt feststellbar ist. Das gleiche gilt auch für einen unzulässig hohen MgO-Gehalt. Die treibende Wirkung sehr hoher Gehalte an freiem Kalk und vor allem Sulfat wird jedoch erkennbar. Wegen seiner geringen Aussagekraft ist der Kaltwasserversuch, der bisher in der deutschen Zementnorm enthalten war, in die neue DIN 1164, Ausgabe Juni 1970, nicht mehr übernommen worden.

#### **7.5 MgO-Gehalt**

Alle 44 in [4] aufgeführten Normen der Welt begrenzen den MgO-Gehalt im Portlandzement, und zwar auch dann, wenn in den Normen eine Autoklavprüfung vorgeschrieben ist. Der höchstzulässige Gehalt an MgO ist in den Normen unterschiedlich festgelegt; er liegt zwischen 3 und 6 Gew.-%, meistens bei 5 Gew.-%.

Ein höherer Gehalt an freiem MgO führt nur bei Portlandzementklinker zu Treiben, bei Hüttensand hingegen nicht. Aus diesem Grunde ist in den Normen einiger Länder, so z. B. auch in Deutschland, nur der MgO-Gehalt im Portlandzementklinker begrenzt. In anderen Normen darf der MgO-Gehalt von Hochofenzement größer sein als der von Portlandzement, und zwar bis zu 8 %.

Die Begrenzung des MgO-Gehalts im Portlandzementklinker auf 5 Gew.-% ist eine verlässliche Grenze, daß kein MgO-Treiben auftritt. Eine gesonderte Prüfung, wie z. B. der Autoklav-Versuch, ist dann entbehrlich.

#### **7.6 Sulfatgehalt**

Dem Zement wird beim Mahlen Sulfat, gewöhnlich als Gipsstein oder Anhydrit, zugesetzt, um das Erstarren zu regeln; außerdem wird dadurch die Anfangsfestigkeit des Zements günstig beeinflusst. Der Sulfatgehalt wird im allgemeinen als  $\text{SO}_3$  in Gew.-% angegeben. Ein höherer  $\text{SO}_3$ -Gehalt kann zu Quellen (z. B. für Quellzement), ein darüber hinausgehender Gehalt zu zerstörendem Treiben durch Ettringitbildung führen. Ob ein  $\text{SO}_3$ -Gehalt zu Quellen oder Treiben führt, hängt nicht nur von seiner Höhe ab, sondern auch von der Zusammensetzung und Mahlfineinheit des Zements, ferner von der Betonzusammensetzung und den Lagerungsbedingungen. Von großem Einfluß ist die Lagerungstemperatur, z. B. kann unter sonst gleichen Bedingungen eine Lagerung bei 5 °C zu Treiben führen, bei 20 °C hingegen nicht. Aus diesem

Grunde sind auch Prüfungen mit einer Lagerungstemperatur von 20 °C, wie z. B. der Kaltwasserversuch, kein ausreichendes Kriterium.

In allen Zementnormen der Welt wird der  $\text{SO}_3$ -Gehalt begrenzt, meist mit einem für alle Zemente auf der sicheren Seite liegenden Wert in der Größenordnung von 3 Gew.-%. Diese einfache Regelung wird der heutigen Zementtechnologie nicht gerecht, weil für einige Zemente ein etwas höherer  $\text{SO}_3$ -Gehalt nicht nur unbedenklich, sondern wegen dann verbesserter Zementeigenschaften sogar erwünscht ist. Im Forschungsinstitut der Zementindustrie ist man daher der Frage nachgegangen, welche speziellen Zementeigenschaften einen höheren  $\text{SO}_3$ -Gehalt erwünscht erscheinen lassen. Höhere  $\text{SO}_3$ -Gehalte sind vor allem unbedenklich (auch bei niedrigen Temperaturen) und darüber hinaus angebracht, wenn der Zement sehr fein gemahlen wird, wenn der Gehalt an Tricalciumaluminat hoch ist und wenn der Zement einen hohen Hüttensandanteil aufweist. Daneben spielen einige weitere Zementeigenschaften eine, wenn auch weniger bedeutsame Rolle.

Ähnlich wie bereits in anderen Zementnormen, sieht die neue DIN 1164, Ausgabe Juni 1970, daher unterschiedlich höchstzulässige  $\text{SO}_3$ -Gehalte vor, die zwischen 3,5 und 4,5 Gew.-% liegen. Portland-, Eisenportland- und Traßzement dürfen bei einer Mahlfeinheit bis zu 4000  $\text{cm}^2/\text{g}$  einen  $\text{SO}_3$ -Gehalt von 3,5 %, bei höherer Mahlfeinheit dagegen 4,0 Gew.-%  $\text{SO}_3$  aufweisen. Unabhängig von der Mahlfeinheit darf der  $\text{SO}_3$ -Gehalt von Hochofenzement mit bis zu 70 Gew.-% Hüttensandanteil 4,0 Gew.-% betragen, bei einem höheren Hüttensandgehalt 4,5 Gew.-%. Diese Regelung berücksichtigt die beiden wichtigsten Einflußgrößen, andere hingegen nicht; sie stellt einen für die Praxis leicht überschaubaren Kompromiß dar, ohne daß damit ausgedrückt sein soll, daß nicht andere Regelungen ebenso zweckmäßig sein könnten. Die im Forschungsinstitut der Zementindustrie durchgeführten Untersuchungen haben allerdings gezeigt, daß diese Festlegungen auch bei ungünstigen Bedingungen ein Treiben durch zu hohen Sulfatgehalt ausschließen.

## 8. Mahlfeinheit

Durch weitergehende Zerkleinerung, also feineres Mahlen, steigt die spezifische Oberfläche des Zements ( $\text{cm}^2/\text{g}$ ) an, die beim Anmachen mit dem Wasser in Berührung kommt und reagiert. Die Zemente nach DIN 1164 weisen im allgemeinen spezifische Oberflächen zwischen 2200 und 6000  $\text{cm}^2/\text{g}$  auf. Feinere Zemente hydratisieren wegen ihrer größeren Oberfläche schneller und liefern insbesondere in den ersten Tagen eine höhere Festigkeit. Auf andere bautechnische Eigenschaften des erhärteten Betons hat die Mahlfeinheit nur einen untergeordneten Einfluß. Wird der Zement sehr grob oder sehr fein gemahlen, so ändern sich allerdings in gewissen Grenzen die Frischbetoneigenschaften. Grobe Zemente (wesentlich unter 2500  $\text{cm}^2/\text{g}$ ) haben ein geringeres Wasserrückhaltevermögen und neigen daher zum Wasserabsondern (Bluten); das ist manchmal erwünscht, zum Beispiel bei der Herstellung von Asbestzementwaren oder Schleuderbetonrohren, bei üblichem Baubeton jedoch weniger günstig. Sehr

feine Zemente (wesentlich über  $5000 \text{ cm}^2/\text{g}$ ) haben einen für eine bestimmte Konsistenz erhöhten Wasseranspruch und liefern bei niedrigen Wasserzementwerten einen zähklebrigen Zementleim, so daß für die Verarbeitung von zementreichen Mischungen dann meist ein etwas höherer Wasserzementwert gewählt wird und damit ein Teil der Vorzüge des sehr feinen Mahlens (besonders hohe Anfangsfestigkeit) nicht wirksam wird. Demgegenüber ist in einem mittleren Bereich der Mahlfeinheit, der größenordnungsmäßig zwischen  $2800$  und  $4200 \text{ cm}^2/\text{g}$  liegt, der Einfluß auf die Frischbetoneigenschaften im allgemeinen vernachlässigbar klein; es ist daher bedeutungslos, wenn die Zemente zur Einhaltung des angestrebten Zielwertes für die 28-Tage-Festigkeit in der Mahlfeinheit selbst um einige Hundert  $\text{cm}^2/\text{g}$  schwanken.

Gepprüft wurde die Mahlfeinheit früher ausschließlich und auch heute noch in zahlreichen Ländern durch den Gewichtsrückstand auf einem Prüfsieb, für dessen Maschenweite in den meisten Ländern ein Wert zwischen  $74$  und  $90 \mu\text{m}$  vorgeschrieben ist. Die Eigenschaften des Zements werden jedoch überwiegend vom Anteil der Zementkörner unter  $30 \mu\text{m}$  ( $0,03 \text{ mm}$ ) bestimmt. Entsprechende feine Prüfsiebe, die an sich angemessen wären, haben jedoch im Dauereinsatz erhebliche prüftechnische Nachteile. Früher, als die Kornverteilung der Zemente wegen des gleichen Mühlentyps überall annähernd gleich oder ähnlich war, hatte der Rückstand auf dem  $90\text{-}\mu\text{m}$ -Sieb noch eine gewisse Aussagekraft. Bei den heutigen Mahlanlagen, bei denen die feineren Bestandteile während des Mahlens teilweise durch Sieber ausgeschieden werden, reicht dieser Rückstand zur Beurteilung der Mahlfeinheit nicht mehr aus.

Es sind daher andere Prüfverfahren entwickelt worden, mit denen man entweder die Anteile feinerer Korngrößen bestimmen kann, zum Beispiel durch Sichten oder Sedimentation, oder mit denen man indirekt die spezifische Oberfläche des Zements messen kann, zum Beispiel durch Luftdurchlässigkeitsmessungen eines Pulverbettes oder durch Lichtabsorption einer Suspension. Von den Prüfverfahren für die Mahlfeinheit [7] dürfte die spezifische Oberfläche die größte Aussagekraft für die bautechnischen Eigenschaften des Zements haben. Einschränkend ist allerdings anzumerken, daß schon wenige Prozente von äußerst feinen Bestandteilen zu einem – gemessen an den bautechnischen Eigenschaften des Zements – überproportionalen Ansteigen der spezifischen Oberfläche führen. Von den Prüfverfahren zur Bestimmung der spezifischen Oberfläche hat das auf der Messung der Luftdurchlässigkeit beruhende Verfahren von Blaine, das auch in die neue deutsche Zementnorm aufgenommen worden ist, die breiteste Aufnahme in Normen gefunden. Daneben enthalten einige Normen zur Bestimmung der spezifischen Oberfläche auch das nach dem gleichen Prinzip arbeitende Verfahren von Lea und Nurse oder das auf der Lichtabsorption beruhende Verfahren mit einem Turbidimeter nach Wagner. Bei dem gleichen Zement findet man mit dem Verfahren nach Blaine etwa die 1,75fache spezifische Oberfläche wie mit dem Turbidimeter nach Wagner.

Ob und gegebenenfalls welche Anforderungen man aus bautechnischen Gründen an die Mahlfeinheit des Zements stellen sollte,

läßt sich nicht ohne weiteres begründen, weil je nach Anwendungsbereich ein grober oder feiner Zement günstiger sein kann. Im übrigen kommt der Einfluß der Mahlfineinheit auf die Festigkeitsentwicklung bereits bei der Festigkeitsprüfung in der Norm zur Geltung. 15 % aller Normen enthalten keine Anforderungen an die Mahlfineinheit. In den anderen Normen wird eine Mindest-Mahlfineinheit vorgeschrieben, die jedoch bewußt niedrig gehalten ist, damit auch vom Verbraucher manchmal gewünschte oder in vielen Fällen noch gut anwendbare grobe Zemente ebenfalls normgerecht sind. Solche Grenzen, wie zum Beispiel der vorgeschriebene höchstzulässige Rückstand von 15 oder 20 % auf dem 90- $\mu$ m-Sieb, haben jedoch kaum eine Aussagekraft.

In der neuen deutschen Zementnorm DIN 1164, Fassung Juni 1970, ist als untere Grenze der Mahlfineinheit 2200  $\text{cm}^2/\text{g}$  (nach Blaine) und für Sonderfälle 2000  $\text{cm}^2/\text{g}$  festgelegt. Außerdem darf der Rückstand auf dem sehr groben 200- $\mu$ m-Sieb (0,2 mm) nicht größer als 3 Gew.-% sein; dadurch wird der Anteil etwaiger groberer Bestandteile beschränkt. Die Normen anderer Länder schreiben zum Teil eine ähnliche oder etwas feinere Mindest-Mahlfineinheit (größenordnungsmäßig 2500  $\text{cm}^2/\text{g}$ ) vor, vereinzelt auch für verschiedene Festigkeitsklassen verschieden hohe Mindest-Mahlfineinheiten; dies ist jedoch aus bautechnischer Sicht nicht begründet. Aus alledem ergibt sich, daß die Mahlfineinheit eine wichtige Kenn- und Regelgröße bei der Zementherstellung ist und nur in Sonderfällen eine bautechnische Bedeutung hat.

## 9. Sulfatwiderstand

In erhärteten Beton eindringende Sulfationen können durch Reaktionen mit den Hydratphasen des Zementsteins ein Treiben bewirken (Bildung von Ettringit-Kristallen). Neben betontechnischen Einflüssen hängt der Widerstand des Betons gegen Sulfatangriff vom Zement ab, denn die Zemente weisen einen recht unterschiedlichen Sulfatwiderstand auf.

Es gibt zahlreiche Prüfverfahren für den Sulfatwiderstand des Zements. Dabei werden meist erhärtete Probekörper aus Zementstein, Zementmörtel oder Beton nach einer festgelegten Vorlagerung in Sulfatlösungen mit unterschiedlicher Zusammensetzung und Konzentration eingelagert. Zu verschiedenen Lagerungszeiten – wenigstens Wochen und meist Monate – werden die Probekörper untersucht, und zwar je nach Prüfverfahren sehr unterschiedlich, zum Beispiel nach Augenschein, durch Wiegen, durch Dehnungsmessungen, durch Festigkeitsbestimmungen oder durch Ultraschallmessungen.

Da das Sulfatreiben in der Praxis gewöhnlich erst nach Monaten oder Jahren auftritt, handelt es sich bei allen obengenannten Prüfverfahren um Schnellprüfverfahren, deren Übertragbarkeit auf das Langzeitverhalten wie bei allen Raumbeständigkeitsprüfungen nicht direkt gegeben ist. Eine zumindest qualitative Aussage ist jedoch für einige Verfahren durch Vergleich mit mehrjährigen Lagerungsversuchen von Beton nachgewiesen worden.

Sehr umfangreiche und mehr als ein Jahrzehnt dauernde Untersuchungen des Arbeitskreises „Sulfatwiderstand“ im Verein Deut-

scher Zementwerke haben allerdings ergeben, daß diese Schnellprüfverfahren — selbst bei Lagerungszeiten von drei oder vier Monaten — hohe Streuungen aufweisen. Wenn sie zur Beurteilung des Zements und zum Festlegen von Anforderungen in einer Norm herangezogen würden, müßte bei einer Einzelprüfung ein unangemessen hohes Vorhaltemaß gewählt oder für eine gesicherte Beurteilung ein Mittelwert aus ausreichend vielen Parallelversuchen gebildet werden. Beide Bedingungen bedeuten einen nicht tragbaren Aufwand; außerdem ist ein Monate in Anspruch nehmendes Prüfverfahren für eine Norm, die der laufenden Güteüberwachung dient und auch den Liefervereinbarungen zwischen Hersteller und Verbraucher zugrunde gelegt wird, wenig geeignet. Denn ein Nachweis der normgerechten Beschaffenheit dauert unzumutbar lange. Die ursprüngliche Absicht, in die neue deutsche Norm ein technologisches Prüfverfahren für den Sulfatwiderstand des Zements aufzunehmen, wurde aus diesen Gründen aufgegeben.

Aus den obengenannten Untersuchungen sowie aus dem Schrifttum geht andererseits hervor, daß zweckmäßig hergestellter Beton praktisch sulfatbeständig ist, wenn Portlandzement mit einem sehr kleinen Gehalt an Tricalciumaluminat ( $C_3A$ ) oder wenn Hochofenzement mit seinem sehr hohen Hüttensandgehalt verwendet wird. Eine hierauf beruhende Unterscheidung der Zemente nach ihrem Sulfatwiderstand übernahm man daher statt eines technologischen Prüfverfahrens in die neue deutsche Zementnorm (siehe Schluß dieses Abschnittes).

Der  $C_3A$ -Gehalt von Portlandzement kann dadurch gesenkt werden, daß dem Rohmehl erhöhte Mengen an Eisenoxid zugegeben werden, weil sich in der Schmelze zunächst Calciumaluminatferrit bildet und nur der darüber hinausgehende Anteil an Aluminiumoxid für die  $C_3A$ -Bildung zur Verfügung steht. Eingehendere Untersuchungen ergaben weiter, daß der Sulfatwiderstand von Portlandzement dann geringer ist, wenn das Rohmehl einen hohen Anteil an Aluminiumoxid enthält, auch wenn für die Herstellung eines  $C_3A$ -armen Zements entsprechend viel Eisenoxid zugegeben wird. Aus diesem Grunde wurde in der neuen deutschen Zementnorm nicht nur der  $C_3A$ -Gehalt, sondern zusätzlich der Aluminiumoxidgehalt begrenzt.

Der Sulfatwiderstand von Hochofenzement ist nicht ausschlaggebend von der Zusammensetzung des Hüttensandes abhängig. Ein geringer oder mittlerer Hüttensandgehalt vermag den Sulfatwiderstand eines Zements aus nicht sulfatwiderstandsfähigem Portlandzementklinker nicht wesentlich zu verbessern. Hierzu ist ein hoher Gehalt an Hüttensand erforderlich, dessen Höhe in gewissen Grenzen von der Beschaffenheit und der Zusammensetzung des Hüttensandes und des Klinkers abhängt. Die genaue Bestimmung des Hüttensandgehalts in einem Zement ist schwierig; man muß mit einem Fehler in der Größenordnung von 3 bis 5% rechnen. Der in der neuen deutschen Zementnorm festgelegte Hüttensandgehalt von mindestens 70 Gew.-% bietet unter Berücksichtigung dieses Prüffehlers und unabhängig von der Beschaffenheit und Zusammensetzung von Hüttensand und Klinker stets die Gewähr für einen Hochofenzement mit hohem Sulfatwiderstand.

Aus den vorangegangenen Ausführungen geht hervor, daß es im Hinblick auf Beständigkeit einen Zement mit „mäßigem“ Sulfatwiderstand nicht geben kann, obschon bei einem mäßigen Sulfatangriff auch mit anderen Zementen ein verhältnismäßig widerstandsfähiger Beton hergestellt werden kann. Die neue deutsche Zementnorm sieht daher als besondere Eigenschaft nur Zement mit „hohem“ Sulfatwiderstand vor, d. h., es handelt sich bei den Anforderungen um ein Ja-Nein-Kriterium. Eine solche einfache Unterteilung in Zemente ohne und mit hohem Sulfatwiderstand reicht auch für die praktischen Belange vollständig aus, wenn man die weiteren Festlegungen über die Beurteilung sulfatangreifender Wasser und Böden in DIN 4030 sowie die Maßnahmen bei bestimmten Angriffsgraden nach DIN 1045 mit heranzieht.

DIN 4030 sieht bei sulfathaltigen Wässern drei Angriffsgrade in Abhängigkeit vom  $\text{SO}_4$ -Gehalt vor, und zwar

Sulfatgehalt $\text{SO}_4$ in mg/l	200 bis 600	600 bis 3000	über 3000
Angriffsgrad	schwach angreifend	stark angreifend	sehr stark angreifend

Die zugehörigen betontechnischen Maßnahmen enthält DIN 1045, Abschnitt 6.5.7.4. Bis zu einem Sulfatgehalt von 200 mg/l wird jeder „dichte“ Beton unabhängig vom verwendeten Zement als ausreichend widerstandsfähig angesehen. Bei darüber hinausgehenden Sulfatgehalten ist die Dichtigkeit nachzuweisen; außerdem muß bei sulfathaltigen Wässern mit über 400 mg/l  $\text{SO}_4$  oder bei sulfathaltigen Böden mit über 3000 mg  $\text{SO}_4$  je kg lufttrockenen Bodens Zement mit hohem Sulfatwiderstand verwendet werden. Nach der neuen deutschen Zementnorm DIN 1164, Fassung Juni 1970, gelten als Zemente mit hohem Sulfatwiderstand:

Portlandzement mit einem rechnerischen Gehalt an Tricalciumaluminat  $\text{C}_3\text{A}$  von höchstens 3 Gew.-% und mit einem Gehalt an Aluminiumoxid  $\text{Al}_2\text{O}_3$  von höchstens 5 Gew.-%,

Hochofenzement mit mindestens 70 Gew.-% Hüttensand und höchstens 30 Gew.-% Portlandzementklinker.

Der Gehalt an Tricalciumaluminat wird aus der chemischen Analyse nach der Formel  $\text{C}_3\text{A} = 2,65 \text{ Al}_2\text{O}_3 - 1,69 \text{ Fe}_2\text{O}_3$  errechnet (Angaben in Gew.-%); dabei wird  $\text{Al}_2\text{O}_3$  als Differenz durch Abzug von  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  von der Summe der Sesquioxide bestimmt.

## 10. Hydrationswärme

Die Hydratation des Zements ist ein exothermer Vorgang, bei dem die Wärme um so schneller freigesetzt wird, je höher die Anfangsfestigkeit des Zements ist, und bei dem insgesamt mehr Wärme freigesetzt wird, je höher die Endfestigkeit ist. Das Verhältnis von freigesetzter Wärme zum Festigkeitsbeitrag ist allerdings bei den verschiedenen Zementbestandteilen verschieden. Bezogen auf durchschnittliche Verhältnisse liefern Tricalciumaluminat und Tri-

calciumsilicat mehr Wärme je Einheit Festigkeitsbeitrag, Dicalciumsilicat sowie Hüttensand hingegen weniger Wärme.

Zemente, die bezogen auf ihre Festigkeit eine insgesamt niedrige Hydratationswärme aufweisen und die diese Wärme auch noch vergleichsweise langsam abgeben (also langsam hydratisieren), sind bei massigen Betonbauteilen vorteilhaft, weil dann geringere Spannungen infolge Erwärmung und Temperaturunterschieden entstehen. Andererseits können auch schnell hydratisierende Zemente mit hoher Anfangsfestigkeit, die eine vergleichsweise hohe Wärmemenge in den ersten Tagen freisetzen, vorteilhaft sein, z. B. im Winterbau bei niedrigen Temperaturen. Der in der Praxis des öfteren geäußerte Wunsch nach Zement mit hoher Anfangsfestigkeit und zugleich niedriger Hydratationswärme ist dagegen wegen des untrennbaren Reaktionsmechanismus nicht zu verwirklichen.

Für die Bestimmung der Hydratationswärme bietet sich entweder das Lösungskalorimeter mit vorangegangener isothermer Lagerung der Prüfkörper oder das adiabatische Kalorimeter an, in dem die Temperatur des Probekörpers proportional zur entwickelten Wärmemenge ansteigt. Außerdem ist die Bestimmung in einem isolierten Gefäß, z. B. einem Dewar-Gefäß, möglich, bei dem der Wärmeabfluß lediglich behindert, jedoch durch Eichung bekannt ist; die Lagerung ist daher weder rein isotherm noch rein adiabatisch.

Die adiabatische Lagerung entspricht etwa den Verhältnissen im Innern massiger Bauteile, d. h., eine Prüfung mit dem adiabatischen Kalorimeter läßt grundsätzlich eine größere Aussagekraft hinsichtlich dieser bautechnischen Eigenschaft erwarten. Für eine isotherme Lagerung, z. B. bei 20 °C, spricht, daß auch die übrigen Zementeigenschaften, wie z. B. die Festigkeitsentwicklung, bei isothermer Lagerung ermittelt werden. Obschon bei einem Abwägen aller Gesichtspunkte das adiabatische Prüfen der Hydratationswärme des Zements einige Vorteile hinsichtlich der direkten Übertragbarkeit auf bautechnische Eigenschaften haben mag, stehen diese Vorteile in gar keinem Verhältnis zu den vielfach höheren Kosten einer Prüfung mit dem adiabatischen Kalorimeter. Diese ungewöhnlich hohen Untersuchungskosten ergeben sich dadurch, daß jeweils ein recht aufwendiges Kalorimeter für eine Probe während ihrer gesamten Erhärtungszeit, also meist eine Woche, belegt ist. Beim isothermen Prüfverfahren erhärtet die Probe getrennt, und die Prüfung dauert allenfalls einige Stunden, so daß mit einem Prüfgerät nacheinander zahlreiche Proben geprüft werden können. Obwohl der Arbeitskreis „Hydratationswärme“ des Vereins Deutscher Zementwerke auch die Bedingungen für Aufbau und Arbeitsweise eines adiabatischen Kalorimeters erarbeitete und veröffentlichte [8], wurde vor allem wegen des für das adiabatische Kalorimeter unangemessen hohen Prüfaufwands in die neue deutsche Zementnorm DIN 1164, Blatt 8, nur die Bestimmung mit dem Lösungskalorimeter als alleiniges Prüfverfahren aufgenommen.

Die mit einem Wasserzementwert von 0,40 unmittelbar nach dem Anmachen versiegelte Zementleimprobe lagert bei 20 °C bis zur Prüfung. Die Hydratationswärme in cal/g errechnet sich aus der Lösungswärme des unhydratisierten Zements und des über eine

bestimmte Zeit erhärteten Zementsteins in einem Gemisch aus Salpeter- und Flußsäure. Einen Überblick über die so bestimmte Hydratationswärme der deutschen Zemente nach 1, 3, 7 und 28 Tagen gibt Tafel 5.

Tafel 5 Hydratationswärme von deutschen Zementen, bestimmt als Lösungswärme nach DIN 1164, Blatt 8, Ausgabe Juni 1970

Zement- festigkeits- klasse	Hydratationswärme in cal/g nach Tagen			
	1	3	7	28
Z 250, Z 350 L	15 ... 40	30 ... 60	35 ... 70	50 ... 90
Z 350 F, Z 450	30 ... 50	50 ... 80	65 ... 90	70 ... 100
Z 550	50 ... 65	70 ... 85	80 ... 90	90 ... 100

Welcher Prüftermin für eine Normung der Anforderungen an Zement NW mit niedriger Hydratationswärme zweckmäßig ist, läßt sich nicht ohne weiteres beantworten; je dicker nämlich Betonbauteile sind, desto länger liegen im Innern quasi adiabatische Verhältnisse vor und desto später erreicht die Temperatur im Betoninnern ihr Maximum. Für Betonbauteile mit mittleren Abmessungen bis etwa 2 m dürfte die mit dem Lösungskalorimeter nach 3 Tagen ermittelte Hydratationswärme kennzeichnend sein, für dickere Bauteile hingegen die nach 7 Tagen ermittelte. In Anlehnung an die US-Norm ASTM C 150 und die Britische Norm B. S. 1370 wurde schließlich die Hydratationswärme nach 7 Tagen als maßgebend festgelegt. Nach der neuen deutschen Zementnorm DIN 1164, Fassung Juni 1970, darf Zement NW mit niedriger Hydratationswärme in den ersten 7 Tagen eine Wärmemenge von höchstens 65 cal je g Zement entwickeln. Diese Forderung ist nicht sehr streng. Wie aus Tafel 5 ersichtlich, liegt die Hydratationswärme zum Teil erheblich niedriger, insbesondere wenn es sich um Z 250 handelt. Dabei ist jedoch zu beachten, daß für eine bestimmte Betonfestigkeit bei Verwendung von Zement einer niedrigen Festigkeitsklasse mehr Zement erforderlich ist als bei Zement einer höheren Festigkeitsklasse, so daß nicht nur die Hydratationswärme allein, sondern die auf die Festigkeit bezogene Hydratationswärme beurteilt werden sollte.

## 11. Schlußbetrachtung

Der Wunsch, die besondere Qualität des hydraulischen Bindemittels Zement für jeden Verbraucher nachweislich zu gewährleisten, war vor rund 100 Jahren der Anlaß, in Deutschland die erste Zementnorm der Welt aufzustellen. Ihrem Charakter nach war sie eine Güte- und Liefernorm, in der sowohl die Prüfverfahren als auch die darauf beruhenden Anforderungen festgelegt waren. Im Mittelpunkt standen die auch noch heute gültigen drei Hauptanforderungen, nämlich daß Zement eine ausreichend lange Verarbeitungszeit aufweist, daß er fest wird und daß er — auch unter Wasser — fest und raumbeständig bleibt.

Im Verlauf der technischen Entwicklung und der dadurch veranlaßten Überarbeitungen der Zementnorm hat sich ihr Auf-

gabenbereich erweitert. Sie dient heute als Stoffnorm auch der Zementherstellung, ferner berücksichtigt sie in starkem Maße die bauaufsichtlichen Belange hinsichtlich der Sicherheit.

Seit der ersten Normung waren für die Festigkeit nur Mindestanforderungen festgelegt, die beliebig hoch überschritten werden konnten, so daß Zemente gleicher Bezeichnung, jedoch verschiedener Provenienz recht unterschiedliche Festigkeiten aufweisen konnten. Solche an die Zementmarke gebundenen Eigenschaften erschwerten die Industrialisierung der Betonbauweise. Die neue deutsche Zementnorm DIN 1164, Fassung Juni 1970, trägt der technischen Entwicklung als erste Zementnorm dadurch Rechnung, daß für die verschiedenen Klassen nicht wie bisher lediglich Mindestanforderungen gestellt werden, sondern daß alle Zemente der gleichen Bezeichnung den gleichen Zielwert für die Festigkeit anstreben müssen. Dies wird dadurch erreicht, daß zusätzlich für jede Klasse obere Festigkeitsgrenzen eingeführt worden sind.

Neben einem auf den überwiegenden Teil des Baugeschehens abgestimmten Massenbaustoff erfordert die technische Entwicklung in einzelnen Fällen zusätzlich Sondereigenschaften. Die neue deutsche Zementnorm ist so aufgebaut, daß solche Sondereigenschaften neben der normgerechten Beschaffenheit möglich sind. Für die beiden wichtigsten Sondereigenschaften — hoher Sulfatwiderstand und niedrige Hydratationswärme — enthält die Norm Festlegungen; andere Sondereigenschaften, wie z. B. weißer Zement oder hydrophober Zement, erfordern im Rahmen der Normeigenschaften zusätzlich entsprechende Liefervereinbarungen zwischen Hersteller und Verbraucher.

## SCHRIFTTUM

- [1] British Standard 12: 1958 (Amendments 1960 and 1962) Portland Cement (Ordinary and Rapid-Hardening). British Standards Institution, London.
- [2] ASTM C 403-70: Time of setting of concrete mixtures by penetration resistance. 1970 Annual Book of ASTM Standards, Part 10. American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- [3] Haegermann, G.: Prüfung der technischen Eigenschaften der Zemente. Handbuch der Werkstoffprüfung, Bd. 3, 2. Aufl. Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg 1957, S. 356/396.
- [4] Cement standards of the world. Herausgegeben vom Cembureau, Paris Beton-Verlag, Düsseldorf 1968.
- [5] Walz, K.: Herstellung von Beton nach DIN 1045. Beton-Verlag, Düsseldorf 1971.
- [6] Sadran, G., und R. Dellyes: Représentation linéaire de la résistance mécanique des ciments en fonction du temps. Revue des Matériaux de Construction (1966) Nr. 606, S. 93/106.
- [7] Mahlfreinheit von Zement, Richtlinien für die Bestimmung. Herausgegeben vom Verein Deutscher Zementwerke, Düsseldorf. Schriftenreihe der Zementindustrie, Heft 33, Beton-Verlag, Düsseldorf 1967.
- [8] Vorläufiges Merkblatt für die Messung der Temperaturerhöhung des Betons mit dem adiabatischen Kalorimeter, Fassung Dezember 1970. Herausgegeben vom Verein Deutscher Zementwerke, Düsseldorf. beton 20 (1970), H. 12, S. 545/549; ebenso Betontechnische Berichte 1970, Beton-Verlag, Düsseldorf 1971, S. 179/192.