

1 Geschichtliche Entwicklung der Zemente

Zement ist ein hydraulisch erhärtender Baustoff. Er besteht aus einem Gemisch fein aufgemahlener, nichtmetallisch-anorganischer Bestandteile. Zement kann durch gemeinsames Vermahlen des bis zur Sinterung gebrannten Zementklinkers mit anderen Haupt- und Nebenbestandteilen oder durch Mischen getrennt feingemahlener Haupt- und Nebenbestandteile hergestellt werden. Nach Zugabe von Wasser entsteht eine Suspension (Zementleim), die aufgrund einsetzender Hydratationsreaktionen sowohl an der Luft als auch unter Wasser erstarrt und erhärtet sowie dauerhaft fest bleibt. Zement wird hauptsächlich als Bindemittel für Beton und Mörtel verwendet. Im frischen Zustand ermöglicht der Zementleim die beliebige Formbarkeit des mit einer bestimmten Kornverteilung ausgelegten Gemisches mit Sand und gröberer Gesteinskörnung. Im festen Zustand verbindet der Zementstein dieses Korngerüst in Form eines erhärteten „Klebers“. Die hydraulische Erhärtung von Zementen nach DIN EN 197-1 bzw. DIN 1164 beruht, anders als bei nicht hydraulischen Bindemitteln, wie z. B. Baugipsen nach DIN 1168, überwiegend auf der Entstehung von Calciumsilicathydraten. Die verschiedenen Bestandteile des Zements hydratisieren dabei unterschiedlich schnell. Kennzeichnendes Merkmal für Zemente ist eine durch Norm festgelegte Mindestdruckfestigkeit von derzeit $32,5 \text{ N/mm}^2$. Außer den Calciumsilicaten des Zementklinkers und der beteiligten Phasen von latent hydraulischen sowie puzzolanischen Bestandteilen, die für die Festigkeitsbildung verantwortlich sind, beeinflussen u. a. auch Calciumaluminat die Hydratationsreaktionen im frühen Stadium und damit das Erstar-

ren. Das Erstarren und Erhärten von Calciumaluminatzement (Tonerdezement) beruht im Gegensatz dazu auf der Bildung von Calciumaluminathydraten.

Portlandzement

Der Name des Baustoffs „Zement“ geht auf die Römer zurück, die seit dem 3. Jahrhundert v. Chr. Bauwerke aus einem Gemisch von Bruchstein, Puzzolan- und Ziegelmehl sowie Sand unterschiedlicher Korngröße und gebranntem Kalk als Bindemittel mit „*Opus Caementitium*“ bezeichneten. Die Bauweise wurde für Mauern, Kuppeln, Brücken, Hafenanlagen, Wasser- und Abwasseranlagen sowie beim Bau von Straßen angewendet. Überliefert sind die Kenntnisse über die Bauplanung und Architektur sowie über den Baustoff und die Bauausführung von dem römischen Baumeister Vitruv, der wahrscheinlich im letzten Jahrhundert v. Chr. gelebt und gearbeitet hat. Später wurden die feinen „Zusatzstoffe“ wie natürliche Puzzolane oder Ziegelmehl als „Caementum“ bezeichnet, das mit gebranntem und gelöschtem Kalk vermischt und mit Wasser versetzt bei ausreichend langer Feuchtlagerung hydraulisch erhärtete und im „Römerbeton“ zu Druckfestigkeiten von etwa 5 bis 40 N/mm² führte. Diese Zuordnung des Begriffs „Caementum“ und seiner Abwandlungen „Cementum“, „Cimentum“ oder „Cement“ blieb bis zum Beginn des 19. Jahrhunderts n. Chr. erhalten.

Ein Wandel der Zuordnung trat im 18. Jahrhundert ein. Der Engländer John Smeaton (1724–1792) entdeckte, dass Kalkbindemittel, die aus einem mit Tonmineralien verunreinigten Kalkstein gebrannt werden, von sich aus und ohne Zugabe von puzzolanschen Zusatzstoffen teilweise hydraulisch erhärteten. Er nutzte dieses Erkenntnis beim Bau des Eddystone-Leuchtturms bei Plymouth, für den er einen wasserbeständigen Mörtel benötigte. 1796 ließ sich sein Landsmann James Parker ein hydraulisch er-

härtendes Produkt patentieren, das er aus einem natürlichen, noch stärker tonhaltigen Kalkmergel gebrannt und als „Romancement“ auf den Markt gebracht hatte. Damit wurde erstmals ein selbst erhärtendes Bindemittel und nicht ein puzzolanischer Zusatzstoff als „Zement“ bezeichnet. Die beiden Kalkbindemittel von J. Smeaton und J. Parker sind mit Wasserkalk bzw. hydraulischem Kalk vergleichbar, da sie nicht bis zur Sinterung erhitzt wurden.

Der Engländer Edgar Dobbs war der erste Baustoffhersteller, der bereits 1810 ein Patent für einen hydraulischen Kalk erhielt, der aus einem künstlichen Gemisch von Kalkstein und tonmineralhaltigen Ausgangsstoffen bestand. Der Franzose Louis J. Vicat (1786–1861) und der Deutsche J. F. John fanden unabhängig voneinander heraus, dass sich Gemische aus Kalkstein und 25 bis 30 M.-% Ton am besten dafür eigneten, hydraulische Kalke mit verhältnismäßig hohen Festigkeiten herzustellen. Aufgrund der systematischen Untersuchung unterschiedlicher Mischungszusammensetzungen wird J. F. John als derjenige angesehen, der den Grundstein auch für die wissenschaftliche Untersuchung der Herstellung und Eigenschaften von Zement legte. Seine Erkenntnis bestand vor allem darin, dass Kalk, Kieselsäure, Tonerde und Eisenoxide während des Brennens bei Temperaturen unter 1000 °C Verbindungen bilden, die bei Wasserzugabe hydraulisch erhärten.

Auch das Bindemittel, das der Engländer Joseph Aspdin (1778–1855) aus einem künstlichen Gemisch von Kalkstein und Ton herstellte, sich 1824 patentieren ließ und das er aufgrund seiner verbesserten Eigenschaften als „Portland-Cement“ bezeichnete, war nach heutigem Wissen in seiner Zusammensetzung und in seinen Eigenschaften mit dem Bindemitteltyp „Romancement“ vergleichbar und noch nicht bis zur Sinterung gebrannt. Die Bezeichnung „Portland-Cement“ lehnte sich in erster Linie aus Marketinggründen an den bewährten und gut

eingeführten Portlandstein an. Dabei handelte es sich um einen natürlichen Kalkstein, der auf der Halbinsel Portland (Grafschaft Dorsetshire) an der Kanalküste als Werkstein abgebaut wurde und den aus „*Portland-Cement*“ gefertigten Kunstprodukten farblich sehr ähnlich sah.

William Aspdin (1815–1864), ein Sohn Joseph Aspdins, war offenbar der Erste, der 1843 in einem neu erbauten eigenen Werk in der Nähe Londons einen Portlandzement herstellte, der dem Portlandzement heutiger Definition wesentlich ähnlicher war. Dieser Zement erwies sich aufgrund seiner Festigkeitsentwicklung dem Romanzement deutlich überlegen. Ursache hierfür waren höhere Brenntemperaturen, die bereits zu einer teilweisen Sinterung und damit zu verstärkter Bildung der für Portlandzementklinker typischen Phasen führten. Die deutlich verbesserten Gebrauchseigenschaften dieses Produkts steigerten die Nachfrage auch auf dem europäischen Kontinent, insbesondere in den Niederlanden und in Deutschland. Die Eigenschaften und der für das Produkt erzielbare Preis stellten aber auch den Anreiz für den Aufbau weiterer *Produktionsstätten* dar [Loc1, Sta1].

Der erste Portlandzement wurde in Deutschland ab 1850 von der Firma Brunkhorst & Westfalen in Buxtehude bei Hamburg hergestellt, andere Produktionsstätten gab es bei Lüneburg (Gebr. Heyn) und bei Itzehoe/Lägerdorf (E. Fewer). In diesen drei Werken war William Aspdin als Berater tätig. Als der eigentliche Begründer der deutschen Zementproduktion auf wissenschaftlich-technischer Grundlage gilt jedoch Hermann Bleibtreu (1824–1881), der die ersten beiden, lange Zeit bestehenden Werke in Zülchow bei Stettin (1855) und in Oberkassel (1856–1858) bei Bonn errichtete. In den folgenden Jahren wurden weitere Werke gegründet, so unter anderem 1864 die Werke Amöneburg (Dyckerhoff) und Rüdersdorf (Guthmann & Jeserich) sowie 1873/76 Heidelberg und Leimen (J. P. Schifferdecker). In Frank-

reich begann die Produktion von Portlandzement 1850, in den USA 1870.

In Deutschland wurde die Entwicklung der Portlandzementherstellung zu Ausgang des 19. Jahrhunderts maßgeblich von Wilhelm Michaëlis (1840–1911) vorangebracht. Nach einer technischen und chemischen Ausbildung sowie Praxiserfahrung in einem Zementwerk verschaffte er sich mit der Veröffentlichung seines Buches über die „Hydraulischen Mörtel“ Anerkennung und Einfluss. Das Buch enthielt erstmals Anforderungen an die Zusammensetzung einer Rohmischung, mit der ein Klinker gesintert und daraus ein raumbeständiger und verarbeitungsfähiger Portlandzement hoher Festigkeit hergestellt werden konnte. Hierfür definierte er einen „Hydraulischen Modul“, nach dem ein Portlandzement hoher Qualität etwa doppelt so viel Kalk aufweisen sollte wie die Summe von Kieselsäure, Tonerde und Eisenoxid. Die Erkenntnisse beruhten auf der Untersuchung der chemischen Zusammensetzung des Brennprodukts und der Prüfung der Zugfestigkeit nach einem von ihm festgelegten Verfahren. Erst Jahre später gelang es der *Zementforschung*, die physikalisch-chemischen Grundlagen der Kalkbindung, der Kalksättigung, der Phasenbildung und Konstitution sowie der beim Brennen und Kühlen von Portlandzementklinker – im Folgenden als Zementklinker bezeichnet – ablaufenden Reaktionen und deren Einfluss auf den Hydratationsablauf und die Gebrauchseigenschaften aufzuklären. Diese Forschungsarbeit ist unter anderem mit den Namen A. E. Törnebohm, S. B. und W. B. Newberry, H. Le Chatelier, E. Wetzel, E. Spohn, F. M. Lea, T. W. Parker oder H. Kühl eng verbunden.

Hüttenzemente

Die latent hydraulischen Eigenschaften der granulierten, basischen Hochofenschlacke wurden 1862 von Emil Langen (Troisdorf) entdeckt. In Anlehnung an ein bereits seit 1853 in England

eingeführtes Verfahren zur Erleichterung der Schlackenentsorgung bei der Roheisenherstellung wurde die flüssig aus dem Hochofen austretende Schlacke in einer Rinne mit einem Wasserstrahl abgeschreckt. Dabei erstarrte die Hochofenschlacke weitgehend glasig und fiel als Granulat an, das seit 1902 von Hermann Passow als „Hütten- oder Schlackensand“ bezeichnet wurde. Die latent hydraulischen Eigenschaften von *Hüttensand* können alkalisch und/oder sulfatisch angeregt werden. Als alkalische Anreger eignen sich Calciumhydroxid, das durch Hydratation von Branntkalk („Kalkschlackenzement“) oder bei der Hydratation von Zementklinker („Eisenportlandzement“, „Hochofenzement“) entsteht. Eine sulfatische Anregung (H. Kühl, 1908) tritt in hüttensandhaltigen Zementen zusätzlich zur alkalischen Anregung bei normgemäßem Zusatz von Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) und/oder natürlichem Anhydrit (CaSO_4 II) ein. Bei Sonderzementen wie „Gipsschlackenzement“ oder „Sulfathüttenzement“ überwiegt die sulfatische Anregung [Loc1, Sta1].

1880 wurde Hüttensand zum ersten Mal zur Herstellung eines Kalkschlackenzements hoher Festigkeit verwendet. Godhard Prüssing (1828–1903) führte 1882 einen Zusatz von 30 M.-% Hüttensand als Hauptbestandteil neben Portlandzementklinker bei der Herstellung eines „durch Zuschlag von verbindungs-fähiger Kieselsäure verbesserten Portland-Cements“ in dem von ihm gegründeten Zementwerk Vorwohle ein. Diese Entscheidung führte wegen des darin gesehenen Verstoßes gegen das 1885 vom Verein Deutscher Cement-Fabrikanten beschlossenen „Reinheitsgebot“ zu langjährigen wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Auseinandersetzungen und damit zur Trennung der Hüttensand verarbeitenden Werke von den Portlandzementherstellern innerhalb des Vereins.

Hochofenschlacke als Rohstoffkomponente zur Herstellung von Zementklinker wurde 1882 von Th. Narjes und A. Bender in der

Portland-Cementfabrik Kupferdreh/Ruhr eingesetzt. Nach diesem Verfahren stellten seit 1882 auch die Portlandzementwerke Stein u. Co. in Wetzlar den Klinker her, den sie auch bei gemeinsamer Vermahlung mit 30 M.-% Hüttensand zur Herstellung von Hüttenzementen verwendeten. Dieser Zement erhielt 1901 die Bezeichnung „Eisenportlandzement“ (heute: Portlandhüttenzement). Zemente mit höherem Hüttensandgehalt waren seit 1907 als „Hochofenzement“ bekannt.

Nachdem daher schon sehr frühzeitig der *Eisenportland-* und der *Hochofenzement* (1909 bzw. 1917) genormt wurden, rundeten erst in den 40er sowie 70er und 80er Jahren der Ölschieferzement (heute: Portlandschieferzement), der Portlandflugasche- sowie der Portlandkalksteinzement die Palette der Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen ab. Vor ihrer Normung waren diese Zemente zunächst mehrere Jahre bauaufsichtlich zugelassen. Der Trasszement wurde in den 40er Jahren genormt. Die Herstellung und Verwendung dieser Zemente anstelle von Portlandzement hat in Deutschland in den letzten Jahren beträchtlich zugenommen.

Normung von Zement

An der ersten Entwicklung von Verfahren zur Prüfung von Zementeigenschaften und an der Definition von Anforderungen an die Qualität war in Deutschland Wilhelm Michaëlis maßgebend beteiligt. Bereits 1875 veröffentlichte er 17 Kriterien, nach denen die Qualität von Zementen beurteilt werden sollte. Dazu gehörten u. a. eine Mindestzugfestigkeit von 5 kg/cm^2 , geprüft an einem Mörtel aus 1 Massenteil Zement und 3 Massenteilen Sand, sowie ein Siebrückstand von maximal 25 M.-% auf dem 0,2 mm-Maschensieb. Die Notwendigkeit zur Einführung einheitlicher Prüfverfahren und der Festlegung von Mindestanforderungen an die Produktqualität sowie von Anforderungen

an die Zusammensetzung und Lieferung ergaben sich aus der Tatsache, dass in Deutschland zu der Zeit bereits 29 Zementwerke jährlich etwa 1 Mio. Fass Portlandzement (ca. 170 000 bis 180 000 t/a) herstellten. 1876 trat erstmals ein Ausschuss aus Vertretern der Zementwerke und des „Deutschen Vereins für Fabrication von Ziegeln, Thonwaren, Kalk und Cement“ zusammen mit dem Ziel, „Normen zur einheitlichen Lieferung und Prüfung von Portland-Cement“ auszuarbeiten. Beratung und Verabschiedung der Norm waren gleichzeitig der Anlass für die Gründung des „Vereins Deutscher Cement-Fabrikanten“ am 24. Januar 1877. Die von W. Michaëlis veröffentlichten Kriterien bildeten die Grundlage dieser Norm, die nach Überarbeitung unter Mitwirkung des Berliner Architekten-Vereins und des Vereins Berliner Bau-Interessenten 1878 durch das Land Preußen mit Ministerialerlass eingeführt wurde. Die Mindestanforderungen wurden in der verabschiedeten Norm unter anderem auf einen Siebrückstand von maximal 20 M.-% und der Mindestwert für die Zugfestigkeit des Prüfmörtels nach 28 Tagen auf 10 kg/cm² erhöht. Als Schiedsstelle bei Streitigkeiten zwischen öffentlichen Bauherren und Zementherstellern wurde 1880 die „Königliche Prüfstation für Baumaterialien, Berlin“ durch Erlass eingesetzt.

Die steigende Qualität des Zementklinkers und die Festlegung von moderaten Anforderungen an die Mindestfestigkeit führten in den folgenden Jahren dazu, zur Herstellung von Zementen auch andere Hauptbestandteile außer Klinker einzusetzen. Wegen Schwierigkeiten bei der Beurteilung der physikalischen und chemischen Wirkung von inerten, puzzolanischen oder latent hydraulischen Zuschlagstoffen aufgrund unzureichender Kenntnisse und Prüftechniken kam es 1882 nach erheblichen Auseinandersetzungen im Verein Deutscher Cement-Fabrikanten zur Festlegung eines „Reinheitsgebots“ für Portlandzement. Danach durfte als Portlandzement nur ein Produkt bezeichnet werden,

das aus natürlichen Rohstoffen bis zur Sinterung gebrannt und mehlfein gemahlen wurde sowie nicht mehr als 2 M.-% an anderen Hauptbestandteilen, wie z. B. Hüttensand, gebranntem Tonschiefer oder hydraulischem Kalk, enthielt. Das „Reinheitsgebot“ wurde mit großer Mehrheit beschlossen. 1886 stiegen die Anforderungen in der erstmals überarbeiteten Zementnorm auf eine Mindestzugfestigkeit von 16 kg/cm² an. Gleichzeitig wurde eine Mindestdruckfestigkeit von 160 kg/cm² nach 28 d, geprüft an dem gleichen Prüfmörtel, eingeführt. Zu weiteren Ergänzungen der Portlandzement-Norm kam es 1908. Im Jahr 1909 wurden der Eisenportland- und 1917 der Hochofenzement genormt.

Der Deutsche Normenausschuss (DIN), gegründet 1917, gab erstmals 1932 eine neuerlich überarbeitete Zementnorm unter der Bezeichnung DIN 1164 heraus. In dieser Norm waren die Anforderungen an Portland-, Eisenportland- und Hochofenzement zusammengefasst, seit 1970 auch die an Trasszement und seit 1994 die an Ölschieferzement. Unterschiedliche Festigkeitsklassen wurden 1927 („Hochwert“) und 1942 („Höchstwert“) in die Norm eingeführt. Darüber hinaus gab es ab 1970 erstmals Festlegungen für Anforderungen an Zemente mit hohem Sulfatwiderstand und niedriger Hydratationswärme. Seit 1990 sind auch Zemente mit niedrigem wirksamen Alkali-gehalt national genormt. Die verschiedenen Normenänderungen betrafen auch die Prüfverfahren. Wesentlich ist hierbei, dass für die Festigkeitsprüfung an Mörtelprismen seit 1942 plastische Mörtel mit einem w/z-Wert von 0,60 und seit 1970 – einer ISO-Empfehlung folgend – Mörtel mit stetiger Kornverteilung des Normsands und mit einem w/z-Wert von 0,50 vorgeschrieben werden. Seit 1978 ist zur Verbesserung der physikalischen Eigenschaften von Zementen die Zumahlung von anorganisch-mineralischen aus dem Werksbetrieb stammenden Stoffen bis zu einem Anteil von 5 M.-% zugelassen.

Der Einführung der Zementnorm in Deutschland im Jahr 1878 folgte Frankreich im Jahr 1885 mit einer eigenen nationalen Norm. In England und den USA gibt es seit 1909 eine Zementnorm. Die europäisch harmonisierte Zementnorm EN 197-1 ersetzt ab 2002 die nationalen Normen u. a. in den EU-Mitgliedstaaten [Spr1, Ver1].

Zemente mit besonderen Eigenschaften

Außer den Zementen mit normalen Eigenschaften wurden eine Reihe von *Zementen mit besonderen Eigenschaften* entwickelt. Der erste Portlandzement mit „hohem Sulfatwiderstand“ wurde 1901 patentiert. Er ist mit der Bezeichnung „Erzzement“ durch einen Tonerdemodul von etwa 0,3 gekennzeichnet. Der 1919 in Italien produzierte „Ferrari-Zement“ mit einem Tonerdemodul von 0,64 weist ähnliche Eigenschaften auf. Zu Zementen mit „hohem Sulfatwiderstand“ zählen seit etwa 1920 auch die Hochofenzemente mit hohem Hüttensandgehalt. Portlandölschieferzemente mit hohem Sulfatwiderstand werden seit 1992 bzw. 1995 mit Zulassung des DIBt hergestellt.

Weißzement ist seit etwa Mitte der 80er-Jahre des vorigen Jahrhunderts bekannt. Er wurde zunächst in kleinen Mengen im Portlandzementwerk Heidelberg, später auch in anderen Werken hergestellt. Das Dyckerhoff-Werk in Amöneburg produziert seit 1931 diesen Zement in größerem Umfang. Die Eigenschaften entsprechen bis auf die Farbe denen eines normalen Portlandzements. Weißzemente sind daher nicht gesondert genormt.

Die Entwicklung und Anwendung von Tiefbohrzementen begann um 1920, die von Quellzementen nur wenig später. Quellzemente werden heute vor allem in Russland (V. V. Mikhailov, 1955), USA (A. Klein, 1958/61) und Japan (1970) hergestellt.

Von technischer Bedeutung ist auch die Entwicklung des Tonerdezements, die auf ein französisches Patent (J. Bied, 1908) zurückgeht. Der Tonerdezement wird durch langsame Kühlung von Schmelzen mit Monocalciumaluminat-Zusammensetzung oder durch Sintern von gleichartig zusammengesetzten Rohmischungen aus Kalkstein und Bauxit hergestellt. Für die Herstellung von feuerfesten Produkten sind Al_2O_3 -reichere Zemente gebräuchlich. Tonerdezement wird auch als Weißzement produziert. In Deutschland wurde bei der Herstellung eines speziellen Gießereiroheisens im Hochofen eine tonerereiche Schlacke gewonnen, die nach der Feinmahlung als „Tonerdeschmelzement“ auf denselben Gebieten Verwendung fand wie der Tonerdezement. Die seit 1925 im Hochofenwerk Lübeck betriebene Produktion wurde 1982 eingestellt. Der Tonerdezement darf in Deutschland aufgrund eines 1962 nach Bauschäden ausgesprochenen Verbots nur noch für feuerfeste Mörtel und Betone sowie schnell erhärtende Zubereitungen verwendet werden. Eine europäisch harmonisierte Norm für Tonerdezement wird derzeit ausgearbeitet.

Technologische Entwicklung

Die maschinellen Einrichtungen entwickelten sich ab Mitte des 19. Jahrhunderts zunächst rein empirisch aus den Einrichtungen und Verfahren, die bis dahin z. B. aus der Getreidemahlung oder aus der Herstellung von Weißfeinkalk und hydraulischen Kalken sowie der Herstellung keramischer Ziegel bekannt waren. Im Jahr 1877 unterschied sich der Maschinenpark für die *Zerkleinerung* von Rohstoffen und Zementklinker nur wenig. Weiche Rohstoffe, wie Kreide und Ton, wurden nach dem Nassverfahren aufgeschlämmt und gemischt, harte Rohstoffe in Backenbrechern und nachgeschalteten Walzwerken sowie in Horizontal-

mahlgängen zerkleinert und anschließend nass bzw. halbnass gemischt. Kennzeichnend war die nach Abtrennung des Wassers vorgenommene Verformung des Rohschlammes wie bei der keramischen Ziegelherstellung zu Brenngutziegeln bzw. Presslingen, woraus sich der Begriff „Zementklinker“ ableitet.

Ausgehend von Horizontalmahlgängen mit einer Leistung von 1 t Kalkstein/h oder 0,5 t Klinker/h setzte ab 1880 eine stürmische Entwicklung – vor allem bei den Zerkleinerungsmaschinen – ein, da Mahlfineinheit und Festigkeitsentwicklung des Zements eng miteinander verknüpft sind. Die Entwicklung wurde durch die Erfindung des Stahlbetons durch J. Monier im Jahr 1878 und die hierdurch steigende Nachfrage nach Zement hoher Festigkeit gefördert. Bei steigender Mühlenleistung und abnehmendem spezifischen Energieverbrauch führte die Entwicklung weg von den Horizontalmahlgängen hin zu unterschiedlichen Typen von Wälzmühlen, Siebkugel- und Rohrmühlen. Eine lange Einkammer-Rohrmühle von 1882 wies z. B. eine Mahlleistung von 3 t Portlandzement/h bei 15 M.-% Rückstand auf dem 200 µm-Sieb auf. Daraus entwickelten sich die Verbundmühlen und mit der entscheidenden Einführung des Streuwindsichters (1889) die Umlaufmahanlagen, die sich jedoch erst nach 1945 technisch in großem Umfang durchsetzten.

Die *Brennverfahren* zur Herstellung von Zementklinker bestanden zunächst aus den von der Branntkalkherstellung bekannten, periodisch betriebenen Schachtöfen mit einer Leistung von anfangs rd. 0,5 t Klinker/d und geschätzten Energieverbrauchsdaten von 8400 bis 11 000 kJ/kg Kl. H. Bleibtreu konnte die Leistung dieses Ofentyps auf bis zu 70 t/d bei rd. 5200 kJ/kg Kl steigern. Der erste kontinuierlich betriebene Ofen war der aus der Ziegelproduktion bekannte Hoffmannsche Ringofen, der kurzzeitig mit ähnlich hohen Leistungen betrieben wurde. Wegen erschwerter Arbeitsbedingungen, auch wegen

gravierender Qualitätsmängel infolge zu langsamer Kühlgeschwindigkeiten konnte sich dieses Brennverfahren nur wenige Jahre halten.

Die Entwicklung der Schachtofentechnologie führte über den bereits kontinuierlich arbeitenden Dietzchen Etagenofen (1880–1890), über den „automatischen“ Schachtofen von Hauenschild (1888) und von v. Grueber (1914) hin zum Hochleistungsschachtofen von E. Spohn. Diese Ofentypen arbeiteten mit gepressten Rohmehlformlingen, später mit Rohmehlpellets, die auf einem Granulierteller erzeugt wurden. Die Granulierteknik ermöglichte die Einmischung von Brennstoffstaub in die Pellets (Schwarzmehl- (1938), Schalenverfahren (1950–1960)) und dadurch bedingt eine Leistungssteigerung bis auf 300 t Klinker/d und einen thermischen Energieverbrauch von weniger als 3500 kJ/kg Kl.

Entscheidend für den heute erreichten Stand der Brenntechnik war jedoch die Entwicklung der Brennverfahren im Drehrohr-ofen, der als Konkurrenz zum Schachtofen erst ab 1895 in Erscheinung trat. Der erste, nach dem Trockenverfahren arbeitende Drehrohr-ofen soll 1895 bei der Firma Atlas Cement Co. in den USA (PA) erprobt worden sein. Den ersten Versuchsdreh-ofen baute K.O. Forell 1896 in Deutschland. Mit einer Länge von 16 m erreichte er eine Tagesproduktion von rd. 35 t Kl aus einem Brenngutgemisch von Hochofenschlacken- und Kalksteinmehl und Steinkohlenstaub als Brennstoff. Der erste größere Produktions-ofen ging 1899 im Zementwerk Hannover in Betrieb (L = 30 m, D = 2 m) mit einer Leistung von etwa 80 bis 100 t/d. Kennzeichnend für die Konstruktion war ein gegenläufiger Rohrkühler, dessen Abluft bereits als sekundäre Verbrennungsluft genutzt wurde. Die Entwicklung der Dreh-ofentechnologie verlief so stürmisch, dass ab etwa 1905 viele Neuanlagen nur noch mit Drehrohr-ofen ausgestattet wurden, die

nach dem Nassverfahren und nach dem Trockenverfahren ohne Vorwärmer arbeiteten.

Zur Verringerung des thermischen Energieverbrauchs wurden die nach dem Nassverfahren arbeitenden Drehöfen verlängert oder zur besseren Nutzung der Abgaswärme mit Calcinatoren, Konzentratoren oder Schlamm Trocknern ausgestattet. Die Energiebilanz von Trockenöfen verbesserte sich bei der Abwärmennutzung zur Rohmaterialtrocknung oder durch Einbau von Abhitze Kesseln zur Dampf- und Stromerzeugung. Hierdurch ließ sich bereits der Energieverbrauch auf 3600 bis 6700 kJ/kg Kl gegenüber 5000 bis 7500 kJ/kg Kl bei Nassöfen senken.

Der nächste große Schritt in der Entwicklung des Ofenbaus bestand in der Erfindung des Rostvorwärmers durch O. Lellep (Polysius). Der mit Rohmehlpellets beschickte Vorwärmer war anfangs für einfache, ab 1952 für doppelte Gasführung konstruiert. Das Halbnassverfahren erreichte in der Endstufe der Entwicklung zwischen 1980 und 1990 eine Leistung von rd. 3200 t Kl/d bei 3400 kJ/kg Kl.

Als zweite, noch erfolgreichere Weiterentwicklung des Trockenverfahrens hat sich das von M. Vogel-Jörgensen erfundene und 1951 von F. Müller (KHD) zur industriellen Reife entwickelte Zyklonvorwärmerverfahren erwiesen. Der heute aus vier bis sechs Stufen bestehende Zyklonvorwärmer erwärmt das frische Brenngut im Gegenstrom zum Ofenabgas. Der bei Mahltrocknungs- oder im Direktbetrieb erzielbare thermische Energiebedarf sank bei Ofenleistungen ohne Vorcalcination bis 4000 t Kl/d und in mit Vorcalcinator ausgestatteten Anlagen bis 10 000 t Kl/d auf Werte von unter 3000 kJ/kg Kl. Die heutige Klinkerproduktion ist in Deutschland nahezu ausschließlich auf Ofenanlagen mit Zyklonvorwärmer, teilweise auch mit Calcinator, umgestellt [Sil1].

Organisation der Zementindustrie

Am 24. Januar 1877 schlossen sich 23 Zementwerke im Anschluss an eine Sitzung des „Deutschen Vereins für Fabrikation von Ziegeln, Thonwaren, Kalk und Cement“ zum „Verein Deutscher Cement-Fabrikanten“ zusammen. Ihr Hauptinteresse galt zunächst der Schaffung einer Zementnorm mit der Festlegung von Mindestanforderungen an die Produkteigenschaften einschließlich der Zementzusammensetzung sowie von einheitlichen Lieferbedingungen. Der Zusammenschluss wurde 1889 nach internen Auseinandersetzungen über die Frage der Verwendung anderer Hauptbestandteile außer Klinker im Zement in „Verein Deutscher Portland-Cement-Fabrikanten“ umbenannt. Die zehn ausgeschlossenen Hersteller von Eisenportlandzement gründeten 1902 und die Hochofenzementhersteller 1913 eigene technisch-wissenschaftliche Vereinigungen. Alle drei Zementvereine unterhielten getrennt arbeitende Laboratorien. Das Laboratorium der Portlandzementwerke nahm 1902 in Berlin-Karlshorst seinen Betrieb auf. Erster Leiter war W. Leobell. Hauptaufgaben waren zunächst die Güteüberwachung, die Weiterentwicklung der Zementnorm und der Prüfverfahren. Später kam die Untersuchung der Klinkereigenschaften in Abhängigkeit vom Brenn- und Kühlverfahren hinzu und deren Auswirkung auf die Zementeigenschaften. 1911 wurde die „Centralstelle zur Förderung der Deutschen Portlandzement-Industrie“, eine stärker wirtschaftspolitisch orientierte Einrichtung und damit Vorläufer des BDZ, gegründet und aus dem Verein Deutscher Portland-Cement-Fabrikanten abgetrennt. Die beiden Vereine der Hüttenzementindustrie ließen zunächst die Zemente ihrer Mitgliedswerke in der chemisch-technischen Versuchsstation von Hermann Passow, Hamburg, überwachen, der sich auch mit Hüttenandforschung beschäftigte. Der Verein Deutscher Eisenportlandzementhersteller gründete dann jedoch

im Jahr 1912 sein eigenes Laboratorium, dessen erster Leiter A. Guttman war. Das Laboratorium des Vereins Deutscher Hochofenzementwerke, dessen Leitung R. Grün nach dem Tod von H. Passow übernahm, wurde 1922 nach Düsseldorf verlagert und zunächst in einem Gebäude in der Tannenstraße mit dem Laboratorium des Vereins Deutscher Eisenportlandzementhersteller zu einem „Forschungsinstitut der Hüttenzementindustrie Düsseldorf“ zusammengeführt. 1926 wurde das Laboratorium des Vereins Deutscher Eisenportlandzementhersteller in ein Gebäude in der Düsseldorfer Eckstraße verlegt. Die Laboratorien behielten eine getrennte Leitung, R. Grün war für die Hochofenzemente, A. Guttman, später F. Keil für die Eisenportlandzemente zuständig. Erst im Jahr 1941 näherten sich die drei Vereine wieder einander an und schlossen sich zu einer Arbeitsgemeinschaft zusammen, aus der 1948 der Verein Deutscher Portland- und Hüttenzementwerke hervorging. 1952 wurde diese technisch-wissenschaftliche Vereinigung in „Verein Deutscher Zementwerke“ umbenannt, die das Forschungsinstitut der Zementindustrie in Düsseldorf betreibt [Loc1, Hae1]. Zur Entwicklung der Anwendung von Zement in Mörtel und Beton s. Abschnitte II.1.2 und II.2.1.