

Symposium

Sichtbeton – Planen, Herstellen, Beurteilen

2. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Universität Karlsruhe, 17. März 2005



Symposium

Sichtbeton –
Planen, Herstellen, Beurteilen

Herausgeber:
Prof. Dr.-Ing. Harald S. Müller
Dipl.-Wirt.-Ing. Ulrich Nolting
Dipl.-Ing. Michael Haist

Symposium

Sichtbeton – Planen, Herstellen, Beurteilen

2. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Universität Karlsruhe (TH), 17. März 2005

mit Beiträgen von:

Dipl.-Ing. Arch., M.Sc. Christiane Flasche
Prof. Bernd Sammann
Dipl.-Ing. Martin Peck
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Peter Schießl
Dipl.-Ing. Doris Strehlein
Prof. Dr.-Ing. Ludger Lohaus
Dipl.-Ing. Karen Fischer
Prof. Dr.-Ing. Bernd Hillemeier
Dr.-Ing. Roland Herr
Dr. rer. nat. Karsten Schubert
cand.-Ing. Matthias Kannenberg
Prof. Dr.-Ing. Harald S. Müller
Dipl.-Ing. Michael Haist
Dr.-Ing. Martin Günter
Dipl.-Ing. Rolf-Dieter Schulz
Prof. Dr. jur. Gerd Motzke

Veranstalter:

Universität Karlsruhe (TH)
Institut für Massivbau und Baustofftechnologie
D-76128 Karlsruhe

Süd Zement Marketing GmbH
Gerhard-Koch-Straße 2+4
D-73760 Ostfildern



© Universitätsverlag Karlsruhe, Karlsruhe 2005

ISBN 3-937300-43-0

Hinweis der Herausgeber:

Für den Inhalt namentlich gekennzeichnete Beiträge ist die jeweilige Autorin bzw. der jeweilige Autor verantwortlich.

Vorwort

Sichtbeton ist ein wichtiges Gestaltungselement der modernen Architektur. Er vermag Funktionalität und optische Eigenschaften zu einer sinnvollen und ansprechenden Einheit zu verbinden. Bauwerke wie das Deutsche Historische Museum in Berlin, die Pinakothek der Moderne in München, das Phae-no Science Center in Wolfsburg oder das Holocaust Mahnmal in Berlin geben ein beeindruckendes Zeugnis für die gestalterischen Möglichkeiten mit Sichtbeton.

Sichtbeton ist jedoch kein einfach beherrschbarer Baustoff. So zeigt die Praxis, dass manche Ausführung nicht befriedigt. Dabei sind es nicht nur subjektive Kriterien des Erscheinungsbildes, sondern oft genug auch objektiv erfassbare Mängel, die Nachbesserungen notwendig machen. Neue wissenschaftliche Erkenntnisse und aktuelle Leitfäden (Merkblätter) vermögen heute jedoch vielen Problemen vorzubeugen.

Im Symposium „Sichtbeton – Planen, Herstellen, Beurteilen“ werden alle wesentlichen Gesichtspunkte für einen architektonisch gelungenen und technologisch erfolgreichen Einsatz von Sichtbeton beleuchtet.

Erfahrene Architekten und Ingenieure zeigen die vielfältigen Möglichkeiten des Einsatzes von Sichtbeton auf. Wissenschaftler präsentieren Forschungsergebnisse und neue Technologien und vermitteln dabei das technologische Know-how zur Sicherstellung der erfolgreichen Ausführung von Sichtbeton. Experten geben wertvolle Hinweise zur Beurteilung und Instandsetzung sowie zu Merkblättern und Verträgen.

Die schriftlichen Beiträge zu den einzelnen Vorträgen des Symposiums sind in diesem Tagungsband zusammengefasst.

Die Veranstalter

Inhalt

Vorwort	V
---------	---

Planen und Bauen

Christiane Flasche	Erweiterung des Deutschen Historischen Museums, Berlin	1
Bernd Sammann	Qualität von Alltagsarchitektur – Das Haus aus Sichtbeton	7
Martin Peck	Sichtbeton – Hinweise zur Planung und Ausführung	17

Forschungsergebnisse und neue Technologien

Peter Schießl Doris Strehlein	Untersuchungen zu Farberscheinungen an Sichtbetonflächen	25
Ludger Lohaus Karen Fischer	Sichtbeton – Betonzusammensetzung, Einbau Qualitätssicherung	33
Bernd Hillemeier Roland Herr Karsten Schubert Matthias Kannenberg	Sichtbeton – Schalhaut und Trennmittel	45
Harald S. Müller Michael Haist	Sichtbetone aus Leichtbeton	57

Beurteilen, Instandsetzen, Merkblätter und Verträge

Martin Günter	Sichtbeton – Möglichkeiten der Mängelbeseitigung und Instandsetzung	71
Rolf-Dieter Schulz	Technische Kriterien für die Beurteilung und Abnahme von Sichtbeton	81
Gerd Motzke	Sichtbetonflächen aus vertragsrechtlicher Sicht	91
	Programm der Tagung	107
	Referenten- / Autorenverzeichnis	109

Erweiterung des Deutschen Historischen Museums, Berlin

Christiane Flasche

Zusammenfassung

Im Mai 2003 wurde unmittelbar hinter dem barocken Zeughaus - dem Sitz der Dauerausstellung des Deutschen Historischen Museums - der Erweiterungsbau von I.M. Pei eröffnet, der über vier Geschosse flexibel nutzbare Flächen für Wechselausstellungen bietet. Im unmittelbaren Zentrum des ‚Steinernen Berlins‘, der historischen Mitte gelegen, passt sich der Neubau – trotz aller Eigenständigkeit - nicht zuletzt durch seine Materialwahl seinen historisch bedeutsamen Nachbarn an. Besonders fällt das Zusammenspiel der Natursteinverkleidung aus hellen Kalkstein mit dem eingefärbten Sichtbeton ins Auge, wobei dieser Sichtbeton sich – bezeichnet als ‚Architekturbeton‘ – von den bei uns geläufigen Beispielen abhebt.

1 Definitionsklärung

Sichtbeton – Architekturbeton

Keiner der beiden Begriffe ist wirklich eindeutig definiert, jedoch versteht man in Deutschland unter der Bezeichnung ‚Sichtbeton‘ im Allgemeinen einen großflächig geschalteten Weißbeton, an den gemäß DIN 18217 ‚Betonflächen und Schalungshaut‘ besondere Anforderungen gestellt werden: Gewünscht ist in der Regel ein möglichst gleichmäßiger, scharfkantiger und strukturloser Beton, der mit der Verwendung von großen Schaltafeln ein sorgfältig abgestimmtes Fugenbild aufweist. Bekannte Beispiele hierzu gibt es vor allem von Tadao Ando, der diesen Beton quasi zur Perfektion entwickelt hat, aber auch bei den neuen Regierungsbauten von Axel Schultes und Stefan Braunfels. Typisches Merkmal ist auch die akkurate Anordnung der Abstandshalter der Schalung.

Unter dem im amerikanischen Sprachgebrauch üblichen Begriff des ‚architectural concrete‘ - der von uns der Einfachheit halber mit ‚Architekturbeton‘ übersetzt wurde – ist dagegen ein strukturierter, häufig eingefärbter Beton zu verstehen, der durch die fein ablesbare Holzmaserung zwar sehr lebhaft, zugleich aber auch sehr präzise wirkt. Auch hierbei ist eine mängelfreie Oberfläche ohne Verfärbungen, größere Luftblasen etc., maßgeblich.

Die Herstellung von brettgeschaltem Beton war zunächst üblich und häufig angewendet, so beispielsweise bereits von Le Corbusier beim Bau des Klosters La Tourette. In den 60er/70er Jahren folgte dann eine Phase, wo unter der Bezeichnung ‚Beton brut‘ besonders öffentliche Bauten (Kindergärten, Jugendheime, Schulen) mit diesem architektonischen Gestaltungsmittel ausgeführt wurden, bei dem die Betonflächen bereits die endgültige Oberfläche darstellte, also keine Weiterbehandlung oder Verkleidung erfolgte. Gerade die holzeigene Ästhetik

des Schalholzes wurde herausgearbeitet; Astlöcher, deutliche Brettstöße etc. sollten eine Holzoptik dauerhaft nachahmen.

Ganz anders dagegen die Umsetzung des Betons beim Deutschen Historischen Museum – trotzdem auch hier eine Brettschalung formgebend war. Doch die Ausgestaltung der Betonelemente steht in direktem Zusammenhang mit Pei's Entwürfen der letzten Jahrzehnte, bei denen die Oberflächenbehandlung des Betons immer schon von herausragender gestalterischer Bedeutung war. Ich möchte, kurz, auf einige Beispiele eingehen, beginnend bereits in den frühen 60er Jahren mit dem

EVERSON MUSEUM, SYRACUSE, NEW YORK

1961 – 1964

Dieser Museumsneubau wurde als Mittelpunkt eines zukünftigen Community Centers geplant, dass zum Entwurfszeitpunkt allerdings nur als Absichtserklärung existierte – das umgebende Gelände war noch völlig unbebaut. Daher gab es für den Entwurf keinen Bezug zur Umgebung, stattdessen wurde der Neubau als völlig eigenständige Skulptur konzipiert. Es gibt ein zentrales Foyer, in dem eine gewendelte Treppe im Mittelpunkt steht – ein Thema, das konzeptionell auch beim Deutschen Historischen Museum in Berlin auftaucht. Die Wände dieses öffentlichen Bereiches bestehen aus einem Beton, der mit Zuschlagstoffen aus örtlichem rotem Granit versehen und anschließend gestockt wurde, so dass sich eine Hohlkehlenstruktur in der Oberfläche zeigte, in der sich das von oben herabfallende Tageslicht bricht.

DES MOINES ART CENTER, IOWA

1966 – 1968

Auch bei diesem relativ kleinen Museum – einer Erweiterung eines bestehenden, U-förmigen Museum von Saarinen – fällt der gestockte Sichtbeton im öffentlichen Bereich auf, der eine deutliche Dreidi-

mensionalität der Oberfläche schafft. Diese Rauheit korrespondiert mit der grob behauenen Steinfassade des Altbaus.

Pei's Erweiterung ist von der Strasse nicht zu sehen, sondern öffnet sich stattdessen zweigeschossig zum Park hin. In der Mitte wird ein großes Wasserbecken angeordnet, in das, auch hier, eine Treppenskulptur markant hineinragt.

NATIONAL GALLERY, EAST WING, WASHINGTON 1968 – 1978

Die Erweiterung der National Gallery ist sicherlich eines seiner wichtigsten Projekte: An Washingtons ‚Protokollstrecke‘ gelegen - der so genannten Mall - war ein schwieriges, dreiecksförmiges Grundstück zu bebauen. Pei gelang die beste Grundstücksausnutzung in dem er ein großes Dreieck, die eigentliche Museumsfläche, gegen ein kleines, ebenfalls dreiecksförmiges Schulungszentrum verschob. Das Raumgefüge mit den zentralen, inszenierten öffentlichen Räumen erinnert erneut an das Berliner Projekt – auch weil hier zum ersten Mal die Verbindung von Sichtbeton, bzw. Architekturbeton mit Naturstein angewandt wird, mit amerikanischem Marmor als Wandverkleidung.

GRAND LOUVRE, PARIS 1983 – 1993

Pei's Bekanntheit in Europa wurde maßgeblich durch den Umbau des Pariser Louvre initiiert.

Neben der überall abgebildeten Zugangspyramide zeichnet sich das Projekt jedoch hauptsächlich durch die gesamte Neukonzeption der inneren Verteilung, der Infrastruktur und der Erschließung neuer Ausstellungsfächen aus. Hier wird zum ersten Mal der französische Kalkstein ‚Magny‘ verwendet, der sich von da an in vielen seiner Bauwerke, auch in Berlin, wieder findet.

MIHO MUSEUM, SHIGA, JAPAN 1991 – 1997

Als letztes Beispiel ist hier das Miho Museums in Japan gezeigt; ein Projekt das 1997 fertig gestellt wurde.

Bauherr war eine kleine, aber sehr wohlhabende religiöse Gemeinschaft, die sich, sehr vereinfacht ausgedrückt, der Schönheit der Dinge in der Natur widmet.

Das Museum liegt inmitten einer hügeligen Waldlandschaft, ca. 30 km hinter Kyoto, und hat etwas sehr Mystisches; so wird der Besucher über eine eigens errichtete, gewundene Strasse auf das Gebäude zugeführt, die dann zu einer imposanten Brücke abbiegt um endlich, unvermittelt, den Blick auf das fast vollständig unter Terrain liegende Gebäude freizugeben. Auch hier sind die Verwendung des Sichtbetons, und vor allem die besondere Präzision der Verarbeitung, hervorzuheben.

DEUTSCHES HISTORISCHES MUSEUM, BERLIN 1996 – 2003

Dies waren sozusagen unsere Vorgaben, mit denen wir 1998 mit der Umsetzung des Entwurfes begannen. Die Ausführung des Architekturbetons war bis dahin ein Novum in Deutschland – und leider hatte keine Rohbaufirma bisher Erfahrungen damit gesammelt.

Daher wurde natürlich versucht, so viel wie möglich im Vorfeld zu klären und in der Ausschreibung festzulegen – was sich in sehr umfangreichen Vorbemerkungen, Bemusterungen und Qualitätskontrollen äußerte.

2 Kurze Projektbeschreibung

Das relativ kleine, dreiecksförmige Grundstück von ca. 2000 m² wird im Süden durch die Gasse ‚Hinter dem Gießhaus‘ und das barocke Zeughaus begrenzt und lehnt sich östlich an das Verwaltungsgebäude des Deutschen Historischen Museums, dem ehemaligen Minolgebäude, an.

Der Erweiterungsbau besteht aus den Ausstellungsbereichen, deren Baukörper sich im Grundriss wie ein Tortenstück ablesen lässt, dem Werkstatttrakt, dem auch ein kleines Auditorium zugeordnet ist, sowie der die beiden Bereiche verbindenden Glashalle - dem öffentlichen Bereich - in dem zahlreiche Stege und Treppen die verschiedenen Funktionsbereiche anbinden.

Um die Sichtbezüge der historisch wertvollen Gassen zu erhalten, wurden Zeughaus und Erweiterungsbau ausschließlich unterirdisch verbunden, was sie zu zwei autarken Bereichen macht, konzeptionell jedoch aneinander bindet und zu einer symbiotischen Einheit von Alt und Neu verschmelzen lässt.

Die ehemals enge Gasse ‚Hinter dem Zeughaus‘ wird durch die geschwungene Glasfassade der Halle zu einem öffentlichen Durchgang aufgeweitet, der den Sichtbezug zum Berliner Dom und dem Fernsehturm erhält. Die Fassade schließt auch den gläsernen Treppenturm an, an den sich der Haupteingang anbindet.

Der Zugang aus dem Zeughaus kommend erfolgt über den quadratischen Innenhof, der mit einer flachen gläserne Kuppel überdacht wurde, die einen ca. 40 x 40 m großen Hof stützenlos mit einer leichten Netzstruktur aus Stahl und Glas (entwickelt in Zusammenarbeit mit Schlaich, Bergermann & Partner) überspannt. Der nun zu allen Jahreszeiten nutzbare Raum ist nicht mehr nur Durchgangsfläche, sondern wird lebhaft für Sonderveranstaltungen genutzt.

Durch diesen Hof erreicht der Besucher den Verbindungsgang, der mit einer Festverglasung bereits den Blick auf das Wechseiausstellungsgebäude freigibt und unterirdisch über Rolltreppen in die Glashalle des Neubaus führt.

Im Untergeschoß der großzügigen Glashalle, die bereits einen Durchblick bis zum Glasdach bietet,

fällt sofort die Materialwahl auf: Außer Glas und Edelstahl gibt es lediglich die bereits erwähnten Materialien des französischen Kalksteins und des Betons, der in verschiedenen Anwendungen - als Deckenuntersicht, als Aufkantung, Sturz, Treppengewange und Rundstütze - zur Anwendung kommt. Alle Fugen der Natursteinverkleidung als auch die Anschlüsse an die Betonelemente sind genau aufeinander abgestimmt und geschlossen verfugt, was den monolithischen Gesamteindruck des Gebäudes unterstreicht.

In dieser lichtdurchfluteten Glashalle sind die Transparenz und die Bewegung der Besucher, das Sehen und ‚Gesehen werden‘ die entwerferischen Mittel, mit denen der Bau die Öffentlichkeit einlädt. Innere Abläufe sind von außen wie durch ein Schaufenster ablesbar, wobei gleichzeitig in der Durchsicht von innen nach außen die bisher vernachlässigte rückwärtige Fassade des Zeughauses wie in einen Rahmen gefasst präsentiert wird.

Jede Ebene ist durch eine unterschiedliche, repräsentative Treppe zu erreichen - und der Besucher so verführt, auch bis in das oberste Geschoß vorzudringen und wird, unbewusst, fast in piranesischem Sinne immer wieder neuen Perspektiven und Geometrien ausgesetzt.

Maßgeblich für die Ausführung des Architekturbetons waren vor allem die folgenden drei Faktoren:

2.1 Betonrezeptur

Zwischen den sichtbaren Architekturbetonflächen und der Natursteinverkleidung sollte eine farbliche Annäherung erzielt werden und der Beton der beige-honigfarbenen Tönung des französischen Kalksteins angeglichen werden. Durch die Zusammenarbeit mit einem französischen Betonberater, der bereits beim Umbau des Louvre tätig war, wurde unter Berücksichtigung der lokalen Standortfaktoren – Temperatur, Wasserqualität, Luftfeuchte etc.- in Zusammenarbeit mit der Rohbaufirma und dem Betonlieferanten ein umfangreicher Bemusterungsprozess durchlaufen, bis Farbe und Struktur (Feinheit, Lunkefreiheit) zufrieden stellend waren.

Hierfür wurden dem Ausgangsprodukt, einem weißen Portlandzement, französische Sande beigefügt, die aus der Region des Natursteinbruches kamen; auf künstliche Pigmentzugaben wurde verzichtet. Diesen Sandbeimengungen - im Bereich Feinst- und Feinkornanteil des fertigen Betons - wurden dann für die weiteren Sieblinien übliche Zuschläge beigefügt, wobei auch hier ein eher heller Splitt gewählt wurde. Nach Freigabe wurde diese Ausgangsmischung in einem eigens dafür vorbereiteten Silo des Betonwerkes gelagert und für die gesamte Bauzeit vorgehalten.

Weiterhin wurden für den Baustellentransport eigene, entsprechend vorbereitete Mischfahrzeuge eingesetzt. Neben der genauen zeitlichen Abfolge der Lieferung und Schüttung war auch die Verdichtdauer vorab genau festgelegt.

Zur Rissbegrenzung wurde bei einzelnen Elementen die Verwendung von Kunstfaserbeimischungen (fibrillierte Polypropylenfasern) getestet, da der Beton durchaus tragende Funktionen erfüllen musste (B35).

2.2 Schalung

Aus 50 mm breiten Brettern aus Oregon Pine (besonders astfrei), mit einer max. zulässigen Maserungsbreite von ca. 3 mm gefertigt, ohne erkennbare Astlöcher oder Verwerfungen innerhalb des Holzes. Verbindung der einzelnen Bretter untereinander mit Nut und Feder. Nur einwandfrei vertikal und möglichst parallel verlaufende Maserungen waren zulässig, daher wurde per Riffschnitt (Radialviertelschnitt) gerichtetes Holz verwendet, dass nur ‚stehende Jahresringe‘ (= Zuwachszonen möglichst rechtwinklig zum Brett) zeigt, und somit auch weniger arbeitet. Das Holz stammte überwiegend aus Kanada und wurde teilweise bereits im Hamburger Hafen begutachtet und dann in der klimastabilen Abbundhalle des Rohbauunternehmers zwischengelagert (konstant einzuhaltende Holzfeuchte von 12-15 %)

Als nächstes wurde die bestmögliche Imprägnierung des Holzes erestet, um ein gleichmäßiges Saugverhalten der Schalung über die gesamte Fläche sicherzustellen – allerdings stellte sich heraus, dass diese Imprägnierung die Maserung zu sehr egalisierte und dadurch die Strukturierung der Betonoberfläche zu schwach ausfiel. Daher wurde zunächst die Maserung mit Stahlbürsten herausgearbeitet, bevor die Imprägnierung aufgebracht wurde. Ebenso wurde die Abdichtung der Bretter untereinander getestet, um auch dort den Austritt von Zementschlamm zu vermeiden – was deutliche Verfärbungen und Unregelmäßigkeiten zur Folge gehabt hätte. Bei all diesen Prozessen war natürlich die chemische Abstimmung zwischen Fugenabdichtung, Imprägnierung und des trotz allem natürlich notwendigen Schalöls besonders zu beachten.

Nachdem die verschiedenen Behandlungsschritte festgelegt waren, wurden die einzelnen Schalbretter nach exakten Vorgaben der Architekten, bei denen jedes einzelne Brett dargestellt worden war, auf einer Unterkonstruktion aus Tafeln ausgelegt und anschließend imprägniert. Ebenfalls einzuhalten war die Ausbildung von Sonderfugen, die z.B. die Deckenflächen von den Aufkantungen trennen. Vor Betonage, bzw. vor Auslegen der Bewehrung wurde jede Fläche eingehend begutachtet und von uns freigegeben. Alle Schallflächen wurden nur einmal verwendet

Sämtliche der oben genannten Prozesse waren bereits in der Ausschreibung beschrieben und gefordert, auch die genau festgelegte Nachbehandlung.

Weiterer Bemusterungsprozess

Zu Festlegung von Betonzusammensetzung und Schalungsausarbeitung waren zahlreiche Handmuster gefordert und angefertigt worden. Um aber nun den tatsächlichen Betoniervorgang überprüfen zu

können, war zusätzlich ein größeres ‚Mock – up‘ gefordert, das sowohl Arbeitsabläufe als auch Anschlusschwierigkeiten im Vorfeld klären sollte und die Herstellung einer Rundstützenschalung vorsah – da auch eine 9 m hohe Architekturbetonstütze als Mittelpunkt des gläsernen Treppenturms geplant war. Erst als auch dieser Test positiv abgeschlossen war, wurde die Fertigung dieser Rundstütze vorangetrieben.

Diese Baumuster wurden während des gesamten Bauablaufes als Referenzmuster erhalten.

2.3 Bewehrung

Generell waren alle Deckenplatten als zweischalige Ausführung geplant, wobei nur die untere 12 cm starke, Faserverstärkte Platte aus Architekturbeton gefertigt wurde. Auf diese wurde dann eine aus herkömmlichem Graubeton gegossene, 28 cm starke Platte aufgebracht.

Um auf der oben beschriebenen, aufwendig hergestellten Schalung der Decken und -aufkantungungen nun keine Bewehrungsfüßchen aufzulegen, die man in den Deckenuntersichten natürlich zwangsläufig später gesehen hätte, musste ein System entwickelt werden, die Schalung ohne Abstützung abzuhängen. Aus Kosten- und wahrscheinlich auch Machbarkeitsgründen schied ein Raumgerüst aus.

Daher wurde, in enger Zusammenarbeit mit dem Statiker, Dr. Stauch von Kunkel + Partner, und dem Büro Eller + Eller, unseren Kontaktarchitekten, folgendes System ausgetüftelt:

Da die Architekturbetondecken mit einem engen Raster von Einbaustrahlern vorgesehen waren, wurden die Einbautöpfe dieser Leuchten zur Bewehrungsabhängung herangezogen. Dazu wurde zunächst der untere Teil des Leuchtenhohlkörpers mit einer eingepassten Rohrhülse, $D=73$ mm, auf die Schalung aufgesetzt und durch den Schalboden verschraubt. Über diese wurde dann ein ‚Querjoch‘ angeordnet, an dem sich seitliche Schlaufen (Hänger) befanden, durch die das Grobbewehrungsnetz aus $d=28$ mm Eisen geführt wurde. Zuvor wurde die Schalung durch Gummischrotmatten geschützt – und anschließend die untere Bewehrungsebene ausgelegt. Durch Hochschrauben der ‚Joch‘ konnte dann die gesamte Bewehrung gehoben, die Matten entfernt und die Betonage der 12 cm starken unteren Architekturbetonenschicht der Decken ausgeführt. Im Anschluss daran wurden die Joch entfernt, die Oberbewehrung ausgelegt, der obere Teil der Leuchtgehäuse aufgesetzt und die Graubetonenschicht aufgeschüttet. Die Aufteilung der Decken in Architektur und Graubeton erfolgte aus Kostengründen.

Die freien Ränder der Decken wurden als Massivbalken, 40×80 cm komplett aus Architekturbeton hergestellt. Dadurch wurden alle architektonischen Sichtfugen automatisch zu Betonierfugen.

Natürlich gab es trotz aller vorab erfolgten Tests, Bemusterungen und genauen Beschreibungen letztendlich doch noch Pannen, von denen die meisten

jedoch glücklicherweise ohne schwerwiegende Auswirkungen blieben.

Allerdings hat gerade zu Anfang nicht jeder Betonierversuch zum Erfolg geführt und es ist unter anderem dem Engagement der Rohbaufirma und dem Verständnis unseres Bauherrn, dem Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung zu verdanken, dass solche Misserfolge behoben werden konnten.

Eine Hauptschwierigkeit lag beispielsweise in der geforderten Präzision – da die Natursteinfugen (6 mm) genau auf die theoretischen Anschlussfugen zum Beton festgelegt waren (6-10 mm). Diese Genauigkeit im Millimeterbereich stellte große Probleme dar – vor allem weil eine aufwendige Vermaßung der Schalung vor Betonage seinerzeit durch den Bauherrn abgelehnt worden war und die max. zulässigen Toleranzen der Ausschreibung nicht umzusetzen waren.

Ein weiteres, letztendlich nicht wirklich gelöstes Problem stellte das Abreiben der Oberseiten der massiven Randbalken dar – Untersicht und Seiten dieser Balken waren ja brettgeschalt, die Oberseite jedoch, über die der Beton eingebracht und verdichtet wurde, sollte abschließend möglichst fein abgerieben werden und so eine fertige Oberfläche ausbilden.

Besonders bei den Treppenwangen, also bei schrägen Flächen, hat dieses Verfahren allerdings nicht zu einem befriedigenden Ergebnis geführt. Es erwies sich als nicht umsetzbar, den genau richtigen Zeitpunkt in dem die Oberfläche zwar angehärtet aber noch nicht ausgehärtet war, mit dem genau richtigen Abriebwerkzeug zu behandeln, um den Ansprüchen einer fertigen Oberfläche zu genügen. Die Oberflächenstruktur fiel letztendlich zu grob aus, was von Seiten des Museums – auch im Hinblick auf eine Reinhaltung dieser Flächen – nicht toleriert wurde. Daher wurden diese Bereiche nachträglich mit einer dünnen Feinspachtelung versehen, die dann eine zufrieden stellende Oberfläche aufwies.

Ähnliches Fingerspitzengefühl war für die nachträgliche Reinigung der Betonoberflächen erforderlich, da trotz aller Vorsichtsmaßnahmen Restbestände von Schalöl, von Holzfasern etc. am Beton festhängen und entfernt werden mussten..

Neben einer vorsichtigen mechanischen Reinigung wurde der Beton auch mit einer stark verdünnten Säure abgerieben, die jedoch bei zu häufigem Auftragen den Beton bleichte, so dass ein sorgfältiges Abwägen zur Behandlung jeder einzelnen Fläche notwendig war.

Letztendlich konnte nur durch große Disziplin und das Engagement aller Beteiligten das Ergebnis erreicht werden, dass heute mit dem großen Erfolg des Gebäudes ausmacht, da allen Besuchern die Besonderheit des Betons auffällt und immer wieder danach gefragt wird.

3 Projektbeteiligte

Architektur: I.M. Pei Architect, New York

Projektarchitektin: Christiane Flasche

mit Eller + Eller, Berlin/ Düsseldorf

Bauherr: Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Berlin

Statik: Kunkel + Partner, Berlin

Rohbau: Alpine Bau Deutschland GmbH

Betonlieferant: Zemtrans, Berlin

Natursteinarbeiten: Schön + Hippelein, Crailsheim

Qualität von Alltagsarchitektur – Das Haus aus Sichtbeton

Bernd Sammann

Zusammenfassung

Der Wohlstand unserer Gesellschaft stellt sich primär in den sog. 'röhrenden Hirschen der Architektur' (Manfred Sack) dar. Die Primärfunktion Wohnen, unsere dritte Haut, die uns täglich umgibt, orientiert sich nach wie vor an den Geschmacksmustern eines polierten Spätbiedermeiers. Im Folgenden werden einige Gedanken entwickelt, die sich mit einer Veränderung im Wohnbau auseinandersetzen, bei denen die Möglichkeiten von Beton in unterschiedlichen Bauweisen technisch zum Einsatz gelangt und diese ästhetisch prägen.

1 Vorbemerkungen und Problematisierung

Architektur hat ein Vermittlungsproblem. Moderne Architektur wird von vielen Menschen heute nicht mehr verstanden.

Woran mag das liegen?



Abb. 1: Alsolp - Masterplan Middlehaven

Hat sich die Architektur zu sehr verselbstständigt?

Fehlt den Rezipienten, also den Aufnehmenden von Sinneseindrücken, den Nutzern, jegliche kulturelle Grundkenntnis von guter Gestaltung und Architekturverständnis?

Sind die ästhetischen Angebote einer kleinen, vermeintlichen Avantgarde wirklich repräsentativ – oder sind sie lediglich 'trendy', von und für Medien gemacht?

Wenn man diesen Themen – also 'Architektur' und 'Vermittlung' - nachspürt, wird man feststellen, dass die Fragestellung Ansätze bietet, die immer wieder bei der komplexer gewordenen Welt beginnen.



Abb. 2: Universum Science Center Bremen

Das Dilemma besteht nach Walther Zimmerli [1] möglicherweise in einem 'Nostalgiedilemma', dass er wie folgt definiert:

'Entweder wir setzen auf die Zukunft; dann aber verleugnen wir unsere Vergangenheit. Oder wir sehen uns nach dem Vergangenen; dann aber haben wir unsere Zukunft hinter uns.'



Abb. 3: Binary large object Graz

Bevor ich näher darauf näher eingehe, möchte ich an dieser Stelle Durs Grünbein zitieren, der in seinem Essay 'Der verschwundene Platz' [2] einige Gedanken hierzu - wie folgt - beschreibt.

'Es ist dieser wahllos zersiedelte Raum, ein Ergebnis von Industrialisierung, Vernichtungskrieg plus

bürokratischer Bevölkerungspolitik, der den Gedanken an konstruktive Schönheit und rationale Gestaltung ein für allemal ausgetrieben hat. Im gleißenden Licht der urbanen Konglomerate erscheint fast jede Architektur nur mehr als kleinliches Flickwerk. Sie selbst ist das Problem, das sie zu lösen vorgibt, ein prinzipielles Defizit, nie wieder gutzumachen, schon gar nicht durch innovative Planungen’.



Abb. 4: 'Deutschlandschaft' Biennale – Beitrag 2004

Es ist bemerkenswert, dass exakt diese Thematik im September 2004 unter dem Titel 'Deutschlandschaft' auf der Architektur – Biennale in Venedig als deutscher Beitrag problematisiert wurde und sich somit m. E. sehr positiv von anderen Beiträgen abhob, die sich noch immer mit den modernistischen Blobs, Verwerfungen und Faltungen einer kleinen Gruppe von Ästheten – zwischen Bilbao, Graz und Wolfsburg - beschäftigen.

Kurt W. Forster, der Kurator der Architektur-Biennale in Venedig schreibt [3]: 'Bewegung – und mit ihr die Vorstellung der kontinuierlichen Veränderung – beansprucht heute den Primat über das Statische. Das Kommunikationszeitalter hat die Fixierung auf den festen Ort aufgehoben und uns förmlich in den weltweiten Mantel ihres Mediums gehüllt’.

Ein bemerkenswertes Statement, das den Umgang mit Fragen der Alltags - Architektur nicht gerade vereinfacht!

Wenn wir uns mit der Frage auseinandersetzen wollen, wohin wir gehen wollen, müssen wir uns besinnen und – immer wieder - klären, wo wir denn herkommen!

2 Der Hausbau

Bestand das Haus – in diesem Falle der Wohnbau – von der Historie bis in die jüngere Vergangenheit, also etwa bis 1960 – aus einer überschaubaren

Materialverwendung, egal ob im individuellen Hausbau oder im Geschößwohnungsbau - also im Wesentlichen aus:

- Naturstein,
- Ziegel im Wand – und Dachbereich,
- Mörtel als Verbund von Zement bzw. Gips mit Kalk und Sand,
- Holz in seinen verschiedenen Verarbeitungsformen sowie
- Glas in sparsamen Einsatz und natürlich:
- opus cementitium (– dort, wo man ihn bereits kannte),

so verwenden wir heute einige Tausende Bauprodukte in den unterschiedlichsten Verarbeitungsformen mit Rohstoffen aus einer globalisierten Bauwelt – scheinbar ohne Grenzen!

'In der Industrialisierung des Bauwesens sehe ich das Kernproblem des Bauens unserer Zeit. Gelingt es uns, diese Industrialisierung durchzuführen, dann werden sich die sozialen, wirtschaftlichen, technischen und auch künstlerischen Fragen leicht lösen lassen' sagte Ludwig Mies van der Rohe 1924.

Leider hat sich diese Erwartung nicht eingelöst!

Kulturkritiker befassen sich heute intensiv mit der Frage, ob die Verhaltensmuster aus der Zeit des Überflusses der letzten 30 Jahre noch so vertreten werden können.

'Anything goes'!!! – Das war der gemeine Slogan, das Lebensmotto einer ganzen Generation!

Die Thesen des 'Club of Rome' – vertreten durch Eduard Pestel in der Publikation 'Jenseits der Grenzen des Wachstums' [4], die damals schon den schonenden und sparsamen Umgang mit den Ressourcen (heute: Nachhaltigkeit?) einforderten, haben rechtzeitig gewarnt, doch niemand wollte dieses in Zeiten eines scheinbar unbegrenzten Wachstums hören.

Eine Institution, die heute für ein Bürogebäude für ca. 1.500 Mitarbeiter Herstellungskosten in Höhe von 500 Millionen Euro investiert, kann nicht den Anspruch der Nachhaltigkeit für sich in Anspruch nehmen – auch wenn es dafür diverse Architekturpreise bekommen hat! (Pro Arbeitsplatz wurden im Zentrum Hannovers Euro 333.333,- investiert! - Betriebskosten von Glas – Architekturen werden verständlicherweise nicht genannt!)



Abb. 5: Turmbau zu Babel – Pieter Breughel

Umso überraschender ist eine Architekturtendenz – von einer Epoche zu sprechen wäre zu früh – die sich mit Einfachheit, Reduktion, Minimalismus und eben echter Nachhaltigkeit auseinandersetzt.

In Regionen mit einem vorbereiteten kulturgeschichtlichen Hintergrund, so zum Beispiel in calvinistisch geprägten Teilen der Schweiz und des Bodenseeraumes, aber auch in Bereichen, die über eine aktive Diskussion über Baukultur verfügen, etwa in Dänemark oder Finnland (Hier ist Architektur Schulfach!) geht man mit diesen Entwicklungen völlig anders um, als bei uns in Deutschland.

Verschreckt und aggressiv reagieren große Teile der Bevölkerung hier auf reduzierte Architektursprachen, die man gemeinhin in die Schublade der sog. 'Bauhaus-Architektur' einordnet.

Ich möchte dieses Phänomen provokant als einen Teil unserer gesamten gegenwärtigen Bildungsmisere definieren!

Die Problematik wird um so frappierender, wenn man sich verklart, dass ca. 80 % aller Arbeitstätigkeiten in Büros, Verwaltungen etc. stattfinden (Deutschland als Standort des produzierenden Gewerbes ist bekanntlich z. Zt. nicht gefragt).

Betrachtet man nun vergleichend die Lebenswelten von Wohnen und Arbeiten, so potenziert sich die Widersprüchlichkeit:

Der funktionalen Arbeitswelt mit ergonomischen Designdetails und klaren Strukturen stehen die Kuscheligkeit und die Gemütlichkeit gegenüber, von denen selbst unsere Großeltern nicht zu träumen gewagt hätten! (Von Goethe stammt das Wort, man möge den Begriff der ‚Gemütlichkeit‘ aus der deutschen Sprache verbannen!)

Diese Flucht in die Vergangenheit – z. Zt. trägt man sog. 'Retro - Design' in der Mode, bei Möbeln, bei besonderen Automobilen – aber auch im Hausbau – stimmt bedenklich und impliziert wichtige Themen für Psychologen und Kulturwissenschaftler.

Zurück zu unserem Kernthema: Die bestens bekannte These 'Es kommt darauf an, was man draus macht!' reicht so heute nicht mehr aus!

Auch von den Vertretern des Betonmarketings, von Ihren Verbänden und Funktionären, muss erwartet werden, dass sie Mehrwert investieren, um über positive Beiträge und Beispiele den öffentliche Diskurs leidenschaftlich und neu zu initiieren:

Wir haben eine andere Gegenwart!

Die Akzeptanz des Baustoffes Beton in der Ingenieurbaukunst ist unbestritten! - Der Materialeinsatz erklärt sich hier scheinbar aus den statisch-technischen Erfordernissen. Die Ästhetik steht nicht primär im Vordergrund; ...'es ist halt ein Zweckbau!'



Abb. 6: Industriebau Fa. Stadler Edelstahl in Herford



Abb. 7: Industriebau Fa. Inometa, Herford – Detail



Abb. 8: Sichtbeton im Industriebau in Herford – Detail



Abb.9: Sichtbeton im Industriebau in Herford – Detail

Aber – wie auch in der Architektur - es gibt halt auch gute und schlechte Ingenieurbauwerke, egal ob nun Brücken, Tunnels oder Kraftwerke!

Sichtbeton in der Architektur der öffentlichen Gebäude, bei Parlamenten, Museen oder den Orten der Arbeit, also im gewerblichen Bereich, wird allseits akzeptiert, weil diese Bauwerke in der Regel ‚groß‘ sind!

Hier hat Akzeptanz auch etwas mit Respekt vor dem Ausmaß, der Dimension – eben der Größe als architektonisches Mittel zu tun!

Bedingt durch die Kostenlimits (ca. 1.000,- €/m² WF) unterscheiden sich die architektonischen Möglichkeiten bei diesen unterschiedlichen Themen allerdings gravierend!

Beton – besser: Sichtbetoneinsatz – bei gewerblichen Projekten: als ‚Spielwiese‘, d.h. da Sichtbeton im gewerblichen Bauen relativ unverdächtig ist, bieten sich hier wunderbare ‚Trainingsmöglichkeiten‘ für spätere Verwendungen von Beton im Wohnbau.

3 Der Wohnbau

Im Wohnbau ist das alles anders! – Jeder wohnt, wie gewohnt, kann also mitreden! (...oder wissen nur die Architekten wieder einmal alles besser..?)

In seinem Architektur – Preis – Beitrag ‚Zukunft Wohnen‘ schreibt J.M. Fehlbaum [5] über die Anforderungen, die an zukunftsweisende Wohnbau – Architektur zu stellen sind.

Einige Aspekte hieraus – verkürzt dargestellt – sind folgende Forderungen:

- die Forderung nach kosten- und flächensparendem Bauen,
- das Arbeiten im Bauteam (d.h. Bauherr / Investor, Architekt und Bauunternehmer),
- die gestalterische Aufwertung des Wohnungsbaus,
- der Wunsch nach vielfältigen Wohnungstypenangeboten für eine stärkere soziale Durchmischung der Bewohner.



Abb. 10: Individueller Wohnbau in Gehrden

Seit einigen Jahren haben uns allerdings andere Themen eingeholt, die wir doch hätten voraussehen können, da wir bereits davor gewarnt worden sind (s. nochmals die Thesen des Pestel - Institutes).



Abb. 11: Individueller Wohnbau – Sichtbeton
Detail

Hans Küng [6] sagt: Wir haben die Zeit der sog. 'Erlebnis – Gesellschaft' – nach der 'Zeit der Arbeitsgesellschaft' – hinter uns gelassen und bewegen uns auf ein neues gesellschaftliches Territorium zu, welches noch nicht eindeutig zu definieren ist.

Die Themen, mit denen wir uns dringlich und leidenschaftlich beschäftigen müssen, lauten:

- Demographische Veränderungen: unsere Gesellschaft steht vor gravierenden demographischen Veränderungen und hat darauf noch keine Antworten,
- Schrumpfende Städte: wir haben ungewollt 'schrumpfende Städte' [7] und dafür weder ein echtes Problembewusstsein noch qualifizierte, politische / fachliche Handlungskonzepte,
- Aufgabe von Siedlungsraum: die Aufgabe von Siedlungs – und auch von Wohnraum darf kein Tabu mehr sein (allerdings: die Instrumente des Planungsrechtes sind lediglich auf Wachstum und Bestandspflege ausgerichtet!),
- Re-Urbanisierung: die Stadt als Wohnstandort - in verträglicher Nutzungsmischung – muß zurückgewonnen werden ('Die Charta von Athen', Leitbild der Moderne von 1928, mit ihrer 'Trennung der Funktionen' hat versagt!).
- Intelligente Gebäude: es werden intelligente Gebäude benötigt, die nicht nur kosten- und energie-optimiert sind, sondern die flexibel unterschiedlichen Nutzeransprüchen gerecht werden können.
- Überregulierung: wir müssen unsere Baugesetze, technische Vorschriften und Normungen überdenken, vereinfachen und de-regulieren (damit im Bauwesen auch ein Hundai statt eines Mercedes möglich ist!).
- u.v.A.m.

Besonders wichtig wäre mir noch der Hinweis auf die sich verändernde Landschaft der Bautätigen:

- Mit welchen Firmen, mit welchen qualifizierten Facharbeitern wollen wir in Zukunft unsere anspruchsvollen Projekte ordentlich realisieren?

Gleichwohl: Meine These lautet: 'Stadt und Gebäude müssen etwas können!'

'Betonzelle – Über die Entsinnlichung des Wohnens' heißt der provokante Beitrag des Theologieprofessors und Priesters Reimer Gronemeyer [8]. Thematisiert wird der Verfall der Wohnkultur im globalen Kontext:

'Dabei ist das Haus ursprünglich die Quelle der kulturellen Blüte gewesen, vermutlich sogar der Ursprung religiöser Optionen: Die Schwelle des Hauses, die zwischen Drinnen und Draußen scheidet, dürfte die Vorform des Altars gewesen sein, so wie der Hausherr, der den Gast an der Schwelle des Hauses empfängt, die Urgestalt des Priesters gewesen sein dürfte'.

'Betonzelle', 'Entsinnlichung des Wohnens' und Gronmeyers Hinweis auf den Satz Buddhas: 'Freiheit ist im Verlassen des Hauses' – Begriffe, Deutungen und Zitate, die den gegenwärtigen Wohnbau sehr negativ darstellen.

Gronemeyer meint seine Charakteristik des wohnkulturellen Verfalls global: 'von Taiwan bis Ohio, von Lima bis Peking' – aber auch wir in Westeuropa sind gemeint!

Wie ist es möglich, dass in einem der reichsten Länder der Erde das Wohnen derart zur Ware verkommen ist?

'Das Haus, bevor es zur käuflichen Betonzelle wurde, war keine Maschine (Le Corbusiers Wohnmaschine ! – Anmerkung des Verfassers), sondern war von Menschenhand hergestellt.'

Der Werkstoff Beton wird hier als negative Überhöhung benutzt, um eine zusätzliche Abneigung zu produzieren.

Vor diesem Hintergrund: Was bedeutet diese, meine Aussage, dass Gebäude 'etwas können müssen?'

Aus der gewerblichen Wirtschaft haben wir gelernt, dass spätestens nach 5 Jahren der Fall des Nutzerwechsels bei einem Gebäude eintritt. Nicht zuletzt aufgrund der heute geforderten mentalen und geographischen Mobilität muß dieses auch auf den Wohnbau übertragbar sein.

Kann man aus der Geschichte – hier: aus der Baugeschichte – lernen?

Ein einfaches Beispiel hierzu zeigt uns Mies van der Rohe mit seiner Forderung nach flexibler Grundrissgestaltung aus dem Jahre 1928.

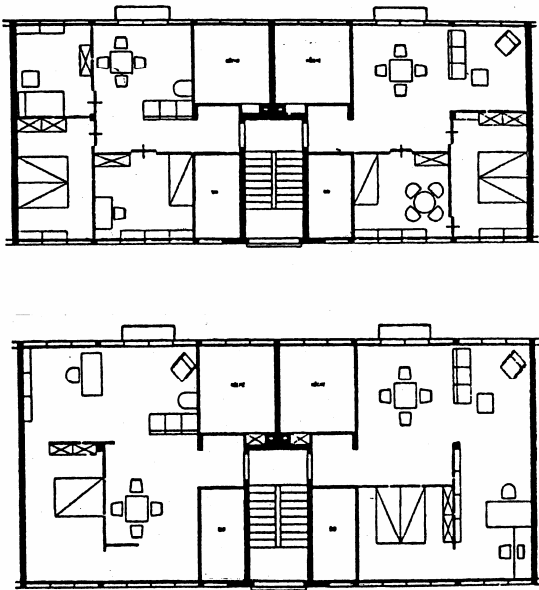


Abb. 12: Ludwig Mies van der Rohe, 1928:
Konventioneller Grundriss (o); Flexibler Grundriss (u)

Das bedeutet, dass wir auch im Wohnbau ‚offene Systeme‘ erfinden müssen, die temporär jeweils veränderten Nutzeransprüchen gerecht werden können!

Ähnlich wie im Städtebau, wo man in der Bauleitplanung verstärkt über die ‚Nutzung auf Zeit‘ nachdenken muß, da der überkommene 50-Jahres-Horizont der Bauleitplanung nicht mehr realistisch und zeitgemäß ist, muß hier nun auch der Wohnbau reagieren!

Ansätze finden sich in den gründerzeitlichen Wohnbeständen des 19. Jahrhunderts und den sog. ‚Loft – Strukturen‘ in Altbaubeständen, in denen sowohl Wohnen als auch Arbeiten möglich sein soll.

Abgesehen von der Nutzung soll jeder Bewohner auch über die räumliche Aufteilung seiner Nutzungseinheit selbst entscheiden können – egal, ob er hier wohnt oder arbeitet. Die totale Definition – und damit Einengung - hat uns erst die II.BV für den öffentlich geförderten Wiederaufbau nach 1945 beschert!

Dezentralisierung von Arbeit – aufgrund der informationstechnischen Möglichkeiten heute kein Problem mehr – muß jederzeit realisierbar sein – auch in der Verbindung mit der Funktion: Wohnen!

Wenn also Gebäude etwas können sollen, müssen wir uns lösen von bestimmten Reglements. D.h., z.B. von der II.BV, die nicht nur den Wohnbau seit 1945 bestimmt hat, sondern die auch die Gebäudelehre an den Architekturabteilungen der Hochschulen jahrzehntelang beherrscht hat – obwohl sie ‚nur‘ ein Förderkriterium des Wohnungsbaus der Nachkriegszeit war.

Kostengünstiger Wohnungsbau, die Produktion prä-fabrizierter Bauteile und logistisch effektiver Einsatz auf der Baustelle, die energetische Effizienz und auch die ‚Anmut‘ des Gebäudes - wie Vitruv sie

nennt - stellen m. E. keine Probleme an die Architekten dar.

Wichtig scheint mir, dass auch die Bauherren des Wohnungsbaus (Gibt es sie noch?) sich auf neue, flexible Nutzungskonzepte einlassen und nicht nur scheinbar (noch) am Markt gängige Wohnkonzepte - und damit Grundrisslösungen und ihre Technologien - favorisieren!

Wenn in der demographischen Entwicklung der bundesrepublikanische Standard – Haushalt mit 2,3 Personen (Mutter – Vater – Kind) nur noch statistisch richtig ist, muß man Angebote vorhalten für andere Wohnformen, wie z.B. – hier ‚neu-deutsch‘ definiert – Singles, Yuppies, Dinkies und die sog. Patch-work-Familien!

Darüber hinaus müssen wir Frank Schirrmachers ‚Methusalem-Komplott‘ [9] zur Kenntnis nehmen, aus dem folgt, dass bei steigender Lebenserwartung gerade ältere Menschen andere Wohnbedingungen benötigen, als die eben Obengenannten.

100 Jahre: Die neue Lebensgrenze?				
Anzahl der 100-Jährigen in der Gesamtbevölkerung, 1960 und 1990				
Land	1.1.1960		1.1.1990	
	Anzahl	pro Million	Anzahl	pro Million
Österreich	25	3.5	232	29.8
Belgien	-	-	474	48.1
Dänemark	19	4.1	323	62.8
England & Wales	531	11.6	3890	76.3
Estland	-	-	42	26.7
Finnland	11	2.5	141	28.3
Frankreich	371	8.1	3853	67.9
Deutschland, West	119	2.2	2528	40.0
Island	3	17.0	17	66.7
Irland	-	-	87	24.8
Italien	265	5.4	2047	35.5
Japan	155	1.7	3126	25.3
Niederlande	62	5.4	818	54.7
Neuseeland	18	7.6	198	59.2
Norwegen	73	20.4	300	70.7
Portugal	-	-	268	27.2
Singapur	-	-	41	15.2
Schweden	72	9.6	583	68.1
Schweiz	29	5.4	338	50.4
14 Länder	1753	5.3	18394	45.1
19 Länder	-	-	19306	44.3

Quelle: Väino Kannisto: The Advancing Frontier of Survival, Max-Planck-Institut Rostock, 1996

Abb. 13: Tabelle ‚100 Jahre: Die neue Lebensgrenze?‘ [7]

Darauf muss sich auch die Wohnungswirtschaft einlassen, wenn sie im Mietwohnungsbau attraktive Angebote liefern möchte, um im ubiquitären Verdrängungswettbewerb konkurrenzfähig zu bleiben.

‚82% der Mieter in Großstädten sind unzufrieden‘ – titelt die FAZ am 6.11.2003 anlässlich des Wohnungsbaupolitischen Kongresses in Hannover mit dem Thema ‚Umbau als Chance‘.

Für den Erwerb einer Wohnimmobilie in der Innenstadt - mit sämtlichen erforderlichen und vorhandenen Infrastrukturen in der Nachbarschaft - mag

die Nachfrage nach Altbauwohnungen gewisse Parameter freisetzen.

Ein Aspekt ist die Finanzierung, bei der es gelingen muss, möglichst privates Kapital zu initiieren, um den Stadtbau erfolgreich werden zu lassen.

Der derzeitige Neubau von Wohneigentum in den Innenstädten bietet – nach wie vor – keine qualifizierte Alternative zu den Altbaubeständen der Gründerzeit, da er sich noch immer an überholten Wohnkonzepten orientiert.

Was macht aber die Attraktivität der alten Strukturen aus?

Neben Größe in der Fläche, attraktiver Raumhöhe und dem sog. 'Altbau - Image' ist es die flexible Grundrissituation, die sowohl dem klassischen Familienwohnen als auch der Wohngemeinschaft, der Anwaltskanzlei und dem Steuerberaterbüro gerecht wird.

Die qualitative Ausstattung ist primär nicht entscheidendes Kriterium; Nachrüstung und Änderung im Bereich des Innenausbaus ist nachträglich bei Bedarf immer möglich, wenn das Architekturkonzept vorausschauend und qualifiziert aufbereitet worden ist!

4 Zwei Arbeiten

Für Voltaire – so sagt man – bestand 'der einzige Ausweg, den Grausamkeiten der Welt zu entrinnen, nicht im Philosophieren, sondern in der Arbeit selbst'.

Im Folgenden werden zwei Arbeiten – eine fertig gestellte und eine im Bau befindliche - zum Thema 'Wohnbau in Sichtbeton' unter Einsatz von Hochofenzement dargestellt!

4.1 Individueller Wohnbau Bentherr Berg, Hannover



Abb. 14: Abbruch Haus Bergstrasse 21, Bentherr

Themen des Erneuerungskonzeptes:

- Voruntersuchung: Sanierung eines 50erjahren Gebäudes - oder Abbruch und Neubau,
- Nachverdichtung einer bestehenden Baustruktur - als städtebauliches Anliegen,
- Energetische Neuorientierung (Betonkerntemperatur, Warmwasserbereitung und Heizungsunterstützung durch Solarkollektoren),

- - Kostenreduzierung durch gemeinsame Bauweise und Baudurchführung: Bautypen,
- Umkehrung der Bauweise: Nach dem Betonieren der Sichtbetonfassaden werden die tragenden Innenwände und – decken (mit BKT)realisiert,
- Kompakter Baukörper und definierte Räume – statt entmaterialisierte Glasarchitektur!
- Einsatz von Hochofenzement CEM III / A 32,5 N aus Gründen der Gleichmäßigkeit und Helligkeit des Sichtbetons.



Abb. 15: Panorama der Neubauten am Bentherr Berg

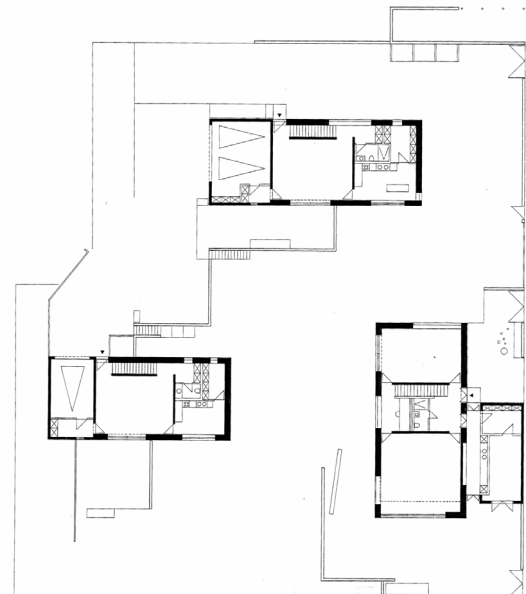


Abb. 16: Gesamtanlage Wohnbau Bentherr Berg



Abb. 17: Herstellung der Fassaden in Sichtbeton



Abb. 18: Betonieren der Geschossdecke



Abb. 21: Haus C: Fassadenverspannung – von innen



Abb. 19: Haus S: Luftbild der Sichtbetonstruktur



Abb. 22: Haus E: Hanghaus in Sichtbeton



Abb. 20: Haus S: Betonkerntemperierung EG-Decke



Abb. 23: Haus C: Loggia Wohnraum Obergeschoss



Abb. 24: Haus E: Detail Loggia



Abb. 25: Haus C + E: Kuben, Fassaden mit Loggien

4.2 Geschößwohnungsbauprojekt Beyersche Burg 1 der gbg Gemeinnützige Baugesellschaft, Hildesheim



Abb. 26: Abbruch Altbau Beyersche Burg 1 in 2004

Themen des Erneuerungskonzeptes:

- Abbruch eines 50-Jahre – Gebäudes – da das Wohnungsangebot nicht mehr marktgerecht war

und wegen zu hoher Sanierungskosten – als Chance,

- Neuinterpretation der städtebaulichen Situation: Die offene Blockecke des Nachkriegsstädtebaus,
- Konkrete Berücksichtigung der Bauweise in der Vorentwurfsphase,
- Neue Wohnqualität: Quartierssanierung der gbg – mit neuem Farb – und Grünkonzept,
- Neue Wege mit 'offenen' Grundrissen im öffentlich geförderten Sozialen Wohnungsbau,
- Förderung aufgrund eines aktualisierten Energiekonzeptes,
- Kommunikativ nutzbare Erschließungssysteme – statt Spänner – und Laubengängerschließung,
- Additive Bauweise als Kombination von Ortbeton als Sichtbeton, Betonfertigteilen in Sichtbetonqualität, Mauerwerk und Holzrahmenbauweise mit Faserzement-Platten – für den NEH-Standard.

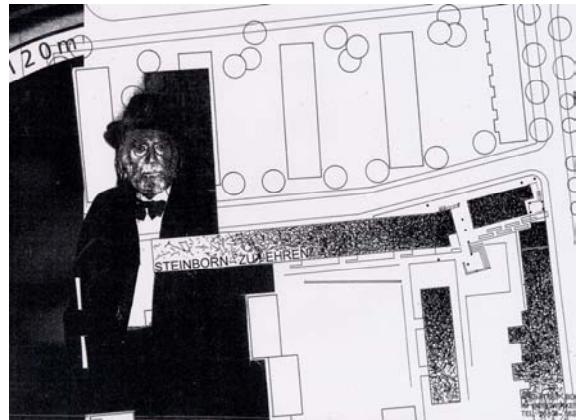


Abb. 27: Der Quartiers - Architekt A. E. Steinborn, Hildesheim, 1951

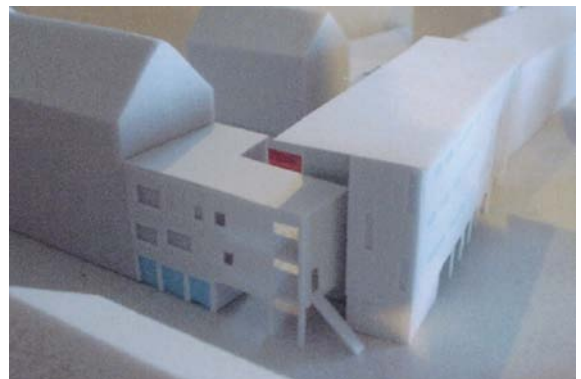


Abb. 28: Interpretation der Blockecke 2004



Abb. 29: Nordansicht Beyersche Burg 1, Hildesheim



Abb. 30: Westansicht Beyersche Burg 1, Hildesheim



Abb. 31: Ostansicht Beyersche Burg 1, Hildesheim



Abb. 32: Südansicht Beyersche Burg 1, Hildesheim

5 Literatur

- [1] Zimmerli, Walther Ch.: Vortrag im Rahmen der Diskussion 'Schlosslust – Schlossfrust', Hannover, 2004
- [2] Grünbein, Durs: 'Der verschwundene Platz', - in: 'Warum schriftlos leben?' Ffm., 2003
- [3] Forster, Kurt W.: 'Globale Trends in der Architektur' – in: Betonprisma 83.2004
- [4] Pestel, Eduard (Club of Rome): 'Jenseits der Grenzen des Wachstums', 1988
- [5] Fehlbaum, Jörg M. - in: '2.Foren - Dokumentation Kostengünstiger, qualitätvoller und ökologischer Wohnungsbau', Köln – ohne Jahresangabe
- [6] Küng, Hans – in: 'Zukunft der Arbeit – Arbeit der Zukunft', Alfred-Herrhausen-Stiftung, Düsseldorf, 2000
- [7] Oswald, Philipp / Kulturstiftung des Bundes: 'Schrumpfende Städte', Berlin, 2004
- [8] Gronemeyer, Reimer: 'Betonzelle. Die Entsinnlichung des Wohnens' – in: Architektur und Wahrnehmung, Ingeborg Flagge, Darmstadt, 2003
- [9] Schirmmayer, Frank: 'Das Methusalem – Komplotz', München, 2004

Sichtbeton – Hinweise zur Planung und Ausführung

Martin Peck

Zusammenfassung

Die Planung und Ausführung von Bauteilen und Bauwerken mit Ansichtsflächen aus Beton erfordern aufgrund des geringen und eingeschränkten Regelwerkshintergrundes zur Bauweise Sichtbeton ein besonderes planerisches vorgehen. Entgegen der recht einfachen Erläuterung der vertraglichen Leistungen zur technischen Herstellung eines Stahlbetonbauteils im Leistungsverzeichnis ist die kalkulierbare Beschreibung besonderer Flächenmerkmale schwierig, da sie nicht durch die Summe von eindeutigen Teilleistungen erfolgen kann, sondern über die Schilderung einer planerischen Vorstellung geschieht. Die Neuauflage des bekannten Merkblatts „Sichtbeton“ von BDZ und DBV trägt diesen Umständen Rechnung und ist geeignet, die vertragliche oder vorvertragliche Festlegung der Beschaffenheit von Ansichtsflächen aus Beton zu unterstützen. Dies geschieht vor allem durch die Einführung eines abgestuften Klassensystems, in welchem sowohl die geforderten Flächenergebnisse und -merkmale als auch die nötigen planerischen und ausführungstechnischen Maßnahmen zur Erlangung der gewünschten Oberflächenbeschaffenheiten formuliert sind. Im Gegensatz zu den normativen Regelungen des konstruktiven Stahlbetonbaus impliziert eine programmartige und unreflektierte Einhaltung und Abarbeitung der vorgegebenen Regeln jedoch nicht den automatischen Erhalt des gewünschten Flächenergebnisses, vielmehr formuliert das Merkblatt Regelungen und Maßnahmen, deren Einhaltung zur Herstellung der geforderten Merkmale notwendig, aber nicht in jedem Falle ohne weitere Maßnahmen hinreichend ist. Die Qualitätsschöpfung an der Baustelle erfordert vor allem einen intensiven technischen Dialog zwischen allen Beteiligten in jeder Phase der Ausführung, eine qualitativ und quantitativ hinreichende personelle Ausstattung der Baustelle und einen allzeit hohe Arbeits-sorgfalt. Trotz der Notwendigkeit engster Kooperation zwischen dem Planer, dem Ausführendem, dem Bauherren und dem Betonhersteller sollten die Verantwortlichkeiten der einzelnen Vertragspartner stets beachtet und die Verantwortungsübergänge fair moderiert werden. Gute Qualität entsteht vor allem dann, wenn es den Beteiligten gelingt, ihre gemeinsame Aufmerksamkeit auf das technisch richtige Vorgehen zu lenken und ihre Kräfte zu bündeln.

1 Einleitung

Die rasche und nachhaltige Entwicklung der Betontechnik in den letzten 100 Jahren hat auch die Architektur in dieser Zeit nachhaltig beeinflusst. Die ständige Verbesserung und die breite Verfügbarkeit des Baustoffs Beton erlaubte die konstruktive und gestalterische Realisierung kreativer Konzepte, die mit den bis dato eher baumeisterlich geprägten Bauverfahren in dieser Form nicht möglich waren. Es war eine Frage der Zeit, bis die Architektur die geschalte oder die bearbeitete Betonoberfläche als gestalterisches Element erkannte, das die Identität und die Authentizität der Bauweise mit großer Kraft darzustellen vermochte. Beton als Oberfläche unterstützte die Wirkung der klaren, reduzierten Konzepte der Architektur im Beginn des vergangenen Jahrhunderts in besonderer Weise. Es entstanden Betonbauwerke, die heute als Meilensteine der Architekturge-schichte gelten. Der Beton hat durch seine nahezu beliebigen Formbarkeit und unkomplizierte Bautechnik die Architekten wie kein anderer Baustoff inspiriert und den Horizont der Gestaltungsmöglichkeiten ständig erweitert. Für die moderne Architektur gehört die Visualisierung des Baustoffs in Struktur und Fläche untrennbar zum konstruktiven Umgang mit dem Material Beton. Der sichtbare Beton, oder „Sichtbeton“, ist natürliches Ele-

ment der Planung mit diesem Baustoff und fester Teil der globalen Baukultur.

Anders als bei den großen Nutzbauwerken des Tief- oder Wasserbaus, in denen sichtbare Betonflächen bauartbedingt entstehen und meist kein anspruchsvolles Gestaltungskonzept verfolgt wird, sind Sichtbetonflächen im repräsentativen Hochbau vielfach zentrales Element des architektonischen Ausdrucks. Dabei haben sich die jeweils bevorzugten Flächentexturen über die Zeiten durchaus verändert. Die ursprünglich rein baubetrieblich motivierte Entwicklung der Schalungs- und Schalhauttechnik gab der Entwicklung des Sichtbetons entscheidende Impulse. Das Aufkommen der beschichteten Sperrholzplatten in den Jahren nach 1960 zur wirtschaftlichen Bewältigung großflächiger Schalaufgaben mit vielfachen Schalhauteinsätzen begründete letztlich den etwa seit 1980 bis heute währenden Trend glatter, möglichst makelloser Ansichtsflächen aus Beton. Dies bedeutet jedoch die Präferenz der schwierigsten Sichtbetonbauweise überhaupt. Die Herstellung von Sichtbetonflächen mit einer glatten, nicht saugenden Schalhaut ist bis heute die hohe Schule des Betonbaus und in Aufwand und Ergebnis technisch noch immer schwer zu beherrschen. Sie birgt eine Reihe charakteristischer Probleme, die auch durch den Einsatz erheblich erhöhter Aufwende letztlich nicht völlig auszuschließen sind.

Es besteht also Bedarf, die Planung und die Ausführung von Sichtbeton durch intensive Forschung und Beratung zu unterstützen. Der Deutsche Beton- und Bautechnikverein und die beratenden Organe der Zement- und Betonindustrie haben aufgrund der erkannten Probleme bereits 1977 die erste Ausgabe des bekannten Merkblatts Sichtbeton erarbeitet und dies 1997 den laufenden Entwicklungen der Bauweise angepasst. Mit fortschreitendem Erkenntnisstand und angesichts einer veränderten Rechts- und Sachlage empfahl sich zwischenzeitlich eine Überarbeitung, die eine grundlegende Neustrukturierung der Inhalte mit sich brachte. Bei der Überarbeitung des Merkblattes sollte neben deutlicheren Regelungen zur Beurteilung der vertraglichen Leistung Sichtbeton vor allem eine stärkere Unterstützung der Planung erreicht werden. Die Neufassung des Merkblatts wurde im August 2004 als gemeinsames Produkt der o. g. Gemeinschaftsorganisationen veröffentlicht und markiert den aktuellen Stand der Erkenntnisse zur Planung, Ausführung und Beurteilung von Ansichtsf lächen aus Beton im fachlichen Konsens der beratenden Organisationen.

In den nachfolgenden Ausführungen soll es nicht zu vorderst darum gehen, die Inhalte des Merkblatts Sichtbeton kommentiert und verdaulich zu vermitteln. Vielmehr sollen die besonderen Verhältnisse, unter denen Sichtbeton geplant, ausgeführt und beurteilt wird, herausgestellt und die kritischen Fragen und Antworten, die im Zuge der Erarbeitung des Merkblatts Sichtbeton zu diskutieren waren, offen gelegt werden. Die Motivation und die Sinnansätze der inhaltlichen Strukturen und einzelner Regelungen des Merkblatts sollen im Zusammenhang mit den ursächlichen Praxisverhältnissen dargestellt werden.

2 Gestalterische Vorstellung Planung, Realisierung und Realität

Die technisch-konstruktive Beschreibung der Leistung zur Herstellung eines Stahlbetonbauteils in einem Leistungsverzeichnis ist unproblematisch. Sie erfordert üblicherweise nur die Erklärung der drei Hauptparameter Bauteilgeometrie, Betoneigenschaften und Bewehrungsinhalt. Diese wenigen Beschreibungsmerkmale sind eindeutig und hinreichend, da entweder normativ geregelt oder mit einfachen mathematischen oder grafischen Darstellungen (Abmessungen, Ausführungspläne) unmissverständlich zu vermitteln. Die Festlegung dieser konstruktiven Leistungsdetails zur Herstellung eines Stahlbetonbauteils geschieht üblicherweise im Zuge der Tragwerksplanung, wird also nicht durch den gestaltenden Architekten, sondern durch ein beigezogenes Statikbüro geleistet.

Die Beschreibung der Anforderungen an das Aussehen von Betonoberflächen bleibt hingegen Aufgabe des Architekten und ist ungleich schwieriger. Anders als bei der Reproduktion mess- und berechenbarer technischer Größen ist hierzu eine planerische Vorstellung zu vermitteln. Die Vorstellung des Planers vom Aussehen und von der Wirkung einer Sichtbetonfläche ist aber zunächst ein kreativer Gedanke, der nicht durch Normvor-

gaben beschrieben und möglicherweise ganz losgelöst von material- und herstellungstechnischen Randbedingungen entstanden ist. Dies zwingt bei der Beschreibung der Leistung zur Improvisation.

Ob die Realisierung der planerischen Vorstellung erfolgreich sein wird, hängt in dieser Phase vor allem von der Vermittelbarkeit und von der Machbarkeit seiner Vorstellung ab: kann der Planer die erwartete Oberflächenbeschaffenheit hinreichend beschreiben und ist diese Leistung unter den Bedingungen der Baustelle und des Vertrages herstellbar? Die kritische Beurteilung und positive Umsetzung dieser beiden Voraussetzungen für die erfolgreiche Realisierung einer planerischen Vorstellung wird in der Hochschulausbildung des Architekten meist nur im Ansatz vermittelt. Die praktische Umsetzung ist oft ungeübt und kann den betroffenen Planer im Einzelfall deutlich überfordern. Aus den Erkenntnissen des Beratungsalltags wird deutlich, dass die vertraglich eindeutige Beschreibung der Leistung Sichtbeton im überwiegenden Falle misslingt und damit zur Hauptursache für Streitigkeiten über das vertragliche Bausoll wird. Darüber hinaus werden die Versagensrisiken und der Aufwand zur Realisierung des erwarteten Ergebnisses seitens der Planung vielfach unterschätzt, die Erfordernis der eigenen Mitwirkung vernachlässigt und die vertraglichen Ausführungsbedingungen häufig ungünstig ausgestaltet. Auch bei hohen Qualitätserwartungen wird der Erfolg bei der Vergabe meist dem Diktat von Niedrigpreisigkeit und einer rekordverdächtigen Bauzeitplanungen unterworfen, - was jedoch nur selten zu einer entsprechenden Anpassung der planerischen oder bauherrenseitigen Erwartungen führt.

3 Planungshilfe Merkblatt

Wie bereits deutlich gemacht wurde, können und sollen planerische Vorstellungen weder genormt noch in die Grenzen eines Regelwerkes gezwängt werden. Dennoch verfolgt das Merkblatt Sichtbeton die Intention, dem Planer standardisierte Vorgaben und Schlüsselbegriffe zu bieten, die mit festen und sachgerechten technischen Forderungen und Kriterien zur Herstellung der geforderten Merkmale einer Ansichtsf läche hinterlegt sind. Dieser scheinbare Widerspruch ist leicht zu lösen.

Zunächst bewegt sich die planerische Vorstellung bei aller Freiheit nicht im luftleeren Raum, sondern innerhalb der technischen Möglichkeiten der Betonbauweise. Auch wenn diese vielfältig sind, kann durchaus ein sinnvoller Rahmen des Regelbaren abgesteckt werden. Des Weiteren neigt die Mehrheit der Architekten nicht zur Planung völlig neuartiger oder außergewöhnlicher Flächenmerkmale, sondern variiert innerhalb des geltenden Gestaltungstrends. Es macht also Sinn, bekannte und häufige Planungs- und Ausführungsanforderungen begrifflich zu vereinheitlichen und mit sachdienlichen Regelungen zu versehen. Der Anspruch des Merkblattes ist nicht der einer technischen Norm, die innerhalb ihres Geltungsbereiches einen geschlossenen Regelungshorizont abdeckt. Der Planende kann das Merkblatt in seinem Sinne nutzen und er kann problemlos erkennen, ob seine Vorstellungen mit den Vorgaben

des Merkblattes hinreichend beschrieben werden können, oder ob sie die Regelungstiefe des Merkblatts überfordern. Auch in diesem Falle kann es für den Planer dennoch sinnvoll sein, einzelne Begriffe und Regelungen des Merkblatts aufzugreifen. In der gegenwärtigen Baukultur wird der überwiegende Teil der planerischen Vorstellungen zur Gestaltung von Sichtbetonflächen mit den Regelungen des Merkblatts hinreichend zu beschreiben und auszuführen sein.

4 Begriffe

Die fachliche Kommunikation zwischen Bauherren, Planern und Ausführenden erfordert eine allgemein bekannte und anerkannte Fachsprache mit zentralen Schlüsselbegriffen. Die technischen Regelwerke zur Bautechnik unterstützen dies durch die Voranstellung von Begriffsdefinitionen.

Die Sichtbetonbauweise leidet aufgrund der weitgehenden Abwesenheit normativer Definitionen stark unter uneindeutigen Begriffsverwendungen und Mehrdeutigkeiten in vorvertraglichen und vertraglichen Festlegungen und schließlich im praktischen Baualltag. So ist die durchaus vorhandene normative Definition des Begriffs „Sichtbeton“ in DIN 18217 im Grunde trivial und weitreichend interpretierbar. Dies führt zu einer nahezu beliebigen Anwendung des Begriffs „Sichtbeton“ in bauvertraglichen Regelungen, die diesen von der Inhaltslosigkeit bis zur Bedeutungsüberfrachtung belasten und das Gemeinte nur selten hinreichend erklären. Das Merkblatt Sichtbeton erweitert und präzisiert die Definition des Begriffes „Sichtbeton“ durch Einführung und Definition zweier Grundkategorien:

- *Sichtbeton mit geringen Anforderungen* definiert Ansichtsflächen aus Beton, die den Beurteilungskriterien sowie den Planungs- und Ausführungsbedingungen der *Sichtbetonklasse SB1* entsprechen, und
- *Sichtbeton mit normalen oder besonderen Anforderungen* definiert Ansichtsflächen aus Beton gemäß den Beurteilungskriterien sowie den Planungs- und Ausführungsbedingungen der *Sichtbetonklassen SB2, SB3 und SB4*.

Dies ist keine triviale und beliebig einsetzbare Definition, denn anders als die äußerst inhaltsarme Begriffsbestimmung von DIN 18217 sind die o. g. Definitionen mit klaren und zum Teil messbaren technischen Kriterien hinterlegt, deren Nachweis im Zweifel gefordert und geführt werden kann und die eine deutliche sachliche Abgrenzung darstellen. Begrüßenswert ist vor allem, dass durch die Einführung dieser Kategorisierung nicht nur zwischen zwei Qualitätsbereichen differenziert wird, sondern der Sichtbeton insgesamt inhaltlich definiert und somit eine untere Beurteilungsgrenze eingezogen wurde: unterhalb der Kriterien der *Sichtbetonklasse SB1* gibt es nach den Regelungen des Merkblatts p. d. keinen Sichtbeton.

Durch Ersatz eliminiert und neu geregelt wurde auch der missverständliche und für die Betonbauweise im Grunde abwegige Begriff der „Musterfläche“. Zunächst

ist dieser Begriff zur vertragsgültigen Bezeichnung einer Sichtbetonfläche ungeeignet, da unter einer „Produktion nach Muster“ formalrechtlich die „Herstellung von Einheiten mit musteridentischer Beschaffenheit“ verstanden wird. Diese Definition ist zur Beschreibung und Beurteilung feinmechanischer Präzisionsprodukte sicherlich hilfreich, ihre verbindliche Anwendung auf die Herstellung von Betonbauteilen schließt sich jedoch aufgrund der großen herstellungstechnischen Toleranzbreiten in Material, Verfahren und Ergebnis von vornherein aus. Auch die vertragliche Motivation und Widmung einer Musterfläche geht aus dieser Bezeichnung nicht unmissverständlich hervor, da auch vertraglich irrelevante Versuchsbauteile, die aufgrund ungenügenden Oberflächenergebnisses verworfen wurden, üblicherweise als Musterflächen bezeichnet werden. Die eindeutige Definition der vertraglichen Wirksamkeit einer Probestfläche war dringend erforderlich. Im Merkblatt wird deshalb zwischen *Erprobungsflächen* und *Referenzflächen* unterschieden, wobei beide Flächentypen in ihrer Definition durchaus im baubetrieblichen Zusammenhang gesehen werden:

- *Erprobungsflächen* sind Flächen, an denen mit üblicherweise zwei unterschiedliche Motivationen Versuche vorgenommen werden:
 - Der Ausführende kann diese Versuche zur Optimierung seines technischen Vorgehens betreiben. Wenn er hierzu vertraglich weder aufgefordert noch verpflichtet ist, ist der entstehende Aufwand im Allgemeinen nicht vergütungsfähig. Dieser Aufwand kann jedoch minimiert werden, indem der Ausführende die Versuche mit Zustimmung des Bauherren an vertraglichen Bauteilen durchführt, an deren Oberflächen keinerlei Anforderungen gestellt sind (Keller-, Technikgeschosse etc.).
 - Ist die Herstellung von *Erprobungsflächen* zur detaillierten Abstimmung und Festlegung der vertraglichen Anforderungen an das Aussehen der Flächen im Bauvertrag gefordert, ist die Herstellung der Erprobungsflächen eine vertragliche Leistung und entsprechend zu vergüten. In diesem Falle sind Erprobungsflächen meist gesondert auf der Baustelle hergestellte Bauteile, die mit dem Vertragsbauwerk in keinem Nutzungszusammenhang stehen, abgesehen vom Anlass des Versuchs ohne Funktion sind und nach Abschluss der Sichtbetonarbeiten rückgebaut werden.
- *Referenzflächen* sind Ansichtsflächen, die das geforderte Aussehen als verbindliche vertragliche Referenz definieren. Sie sollen aus geeigneten Erprobungsflächen ausgewählt werden. Hierbei ist die Beschaffenheit der gesamten Fläche zu betrachten. Es können eine oder (besser!) mehrere Flächen zur vertraglichen Referenz erhoben werden. Referenzflächen beschreiben letztlich die vertragliche Leistung auf praktische Weise. Sie erlangen erst durch die einvernehmliche schriftliche Anerkennung ihrer O-

berflächenmerkmale durch beide Vertragspartner den Status einer vertraglich bindenden Leistungsbeschreibung und markieren fortan die geschuldete Bauleistung. Sie gelten als vertragliche Referenzbauteile für die vergleichende Beurteilung bei der Abnahme der vertraglichen Sichtbetonflächen im Bauwerk

Die detaillierte Festlegung der vertraglichen Anforderungen an das Aussehen von Ansichtsflächen durch die Herstellung von Erprobungs- und die anschließende Auswahl von Referenzflächen ist sicherlich ein einfaches und für Auftraggeber und Auftragnehmer transparentes Verfahren. Es befreit den Bauherren und den Planer von der schwierigen Aufgabe, das gewollte Aussehen der Flächen in Ausschreibung und Bauvertrag durch improvisierte textliche Einlassungen zu beschreiben und sich dennoch der Gefahr einer misslungenen Leistungsbeschreibung auszusetzen. Darüber hinaus wird die Vorstellung des Planers der praktischen Machbarkeit unterworfen, was spätestens bei der Beurteilung der Leistung vor Enttäuschungen und Überraschungen schützt. Um jedoch einen sinnfremden oder missbräuchlichen Umgang mit dem vertraglichen Mittel der Referenzfläche auszuschließen, formuliert das Merkblatt Sichtbeton hierzu einige Bedingungen:

- Die in den Leistungsbeschreibungen der Ausschreibung und des Bauvertrages aufgeführten Anforderungen an das Aussehen der Ansichtsflächen müssen an den ausgewählten Referenzflächen vorhanden sein und bilden die Grundlage ihrer Auswahl. Dies gilt zum Schutze des Ausführenden, der in die Situation geraten kann, dass durch glückliche Einflüsse Erprobungsflächen entstehen, deren Qualität und Beschaffenheit weit über den vertraglich geforderten liegen und nur mit unkalkuliertem Aufwand oder gar nicht sicher reproduzierbar sind. Die Beschaffenheit solcher Flächen darf nicht ohne Zustimmung des Auftragnehmers zur Referenzfläche und damit quasi „durch die Hintertür“ zur vertraglichen Forderung erhoben werden.
- Erprobungsflächen im Bauwerk, deren Betrachtungsabstände und Lichtverhältnisse über den Beurteilungszeitraum nicht konstant zu halten sind (Innenwände in engen oder fensterlosen Räumen, Kellerwände) oder solche, die sich nicht auf dem Baustellengelände oder in unmittelbarer Nähe dazu befinden, sind als vertragliche Referenz grundsätzlich auszuschließen.
- Flächen an bestehenden Bauwerken sind zur Verdeutlichung der planerischen Vorstellung im Zuge der Ausschreibung (Fotos, Ortsbesichtigungen) hervorragend geeignet. Solche Flächen dürfen jedoch nicht als vertragliche Referenzflächen vereinbart werden, da
 - durch ihre Benennung eine unzulässige Auswahl aus der Gesamtqualität des bestehenden Bauwerks vorgenommen wird,
 - Baustoffe und Verfahren der Herstellung im Allgemeinen nicht bekannt sind und durch den Ausführenden nicht nachvollzogen werden können und
 - die Einflüsse der eingetretenen Alterung der Flächen von unbekannter Wirkung auf deren Aussehen sind und im Zuge der Neuerstellung von Betonbauteilen nicht berücksichtigt werden können.

Das Merkblatt empfiehlt im Zusammenhang mit den in Tabelle 1 aufgeführten und erklärten *Sichtbetonklassen* die vertragliche Berücksichtigung von Erprobungsflächen bereits bei der Herstellung von Ansichtsflächen der *Sichtbetonklassen SB2* und *SB3*. Bei Forderung der *Sichtbetonklasse SB4* ist die Anordnung von Erprobungsflächen im vertraglichen Leistungsumfang vorgeschrieben.

Die Sichtbetonklassen

Die neuartige Struktur des Merkblatts Sichtbeton wird vor allem durch die Einführung so genannter *Sichtbetonklassen* (siehe Merkblatt Sichtbeton, Tabelle 1) charakterisiert.

Ähnlich wie die Expositionsclassen der neuen Betonnormen enthalten die Sichtbetonklassen eine ganze Reihe von Informationen zur Planung und zur Ausführung der durch die jeweilige Klasse repräsentierten Oberflächenmerkmale. Anders als bei den Expositionsclassen kann jedoch nicht davon ausgegangen werden, dass die jeweilige Oberflächenqualität durch Beachtung der aufgeführten Regelungen notwendigerweise erhalten wird. Hierdurch sind lediglich die nach derzeitigem Erkenntnisstand notwendigen Voraussetzungen zum Erreichen der geforderten Qualität erfüllt. Dies ist aber ohne entsprechende Arbeitssorgfalt oder Vorversuche nicht in jedem Falle hinreichend.

Durch die Wahl oder die Vorgabe einer *Sichtbetonklasse* wird keine feste Qualitätsvorgabe aufgestellt und abgearbeitet, sondern es werden Ausführungsbedingungen und Einzelkriterien zur Ergebnisbeurteilung formuliert. Die tatsächlich entstehende Fläche aber lebt vor allem vom Gesamteindruck, der sich durch die örtlichen Material- und Ausführungseinflüsse ergibt und mit den vertraglichen Vorgaben zu vergleichen ist. Es gilt also der Gesamteindruck immer vor den Einzelkriterien. Wenn eine Ansichtsfläche hinsichtlich ihres Gesamteindrucks abnahmefähig im Sinne des Vertrages ist, erfolgt keine Betrachtung einzelner Kriterien.

Das Merkblatt Sichtbeton formuliert in Tabelle 1 die vier *Sichtbetonklassen SB1 bis SB4*. Hierbei steigen die Qualitätsansprüche und der erforderliche Planungs- und Ausführungsaufwand mit der Ziffernfolge. In Tabelle 1 sind jeder *Sichtbetonklasse* Bauteilbeispiele, Beurteilungskriterien („Einzelkriterien“) und Ausführungshinweise zugeordnet. Die Einzelkriterien sind diskret über Abkürzungen klassifiziert, die in den Tabellen 2 und 4 näher erläutert werden. Weitere Regelungen zur Planung, Ausführung und Beurteilung von Ansichtsflächen sind im Text und in weitergehenden Tabellen enthalten.

Sichtbetonklassen und Bauteilbeispiele

Die Klassifizierung in vier *Sichtbetonklassen* beginnt mit der *Sichtbetonklasse SB1*. Sie formuliert damit die niedrigste Anforderungs- und „Qualitätsstufe“ und wird in der Tabelle 1 über „Betonflächen mit geringen gestalterischen Anforderungen“ und die Bauteilbeispiele „Kellerwände oder Bereiche mit vorwiegend gewerblicher Nutzung“ erklärt. Diese Flächenbeispiele charakterisieren Bauwerksbereiche im Hochbau, die üblicherweise im Mindeststandard und ohne gestalterische Absicht geplant und ausgeführt werden. Der übliche Betrachter betritt diese Bereiche vorwiegend kurzzeitig und in strenger Nutzungsabsicht, hat aber dennoch eine berechnete Mindestenerwartung an die gestalterische Beschaffenheit der ihn umgebenden Flächen. Die *Sichtbetonklasse SB1* dient in diesem Sinne dazu, die Leistung Sichtbeton qualitativ nach unten abzusichern: unterhalb der *Sichtbetonklasse SB1* ist Sichtbeton nicht definiert. Dies ist im Gegensatz zum bisherigen Umgang mit dem Begriff Sichtbeton ein echtes Novum und hat klare Auswirkungen auf undeutliche vertragliche Forderungen. So bedeutet diese Regelung u. a., dass mit der nicht weiter präzisierten vertraglichen Forderung „Sichtbeton“ im Weiteren lediglich die Mindestleistung, also die *Sichtbetonklasse SB1*, geschuldet wird. Mit dieser Regelung sollte sich zumindest ein regelmäßiger Streithintergrund zum Leistungsbereich „Sichtbeton“ für die Zukunft erledigt haben.

Die *Sichtbetonklasse SB2* bezeichnet „Betonflächen mit normalen gestalterischen Anforderungen“ und wird charakterisiert über die Bauteile „Treppenhausräume und Stützwände“. Diese Bauteilbeispiele bezeichnen Bereiche, in denen sich Publikum aus unterschiedlichsten Gründen bewegt. An diese Flächen ist somit zumindest die Forderung einer gewissen Unauffälligkeit und Gleichmäßigkeit zu stellen. Auch die *Sichtbetonklasse SB2* bezeichnet damit eine Mindestqualität ohne ausgeprägte Gestaltungsabsicht.

Die *Sichtbetonklasse SB3* beinhaltet Regelungen zu „Betonflächen mit hohen gestalterischen Anforderungen, z.B. Fassaden im Hochbau“. Mit dieser Klassifizierung sind Bauteilflächen gemeint, deren Aussehen mit einer Gestaltungsabsicht geplant wurde, die in Schwierigkeit, Aufwand und Ergebniserwartung jedoch nicht an der oberen Grenze des Machbaren rangiert. Der überwiegende Teil der derzeit mit der Forderung „Sichtbeton“ belegten Betonflächen kann dieser Klasse zugeordnet werden.

Die *Sichtbetonklasse SB4* bezeichnet „Betonflächen mit besonders hoher gestalterischer Bedeutung“. Als Bauteilbeispiele werden „repräsentative Bauteile im Hochbau“ genannt. Die Klasse *SB4* entspricht damit im Grundsatz der Intention der Klasse *SB3*, die jedoch mit einer besonders anspruchsvollen Gestaltungsaufgabe und einer hohen Erwartung der Übereinstimmung des Ergebnisses mit der gestalterischen Vorstellung einhergeht. *SB4* bezeichnet Bauaufgaben, die höchsten Aufwand in Planung und Ausführung erfordern.

Die *Sichtbetonklassen SB3* und *SB4* beschreiben und regeln Ansichtsflächen, an denen die erfolgreiche Realisierung des vertraglich geforderten Aussehens der Ansichtsflächen deutlich im Vordergrund steht und an denen die planerische Vorstellung möglichst genau erfüllt werden soll. Der konstruktive Charakter der Betonbauteile wird in vertraglichen Kontext gegenüber der gestalterischen Wirkung der Ansichtsflächen nachrangig. Dieses Prinzip gilt für beide Klassen, ist aber für die Klasse *SB4* graduell deutlich strenger anzusetzen als für die Klasse *SB3*.

Einzelkriterien

Den *Sichtbetonklassen* werden in Tabelle 1 *Einzelkriterien* zugeordnet, die durch Kurzbezeichnungen benannt sind. Die Abkürzungen werden durch Ziffern ergänzt, welche die graduelle Abstufung der hinterlegten Beschränkungen bezeichnen. Die Qualitätsanforderungen steigen mit der Ziffernfolge. Die jeweilig geltenden Beschränkungen sind, mit Ausnahme der Porigkeit, in Tabelle 2 für jedes Kriterium detailliert erklärt. Die Beschränkungen zur Porigkeit sind in Tabelle 4 dargestellt. Folgende Einzelkriterien werden formuliert:

- Die *Textur* der Betonoberfläche und ihre Ausbildung an *Elementstößen* sind durch die Kurzbezeichnungen *T1* bis *T3* klassifiziert. Beurteilt werden die Geschlossenheit der Betonoberfläche sowie Matrixverluste, Flächenversätze und Grate an Elementstößen.
- Die *Porigkeit* wird klassifiziert durch die Kurzbezeichnungen *P1* bis *P4*. Die Porigkeit ist jeweils beschränkt durch einen zulässigen Maximalwert der gesamten Porenfläche auf einer Prüffläche mit den Abmessungen von 500 mm x 500 mm (0,25 m²) und erfasst Porendurchmesser von 2 mm bis 15 mm. Die Ermittlung der Gesamtporenfläche durch manuelle Aufnahme mit anschließender rechnerischer Ermittlung ist mühselig, von eingeschränkter Genauigkeit und bedeutet einen unverhältnismäßigen Aufwand. Zur Bestimmung der Porigkeit werden jedoch in Kürze EDV-gestützte fotometrische Verfahren verfügbar sein, die mit vertretbarem Aufwand hinreichend genaue Ergebnisse liefern. Da die auftretenden Porigkeiten bei der Verwendung saugender Schalhäute naturgemäß geringer ausfallen als bei nicht saugenden Schalhäuten, werden den *Sichtbetonklassen SB2, SB3* und *SB4* in Tabelle 1 je nach Schalhauttyp (s=saugend/ns=nicht saugend) unterschiedliche Porigkeitsanforderungen zugeordnet.
- Die *Farbtongleichmäßigkeit* ist bestimmt durch die Kurzbezeichnungen *FT1* bis *FT3*. Die graduelle Abstufung der einzelnen Kurzbezeichnungen ist in Tabelle 2 verbal erklärt, da Farbtonabstufungen nicht arithmetisch klassifizierbar sind. Regelkriterien sind Farbtonabweichungen jeder Art und Ursache. Da saugende Schalhautsysteme auch hinsichtlich der *Farbtongleichmäßigkeit* deutlich gutartiger sind, wird in Tabelle 1 für die *Sichtbetonklasse SB4* bei Verwendung einer nicht saugenden Schalhaut die An-

forderung *FT3*, bei Verwendung einer saugenden Schalhaut hingegen die Anforderung *FT2* erhoben (die erste, derzeit umlaufende Ausgabe des Merkblatts Sichtbeton enthält an dieser Stelle eine fehlerhafte Verwechslung dieser beiden Kriterien).

- Die *Ebenheit* ist klassifiziert durch die Kurzbezeichnungen *E1* bis *E3*. In Tabelle 2 werden für jede Ebenheitsanforderung abgestufte Beschränkungen gemäß DIN 18202, Tabelle 3, formuliert.
- Anforderungen an die Ausbildung und das Aussehen der Betonoberfläche im Bereich von *Arbeits- und Schalhautfugen* werden durch die Kurzbezeichnungen *AF1* bis *AF4* beschrieben. Ähnlich wie bei den Schalelementstößen werden auch hier die Flächenversätze und sichtbaren Matrixverluste beschränkt.

Die Einzelkriterien und Ausführungsregeln der *Sichtbetonklasse SB4* sind trotz der hohen Anforderungen bewusst inhaltsflexibel ausgelegt. Die *Sichtbetonklasse SB4* ist damit eine „offene Klasse“ und erlaubt auch die Formulierung außergewöhnlicher Oberflächenbeschaffenheiten. Bereits durch die Einordnung der gestalterischen Anforderung in die *Sichtbetonklasse SB4* wird die hoch stehende Bedeutung des geforderten Aussehens der Flächen vermittelt. Die Beschreibung der Leistung ist bei der Planung außergewöhnlicher Oberflächenqualitäten bei Bedarf entsprechend zu ergänzen oder auf andere Art zu führen. Einzelkriterien, die mit der geforderten Oberflächenqualität unverträglich sind, können in diesem Falle seitens der Planung vertraglich ausgeschlossen oder weiter eingeschränkt werden. Dabei ist darauf zu achten, dass keine sinnlosen oder unausführbaren Anforderungen an die Oberflächenbeschaffenheit erhoben werden. Die Erläuterungen der Einzelkriterien zur *Sichtbetonklasse SB4* enthalten zum Teil bereits den Hinweis zur gesonderten detaillierten Beschreibung einzelner Anforderungen durch den Planer.

Schalhautklassen

Auch die Formulierung von *Schalhautklassen* in Tabelle 3 des Merkblatts Sichtbeton ist neu und national einzigartig. Art und Zustand der gewählten Schalhaut sind wichtige Voraussetzungen zum Erreichen der geforderten Sichtbetonqualität. In Tabelle 3 werden drei *Schalhautklassen* (*SHK1* bis *SHK3*) eingeführt und über eine Reihe praktischer Zustandskriterien erklärt und definiert. Durch die eindeutige Zuordnung einer *Schalhautklasse* zu einer *Sichtbetonklasse* in Tabelle 1 soll gewährleistet sein, dass die gewählte Schalhaut zur Herstellung der geforderten Oberflächenqualität geeignet ist. Die Zustandsprüfung liegt in der Pflicht des Ausführenden und ist vor jedem Einsatz eines Schalelementes durchzuführen. Die geforderte *Schalhautklasse* gilt als erfüllt, wenn die gesamte Schalhautfläche eines Schalelementes den in Tabelle 3 aufgeführten Zustandskriterien der jeweiligen Klasse entspricht. Aufgabe der Planung ist es, nach der Festlegung der *Sichtbetonklasse* die Zustandskriterien der zugeordneten *Schalhautklasse* daraufhin zu überprüfen, ob die erwartete Oberflächenbeschaffenheit

mit den aufgeführten Kriterien erreicht werden kann. Im begründeten Falle können die Zustandskriterien durch bauvertragliche Regelungen angepasst werden.

Die höchste *Schalhautklasse SHK 3* ist in Tabelle 1 der *Sichtbetonklasse SB4* zugeordnet. Im Sinne der Öffnung dieser *Sichtbetonklasse* für die Planung auch außergewöhnlicher Oberflächenbeschaffenheiten sind insbesondere die Zustandskriterien der *Schalhautklasse SHK3* überwiegend in Abstimmung mit dem Planer festzulegen.

5 Hinweise zu Planung und Vergabe

Obwohl die Herstellung von Ansichtsflächen aus Beton nahezu immer eine Bauaufgabe mit besonderen Fähigkeiten darstellt, sind nachlässig ausgearbeitete Ausschreibungen und Bauverträge für die Ausführenden oft eine zusätzliche, bisweilen gar die größere Erschwernis bei der Realisierung der Baumaßnahme. Aufgrund der angespannten wirtschaftlichen Situation der meisten Baubetriebe wird der Auftragszuschlag oft auch dann angenommen, wenn der Angebotspreis nach einer unklaren Leistungsbeschreibung ermittelt wurde und sich bereits bei der Vergabe deutliche Meinungsverschiedenheiten über das vertragliche Bausoll ankündigen. Da nachlässig erstellte, unklare und lückenhafte Bauverträge beiden Vertragspartnern die Chance signalisieren, die eigenen vertraglichen Pflichten durch Auseinandersetzung zu mindern, wächst die Motivation, wirtschaftlichen Vorteil durch Streit anstatt durch Leistung zu erreichen. Dies führt häufig in die letztlich für alle Beteiligten höchst unerfreuliche und nachteilige Situation fortwährender Auseinandersetzung und verhindert eine qualitätsvolle Ausführung. Baumaßnahmen, die technisch und vertraglich gut geplant sind, laufen i.d.R. reibungslos, in partnerschaftlicher Atmosphäre zwischen den Beteiligten und mit dem gemeinsamen Blick auf eine erfolgreiche und möglichst qualitätsvolle Ausführung. Dies gilt insbesondere bei Bauaufgaben, welche die Herstellung von Ansichtsflächen aus Beton beinhalten.

Da eine nachlässige Planung meist aus Unwissenheit und dem Mangel an „nachlesbaren“ Vorgaben und Hinweisen entsteht, wurden insbesondere die planungsrelevanten Einlassungen des Merkblatts Sichtbeton weitgehend neu gefasst und wesentlich erweitert. Die Einführung der Sichtbetonklassen soll die Planung der gewünschten Qualität erleichtern und trägt dieser Absicht Rechnung. Neben einem sehr vollständigen Überblick über die derzeit verfügbaren Schalungs- und Schalhautsysteme und der bei ihrem Einsatz zu erwartenden Oberflächenergebnisse erhält der Planer in Kapitel 5.2.2, *Gestaltungsmerkmale*, einen Überblick über die von ihm in der Leistungsbeschreibung aufzuführenden Mindestangaben. Dieses kurze Kapitel ist eine Checkliste zur Prüfung der Planungsunterlagen auf Kohärenz und Vollständigkeit. Es lehnt sich an die Regelungen von DIN 1045-1, Kapitel 4, an, in welchem die durch die Planung zu erarbeitenden und in der Leistungsbeschreibung anzugebenden technischen Details für Beton- und Stahlbetonbauteile normativ geregelt sind. Das Merkblatt Sichtbeton beschränkt sich in Kapi-

tel 5.2.2 allerdings auf die Angabe von Planungs- und Ausführungsdetails zur Herstellung von Sichtbetonflächen.

Bei der Anwendung der Regelungen von Kapitel 5.2.2 des Merkblatts Sichtbeton ist seitens der Planung zu beachten, dass alle Planungs- und Ausführungsdetails bereits in der Ausschreibung vollständig vorhanden sein müssen und nicht erst im späteren Bauvertrag. Enthält der Bauvertrag andere Leistungsanforderungen als der Angebotspreisermittlung zu Grunde lagen, entsteht ein unfairer Bauvertrag im sittenwidrigen Verfahren. Die aufwendigere Leistung im Bauvertrag kann durch den Ausführenden formalrechtlich auch nicht als geänderte Leistung geltend gemacht werden, da das vertragliche Bausoll zwar nicht der Angebotsgrundlage entspricht, in sich aber nicht geändert wurde. Die absolute Übereinstimmung zwischen der Leistungsbeschreibung der Ausschreibung und der des Bauvertrages ist unbedingt zu gewährleisten, es sei denn, bei der Vergabe wird über die geänderten Details verhandelt.

Als Leistungsbeschreibung in diesem Sinne sind neben den reinen Leistungspositionen auch die vertraglichen Ausführungsbedingungen zu betrachten, soweit diese Kosten und Aufwand verursachen. Zur Erleichterung der Baustellensteuerung und zur Sicherung der Qualität kann es bei der Vertragsgestaltung ratsam sein, die Weitervergabe von Vertragsarbeiten an Nachunternehmer zustimmungspflichtig zu machen bzw. auszuschließen oder Anforderungen an die quantitative und qualitative Personalausstattung des Ausführenden festzulegen. Auch solche Forderungen sind preisrelevant und bereits in den Ausschreibungsunterlagen aufzuführen.

Im Hinblick auf die in der Ausschreibung nur schwer zu erklärende gestalterische Vorstellung und Qualitätserwartung sollten die Angebotsunterlagen an die Bieter in einem Übergabegespräch ausgegeben werden. Hierzu ist es sicherlich erforderlich und auch aus anderen Gründen fair und günstig, die Reihe der zugelassenen Bieter auf eine sinnvolle und beherrschbare Anzahl zu beschränken. Das Übergabegespräch bietet eine Reihe von Vorteilen, die der Planer vor allem dann intensiv nutzen sollte, wenn auch die spätere Objektbauleitung in seinen Händen liegen soll:

- Die im Zuge des Gesprächs an den Bieter mündlich weitergegebenen Detailinformationen und Erläuterungen können in einem kurzen, von beiden Parteien unterzeichneten Protokoll dokumentiert werden und sichern die Information durch den Planer für spätere Streitfälle ab.
- Der Planer kann, so dies hilfreich oder erforderlich erscheint, zur Verdeutlichung der erwarteten Leistung auf Flächen an bestehenden Objekten verweisen und die Bieter zu einer geführten Besichtigung verpflichten.
- Der Planer kann sich einen persönlichen Eindruck von der Leistungsfähigkeit und dem Engagement des Bieters verschaffen. Referenzangaben des Bieters können geprüft und hinterfragt werden. Er-

schwernisse und das durch den Bieter geplante Vorgehen können vorab diskutiert werden.

6 Anforderungen an die Ausführung - Verantwortungsabgrenzung

Die in Kapitel 6 des Merkblatts Sichtbeton enthaltenen Einlassungen für die Ausführung von Ansichtsflächen aus Beton werden durch die Inhalte der Anhänge A-D ergänzt und vertieft. Vor allem die Tabellen A.1 bis A.6 in Anhang A enthalten detaillierte Ausführungsvorgaben zur Realisierung der durch die vertraglich vereinbarte Sichtbetonklasse geforderten Oberflächenmerkmale. Die Ausführungsvorgaben können den im Sichtbetonbau erfahrenen Baubetrieben ebenso als Arbeitshilfe dienen wie solchen Unternehmen, die sich bisher weniger intensiv mit der Herstellung von Ansichtsflächen aus Beton beschäftigt haben. Obwohl die Neufassung des Merkblatts gegenüber der alten Version die Ausführenden durch wesentlich umfangreichere und detaillierte Regelungen unterstützt und bindet, sind einzelne zentrale Beschränkungen der vorherigen Ausgabe aufgehoben bzw. zurückgenommen worden. Vor allem die Vorgaben zur Betonzusammensetzung waren vor dem Hintergrund der Entwicklung der Betontechnik in den letzten Jahren nicht mehr haltbar. Mit Blick auf die technologischen Veränderungen durch den Einfluss der zeitgemäßen Betonzusatzmittel und auf Erkenntnisse der laufenden Forschung mussten nahezu alle Vorgaben und Forderungen zur Betonzusammensetzung und Konsistenz aufgehoben oder in Empfehlungen umgewandelt werden.

Im Sinne des neuen Merkblatts Sichtbeton ist es mehr den je Pflicht und Freiheit des Ausführenden, die zur erfolgreichen Herstellung der vertraglichen Sichtbetonqualität erforderliche Betonzusammensetzung aus der Vielzahl der Möglichkeiten zu wählen. Damit entspricht das Merkblatt auch den Regelungen der VOB C, ATV DIN 18331, *Betonarbeiten, Ausgabe 1/2005*, wonach es ausdrücklich die Aufgabe des Ausführenden ist, die zum Erreichen der vertraglichen Leistung erforderlichen Bauverfahren und Betonzusammensetzungen zu wählen. Seitens der Planung werden gerade Bauverträge zur Herstellung von Sichtbeton häufig mit Forderungen zur Betonzusammensetzung oder zum Einbauverfahren versehen, die im Allgemeinen im guten Glauben und mit besten Absichten dort platziert werden. Diese Regelungen sind jedoch überwiegend obsolet, überbestimmt oder fachlich abwegig und behindern bei strenger Beachtung ein fachgerechtes praktisches Vorgehen des Ausführenden. Derartige Bauverträge widersprechen auch der u. a. durch die DIN 18331 geregelten Abgrenzung der Verantwortung von Planung und Ausführung. Aufgabe der Planung ist es, das Ziel der Baumaßnahme bzw. Bauleistung in allen Details möglichst eindeutig zu beschreiben (VOB A § 9), also vor allem das Aussehen von Ansichtsflächen aus Beton. Der Ausführende hat die vertragliche Pflicht und die Sachkunde, die technischen Wege zur Erreichung des geplanten Ziels zu wählen und die planerische Vorstellung gemäß den vertraglichen Vereinbarungen zu realisieren.

7 Beurteilung

Die Einführung von Sichtbetonklassen, die in Tabelle 1 vor allem über zugeordnete Einzelkriterien definiert sind, lenkt den Blick und die Aufmerksamkeit bei der Beurteilung der Leistung naturgemäß auf die Frage nach der Erfüllung dieser Einzelkriterien. Die vorrangige Beurteilung der Einzelkriterien ist jedoch nicht im Sinne der Bauweise und widerspricht der Absicht des Merkblatts Sichtbeton. Der alleinige Blick auf die Einzelkriterien kann dazu führen, dass Sichtbetonflächen, die aufgrund eines gelungenen Gesamteindrucks den Vorstellungen des Planers entsprechen, dennoch wegen des Verfehlens einzelner Klassenkriterien abzulehnen sind. Die Definition des Gesamteindrucks einer Ansichtsfläche kann nicht sinnvoll über die Summe erfüllter Einzelkriterien geführt werden. Für den Planer ist gerade der Gesamteindruck einer Fläche zentrales Kriterium und die einzige Möglichkeit, die erstellte Leistung mit seiner Vorstellung zu vergleichen. Nur die Beurteilung aus diesem Vergleich heraus ist letztlich sinnvoll. Entspricht der Gesamteindruck der planerischen Vorstellung, ist die Leistung anzunehmen und die Prüfung der Einzelkriterien entfällt. Erst wenn der Gesamteindruck einer Fläche die vertraglich fixierte Vorstellung des Planers verfehlt, werden zur weiteren Beurteilung die Einzelkriterien der Sichtbetonklasse herangezogen.

Verfehlt der Gesamteindruck der Ansichtsfläche eines Bauteils die vertraglich geforderten Leistungsmerkmale und damit die gewünschte Qualität, ist es dringende Aufgabe von Planung und Ausführung, anhand der Beurteilung der Einzelkriterien eine Analyse der Abweichung vorzunehmen, um ein erneutes Auftreten im fortlaufenden Bauprozess durch geeignete Maßnahmen zu verhindern. Auch die graduelle Beurteilung von Abweichungen und deren Umsetzung in vertragliche Konsequenzen können einfach und nachvollziehbar über die Beurteilung der Einzelkriterien geführt werden, welche die Abweichung ausmachen.

Zur Beurteilung des Gesamteindrucks sind der Betrachtungsabstand und das Alter der beurteilten Flächen von maßgeblicher Bedeutung. Das günstigste Alter zur Beurteilung einer Ansichtsfläche aus Beton kann nicht angegeben werden. Aus diesem Grunde enthält das Merkblatt auch keine entsprechenden Regelungen. Jedoch sollte bei erkannten Abweichungen wie Farbungleichheiten, dunkel-hell-Fleckigkeit und ähnlichen Phänomenen in jungem Alter des Betons die Beurtei-

lung der Fläche auf einen späteren Zeitpunkt verschoben werden. In diesem Falle ist es günstig, darauf zu achten, dass die Fläche bei der endgültigen Beurteilung möglichst trocken ist. Einige Abweichungen „heilen“ sehr langsam und treten erst nach Jahren in den Hintergrund oder verschwinden ganz. Die Veränderung von Abweichungen über einen längeren Zeitraum sicher zu prognostizieren, ist jedoch nicht möglich. Deshalb kann es die Risikobereitschaft des Planers erheblich fordern, sich bei Abweichungen mit starker Störwirkung auf die heilsame Wirkung der Zeit zu verlassen. Im Allgemeinen geschieht dies, wenn die Abweichungen nicht nachbesserbar sind und aufgrund vorhandener Erfahrungen eine gute Prognose möglich ist, oder wenn der Rück- und Neubau des Bauteils einen unverhältnismäßigen Aufwand bedeuten würden. Bei Poren, Ausblutungen und Abweichungen der Ebenheit ist keine Nachheilung zu erwarten.

Im Gegensatz zum Zeitpunkt ist der Betrachtungsabstand zur Beurteilung des Gesamteindrucks einer Ansichtsfläche im Merkblatt Sichtbeton recht genau geregelt. Zur Beurteilung einer Sichtbetonoberfläche nimmt der unvoreingenommene Betrachter bei üblichen Flächengrößen im Hochbau unbewußt einen Abstand von etwa 1–3 m ein. Diese Distanz ist für Normalsehende bei mittleren Lichtverhältnissen ein optimaler Kompromiss, um das Bauteil in Detail und Fläche möglichst gut zu erfassen. Der Betrachtungsabstand zur Beurteilung des Gesamteindrucks im Sinne der planerischen Vorstellung bestimmt sich jedoch nach völlig anderen Kriterien. Aus diesem Grunde differenziert das Merkblatt Sichtbeton zwischen der Betrachtung von Bauwerk und Bauteil, da der Kontext von Gesamt- und Einzelwirkung üblicherweise auch der Planungsidee zu Grunde liegt. Der angemessene Betrachtungsabstand des Bauwerks ist der Abstand, der erlaubt, das Bauwerk in seinen wesentlichen Teilen zu erfassen. Er wird also, je nachdem von welchem Standpunkt aus das Bauwerk betrachtet wird, variieren. Einzelne Bauteile sind aus dem Abstand zu beurteilen, der im Zuge der geplanten Nutzung üblicherweise vom Betrachter eingenommen wird. Diese Regelung kann vor allen an Flächen, vor denen sich ausgedehnte Publikumsbereiche befinden (Hallen, Plätze) zu unterschiedlichen Auffassungen über den Betrachtungsabstand führen. In diesem Falle sollten die Beteiligten die Beurteilung aus mehr als einem Abstand vornehmen.

Untersuchungen zu Farberscheinungen an Sichtbetonflächen

Peter Schießl und Doris Strehlein

Zusammenfassung

Insbesondere bei Betonoberflächen, die in Ortbetonbauweise mit glatter, nicht saugender Schalung hergestellt worden sind, treten immer wieder unerwünschte Farberscheinungen, wie Schwarzverfärbungen, Wolkenbildungen oder Marmorierungen auf. Ziel der Untersuchungen am cbm ist die Aufklärung der Ursachen dieser, mit dem heutigen Wissensstand nicht zielsicher vermeidbaren, optischen Beeinträchtigungen. Mit Hilfe ausgewählter Untersuchungsmethoden können in der Baupraxis aufgetretene Farberscheinungen den charakteristischen Kenngrößen Oberflächentextur, Oberflächenstruktur und Mineralbestand zugeordnet werden. Es zeigte sich, dass sich die Bereiche mit dunkler und heller Färbung signifikant in ihrer Oberflächentextur und Oberflächenstruktur unterscheiden. Bei den Phänomenen Dunkelverfärbung an Schalungsstößen und Schwarzverfärbung neben einem Riss konnte zusätzlich eine deutlich veränderte Mineralogie an der Sichtbetonoberfläche festgestellt werden.

1 Allgemeines

Sichtbeton erfreut sich in der architektonischen Gestaltung von Gebäuden einer neuen Beliebtheit. Der in der Schalung beliebig formbare künstliche Stein ist in besonderem Maße geeignet, gleichermaßen konstruktive und gestalterische Aufgaben zu erfüllen. Dabei ist die baupraktische Realisierung des vorgegebenen optischen Erscheinungsbildes der Betonoberfläche ganz entscheidend für das Erreichen der gestalterischen Ziele des entwerfenden Architekten oder Ingenieurs.

Beispiele in jüngerer Zeit (Pinakothek der Moderne München, Regierungsviertel Berlin, Neues Museum für Kunst und Design Nürnberg) belegen die Forderung insbesondere für repräsentative Bauwerke nach glatten, porenfreien, farblich einheitlichen Sichtbetonoberflächen, die in gelungener Ausführung positive Beachtung finden.



Abb. 1: Sichtbetonbauwerk jüngerer Zeit: Audimax der TU München

Trotz fachgerechter Planung und Ausführung können die Forderungen an eine einwandfreie Sichtbeton-

oberfläche mit dem jetzigen Wissensstand im Bereich der Betontechnologie, der Schalungs- und Ausführungstechnik nicht immer zielsicher erfüllt werden [1, 2]. Misslungene Sichtbetonoberflächen fügen dem Ansehen und der Akzeptanz der Betonbauweise erheblichen Schaden zu und stellen für die bauausführenden Firmen, aber auch für die Transportbeton- und Fertigteilindustrie, ein erhebliches wirtschaftliches Risiko dar.

Der Erfolg im Hinblick auf das Erreichen vorgegebener Betonoberflächenqualitäten ist während der Herstellung (dem Betoniervorgang) weder überprüfbar noch steuerbar. Erst nach dem Erhärten des Betons und nach dem Entschalen kann die erreichte Qualität bewertet werden. Aber auch während des anschließenden Abtrocknens der Oberfläche und des Austrocknens des Betons stellen sich häufig noch erhebliche, bislang nicht zielsicher vorhersagbare und steuerbare Veränderungen im Erscheinungsbild der Betonoberflächen ein.

Bei der Beurteilung von Sichtbetonflächen zeigen sich immer wieder optische Beeinträchtigungen, die nicht systematisch auftreten und daher umso stärker das Gesamtbild negativ beeinflussen:

- Wolkenbildungen und Marmorierungen
- Fleckenhafte Verfärbungen
- Farbunterschiede zwischen aufeinander folgenden Schüttilagen
- Farbunterschiede zwischen verschiedenen Betonierabschnitten
- Stark unterschiedliche Porenhäufung
- Optisch sich abzeichnende Bewehrung
- Ausblutungen an Schalbrett- und Schalelementstößen sowie an Ankerlöchern
- Schleppwassereffekte unterschiedlichen Ausmaßes
- Kantenabbrüche bei der Ausführung scharfer Kanten

Solche nicht gewollten, aber zielsicher nicht vermeidbaren Abweichungen treten vor allem bei glatten Betonoberflächen auf, die in Ortbetonbauweise mit glatter, nicht saugender Schalung hergestellt werden. Die Ursachen der dargestellten Probleme müssen sowohl im makroskopischen als auch im mikroskopischen Bereich gesucht werden.

2 Aktuelle Forschung „Sichtbeton“

2.1 Forschungsverbund Sichtbeton

Die Zusammenhänge und maßgebenden Einflüsse, die das optische Erscheinungsbild von Betonoberflächen bestimmen, sind äußerst komplex und bislang kaum wissenschaftlich erforscht [3, 4]. Der Erfolg einer gelungenen Sichtbetonoberfläche hängt mehr von den persönlichen empirischen Erfahrungen der jeweiligen Bausausführenden bzw. von der mit dem Betonentwurf oder mit der Betreuung betrauten Fachleute ab als von gesicherten Erkenntnissen.

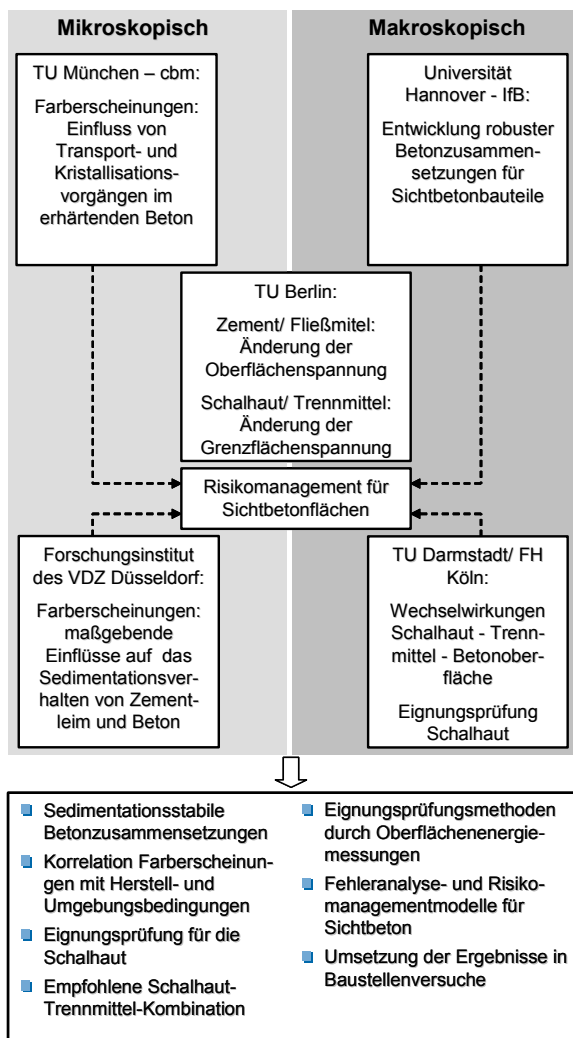


Abb. 2: Übersicht über die beteiligten Forschungsstellen, -schwerpunkte und Forschungsziele des Forschungsverbunds „Sichtbeton“

In einem koordinierten Forschungsvorhaben, an dem insgesamt fünf Forschungsstellen (TU München, Forschungsinstitut des VDZ Düsseldorf, TU Berlin, TU Darmstadt/ FH Köln, Universität Hannover) beteiligt sind und das im Rahmen der Forschungsförderung BMWi über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ (AiF) gefördert wird, werden die komplexen Zusammenhänge aufgeklärt und auf der Basis der gewonnenen Erkenntnisse schließlich wirksame Steuerungsmaßnahmen abgeleitet (Abb. 2).

2.2 Forschungsziel und Lösungsweg am Centrum Baustoffe und Materialprüfung (cbm) der TU München

2.2.1 Forschungsziel

Ziel der Untersuchungen am cbm ist die Aufklärung der Ursachen für das Auftreten flächiger Verfärbungen und Wolkenbildungen an Sichtbetonoberflächen. Dabei wird der Einfluss der Betonoberflächenstruktur bzw. -textur auf die Farberscheinungen an Sichtbetonoberflächen sowie der Einfluss der Umgebungsbedingungen und der daraus resultierenden Transport- und Kristallisationsmechanismen untersucht.

Um die Ziele dieses Forschungsvorhabens zu erreichen, wurden zwei Arbeitspakete formuliert. Das Arbeitspaket 1 umfasst die Charakterisierung von typischen Farberscheinungen anhand der Kenngrößen Oberflächenstruktur, Oberflächentextur und Mineralbestand. Im Arbeitspaket 2 werden vom VDZ Düsseldorf und der Universität Hannover entwickelte stabile Betone unter Praxisbedingungen untersucht. Letztlich soll eine Korrelation von Farberscheinungen mit Transport- und Kristallisationsvorgängen im Beton hergestellt werden.

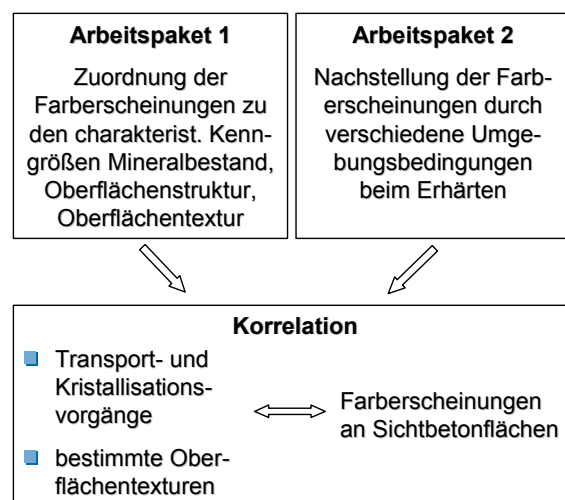


Abb. 3: Struktur des Forschungsvorhabens am cbm

2.2.2 Arbeitspaket 1

Im ersten Arbeitspaket wird ein Zusammenhang zwischen Farberscheinungen und charakteristischen Kenngrößen von Sichtbetonoberflächen (Mineralbestand, Oberflächenstruktur, Oberflächentextur) her-

gestellt. In die Untersuchungen werden Oberflächen aus bestehenden Sichtbetonbauwerken mit typischen Farberscheinungen (sehr gleichmäßige Oberfläche, ungleichmäßige Oberfläche etc.) einbezogen.

Abb. 4 gibt einen Überblick über den im Arbeitspaket 1 geplanten Untersuchungsumfang.

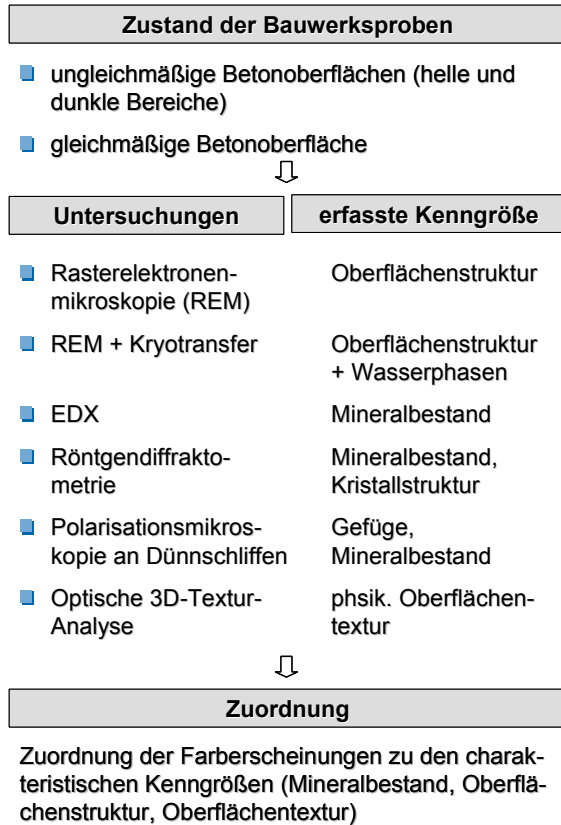


Abb. 4: Übersicht des Untersuchungsprogramms im Arbeitspaket 1

Probenentnahme:

Aus ausgeführten Sichtbetonbauwerken, an denen Hell-Dunkel-Verfärbungen aufgetreten sind, werden Proben entnommen. Dabei werden sowohl Proben ohne auffällige Farberscheinungen (aus Bereichen mit einer sehr gleichmäßigen Farbe an der Sichtbetonoberfläche) sowie Proben mit einer hellen bzw. dunklen Färbung (aus Bereichen mit auffälligen Farbunterschieden an der Sichtbetonoberfläche) berücksichtigt.

Raster-Elektronen-Mikroskopie:

Neben der herkömmlichen Raster-Elektronen-Mikroskopie, inklusive Energiedispersiver Röntgenanalyse (EDX), werden REM-Untersuchungen an Proben, die gegenüber Veränderungen ihrer Umgebungsbedingungen empfindlich reagieren könnten (z.B. Proben mit hohen Feuchte- und Salzgehalten bzw. Proben mit leicht veränderlichen, eventuell in Lösung befindlichen Salzen), unter Einsatz der Kryotransfer-Methode durchgeführt. Durch den Einsatz von flüssigem Stickstoff werden ausgewählte Sichtbeton-Bauwerksproben innerhalb weniger Millise-

kunden schockgefroren. Durch den Kryoschock wird ein Augenblickszustand eingefroren, d.h. sämtliche Probenbestandteile, einschließlich Feuchtigkeit, Salze bzw. Salzlösung, werden in ihrer Form und Lage fixiert, ohne dass die Entstehung von Eiskristallen möglich wird. Auf diese Weise werden mit Hilfe der Kryotransfer-Methode auch Wasser- und Salzlösungen an der Oberfläche und im Porenraum abgebildet.

Röntgendiffraktometrie:

Im Röntgendiffraktometer wird eine Probe unter sich stetig änderndem Winkel bestrahlt. Die am Probenpulver reflektierte Röntgenstrahlung wird über einen Detektor registriert und zusammen mit dem zugehörigen Winkel gespeichert. Jedes Kristall hat ein charakteristisches Spektrum von Interferenzen ("Peaks"). Dieses Spektrum ist gleichsam der Fingerabdruck eines Kristalls und kann zu dessen Identifizierung herangezogen werden.

Polarisationsmikroskopie an Dünnschliffen:

Mit Hilfe der Polarisationsmikroskopie an senkrecht zur Oberfläche ausgeführten Dünnschliffen von Sichtbetonproben aus bestehenden Bauwerken werden sowohl Untersuchungen zum strukturellen Gefüge (oberflächennahe Porosität, Risse etc.), als auch Untersuchungen zum Mineralbestand durchgeführt.

Optische 3D-Textur-Analyse:

An ausgewählten Bauwerksproben wird die Oberflächentextur der Sichtbetonflächen mit Hilfe eines 3D-Texturscanners physikalisch beschrieben. Bei diesem Verfahren wird ein 3D-Oberflächen-Scanner eingesetzt, der die Oberfläche der Sichtbetonprobe mit fokussiertem Weißlicht beleuchtet und lateral mit einer Auflösung von ca. 2 µm und vertikal mit einer Auflösung von 3 nm aufnimmt. Eine passive Optik mit großer chromatischer Aberration fächert das Licht vertikal in Fokuspunkte verschiedener Farbe und somit Höhe auf. Ein Miniaturspektrometer detektiert die Farbe des reflektierten Lichtes und ermittelt anhand einer Kalibrationstabelle die Lage des Fokuspunktes und somit die Position der Probenoberfläche. Durch die überhöhte Darstellung des gemessenen 3D-Profiles können sowohl lokale Fehlstellen als auch gleichmäßige Texturen an den Sichtbeton-Bauwerksproben deutlich visualisiert werden.

2.2.3 Arbeitspaket 2

Im Arbeitspaket 2 werden die im Arbeitspaket 1 festgestellten Zusammenhänge im Labor verifiziert. Die Eignung der vom VDZ Düsseldorf und der Universität Hannover entwickelten stabilen Betone wird unter Einsatz der von der Forschungsstelle der Universität Hannover eigens für dieses Forschungsvorhaben entwickelten Prüfschalung getestet.

Die Oberflächen der Sichtbetonproben werden während der Erhärtung unterschiedlichen Umgebungsbedingungen ausgesetzt (Simulation unterschiedlicher relativer Luftfeuchten, Sonneneinstrahlung

lungen und Temperaturen sowie veränderliche Windstärken, Niederschlag). Dabei werden Umgebungsbedingungen nachgestellt, die aus der Erfahrung zu starker Wolkenbildung (Herbst- und Wintermonate) und zu gleichmäßigen Oberflächen (Sommermonate) führen. Proben mit vorhandenen Farberscheinungen werden unter Verwendung der beschriebenen Verfahren (REM, Lichtmikroskopie an Dünnschliffen, Röntgendiffraktometrie, optische 3D-Textur-Analyse) untersucht.

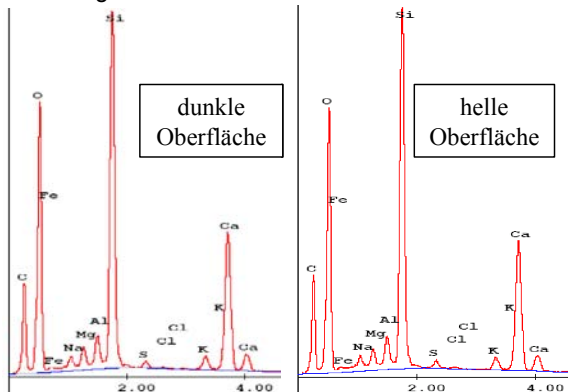
Die Ergebnisse aus Arbeitspaket 2 und deren Verifikation im Labor sollen letztlich dazu führen, die Transport- und Kristallisationsvorgänge im Beton sowie bestimmte Oberflächentexturen den entsprechenden Farberscheinungen an Sichtbetonoberflächen zuordnen zu können.

2.3 Erste Ergebnisse

2.3.1 Einfluss der Oberflächentextur auf die Farbwirkung

Untersuchungen am cbm zeigten, dass ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Beton-Oberflächentextur und der Farberscheinung des Betons besteht.

Erste Untersuchungen wurden an der Oberfläche eines Feinkornbetons durchgeführt, der sich grundsätzlich durch eine sehr gleichmäßige Oberfläche auszeichnet. Bei der Herstellung des Probekörpers wurden zwei verschiedene Schalungsoberflächen (handelsüblicher Klebfilm und PTFE Folie) verwendet, mit denen erfahrungsgemäß sehr glatte Oberflächen hergestellt werden können.



Element	Wt %	Mol %	Element	Wt %	Mol %
Na2O	1.85	1.81	Na2O	2.03	1.99
MgO	2.98	4.48	MgO	2.79	4.21
Al2O3	4.30	2.55	Al2O3	4.36	2.60
SiO2	54.98	55.41	SiO2	55.89	56.52
SO3	1.66	1.26	SO3	1.92	1.45
Cl2O	0.16	0.11	Cl2O	0.27	0.19
K2O	2.23	1.43	K2O	2.13	1.38
CaO	29.80	32.18	CaO	28.48	30.86
Fe2O3	2.03	0.77	Fe2O3	2.13	0.81
Total	100.00	100.00	Total	100.00	100.00

Abb. 5: mittels Energiedispersiver-Röntgenanalytik (EDX) ermittelte mineralogische Zusammensetzung der untersuchten Betonoberfläche (links: dunkler Bereich, rechts: heller Bereich)

Der Bereich des Probekörpers, bei dem als Schalungsoberflächen der Klebfilm verwendet wurde,

erschien im Vergleich zu dem Bereich, bei dem die PTFE-Folie verwendet wurde, deutlich dunkler (Abb. 7).

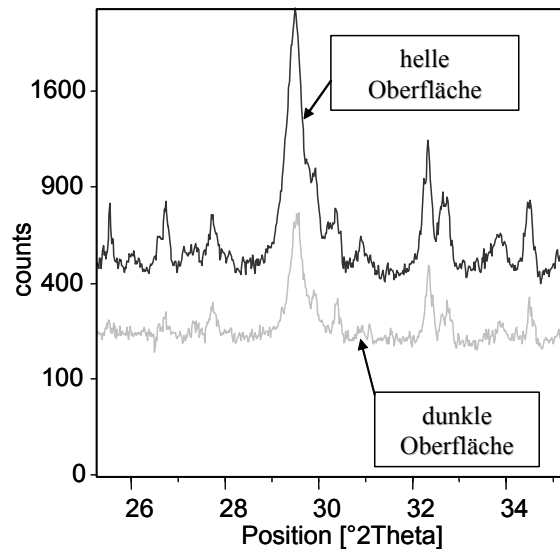


Abb. 6: mittels Röntgendiffraktometrie ermitteltes Spektrum der untersuchten Betonoberfläche (heller und dunkler Bereich)

Bei einer Untersuchungen der Oberfläche mit Hilfe des Röntgendiffraktometers und Energiedispersiven Röntgenanalytik konnte kein Unterschied in der mineralogischen Zusammensetzung beider Bereiche festgestellt werden (Abb. 5 und Abb. 6).

Durch eine geschlosseneren und ebenere Oberfläche des Betons im dunklen Bereich konnten im Röntgendiffraktometer zwar die Impulse in diesem Bereich nur in einer geringeren Intensität detektiert werden als im hellen Bereich, die Interferenzen („Peaks“), deren Lage im Diagramm für die Identifizierung eines Kristalls ausschlaggebend ist, sind jedoch für beide Bereiche identisch.

Da aufgrund dieser Ergebnisse ausgeschlossen werden kann, dass eine unterschiedliche mineralogische Zusammensetzung der Betonoberfläche die Ursache für die Farbunterschiede der untersuchten Betonoberfläche darstellt, wurde der Einfluss der Oberflächentextur auf die Farbwirkung mit Hilfe des 3D-Oberflächenscanners untersucht.

Dabei zeigte sich, dass sich die unterschiedlichen Farberscheinungen auch in einer in beiden Bereichen signifikant voneinander abweichenden Oberflächentextur widerspiegeln.

Der dunkel wirkende Bereich wies eine im Vergleich zum hell wirkenden Bereich deutlich ebenere Oberfläche (geringere Rauigkeit) auf (Abb. 7). Ähnliche Effekte lassen sich auch in der Natur beobachten: Während feinkristalliner Schnee weiß ist, wird ein Eisblock dunkel wahrgenommen; Wasser mit glatter Oberfläche erscheint dunkel, während das Wasser eines Wasserfalls, zu unzähligen Tröpfchen aufgewirbelt, weiß erscheint.

In weiteren Untersuchungen werden Bauwerksproben aus bestehenden Sichtbetonbauwerken mit auffälligen Hell-Dunkel-Verfärbungen entnommen

und der Zusammenhang zwischen Farberscheinungen und Oberflächentextur systematisch untersucht.

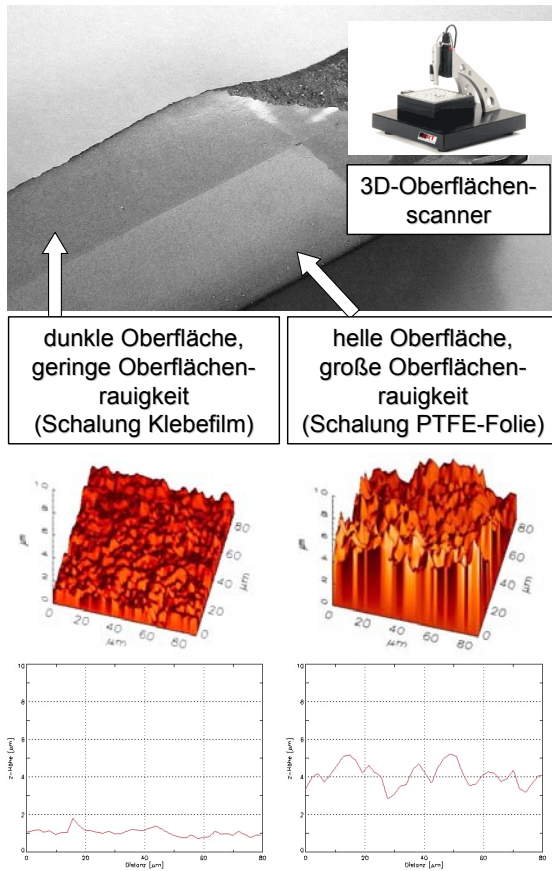


Abb. 7: Farbwirkung und Oberflächentextur unterschiedlich geschalteter Bereiche eines Probekörpers aus Beton

2.3.2 Hell-Dunkel-Verfärbungen an Schalungsstößen

Auch Transportvorgänge aus dem Betoninneren können die Oberflächenstruktur bzw. -textur des Betons entscheidend beeinflussen.

An einem Schalungsstoß eines Sichtbetonbauwerks (Bauwerk 1) wurden 1 bis 2 cm breite Dunkelverfärbungen beobachtet (Abb. 8, oben). Mit Hilfe von REM-Untersuchungen konnten im Bereich dunkler Färbung lasurartige Ablagerungen an der Betonoberfläche festgestellt werden (Abb. 8, links unten).

Der Mineralbestand an der Oberfläche der beiden Bereiche wurde mit Hilfe der Energiedispersiven Röntgenanalytik (EDX) bestimmt (Abb. 9). Dabei wurde ein Bereich von ca. 350 mal 500 µm abgerastert und die Häufigkeit des Auftretens einzelner Elemente in den jeweiligen Bereichen ermittelt. Während im hellen Bereich die Elemente Silicium, Magnesium und Aluminium häufiger auftraten als im dunklen Bereich, konnte im dunklen Bereich mehr Calcium als im hellen Bereich detektiert werden.

Da mit Hilfe der EDX nur einzelne Elemente erfasst werden können, wurden zusätzlich die kristallinen

Bestandteile der Oberfläche jeweils einer Probe aus dem dunklen und dem hellen Bereich mit Hilfe der Röntgendiffraktometrie bestimmt.

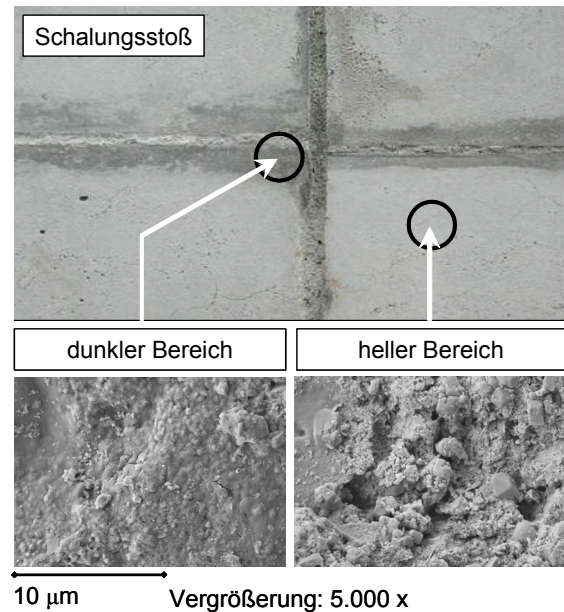


Abb. 8: ausgeprägte Dunkelverfärbungen an einem Schalungsstoß (Bauwerk 1) und Raster-Elektronen-Mikroskop-Aufnahmen des hellen bzw. dunklen Bereichs

Dabei konnten die Ergebnisse aus der EDX-Analyse verifiziert werden. Während sich auf der Oberfläche des dunklen Bereichs mehr kristallines Calcit ($\text{Ca}(\text{CO}_3)$) bildete, trat auf der hellen Oberfläche deutlich mehr kristallines Quarz (SiO_2) auf (Abb. 10).

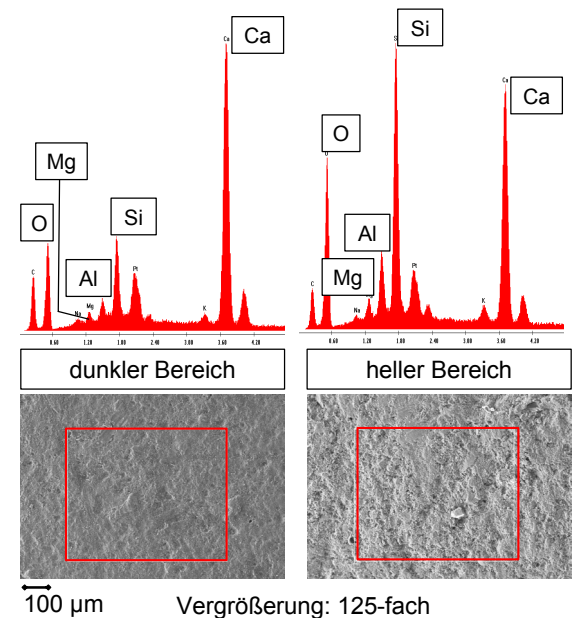


Abb. 9: EDX-Analyse des dunklen (links) bzw. hellen (rechts) Bereichs am Schalungsstoß einer Sichtbetonoberfläche (Bauwerk 1)

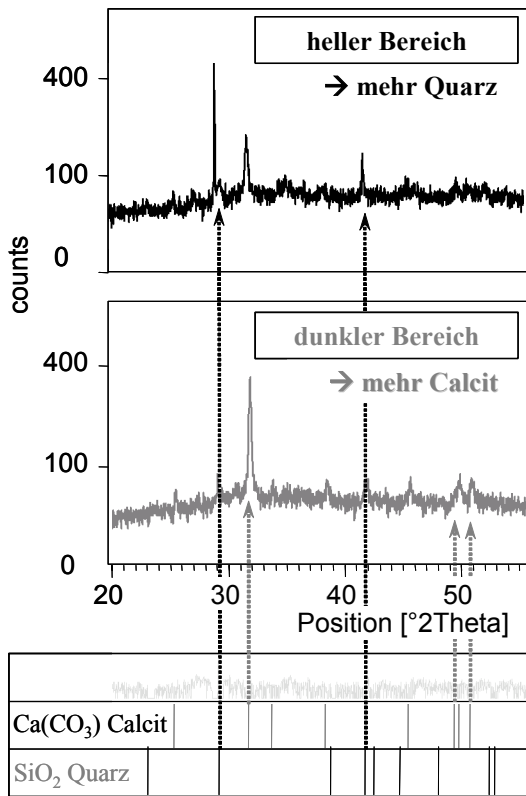


Abb. 10: Röntgendiffraktometrie-Spektren des untersuchten Schalungsstoßes (Bauwerk 1, heller und dunkler Bereich) und Auswertung der Spektren nach den Kristallen Quarz und Calcit

Die Ergebnisse und beobachteten Effekte konnten anhand von Untersuchungen an einem weiteren Bauteil aus Sichtbeton (Bauwerk 2) validiert werden, Da die untersuchten Sichtbeton-Proben sowohl eine andere Betonzusammensetzung (Zementart, w/z-Wert, Art und Menge des Zusatzstoffs) als auch ein deutlich jüngeres Betonalter (3 Tage) als die zuvor untersuchten Proben (Betonalter 4 Jahre) aufwiesen, unterschieden sich die Oberflächenstrukturen der beiden untersuchten Sichtbetonflächen signifikant voneinander (vgl. Abb. 8 und Abb. 11). Die Phänomene, die an der jeweiligen Betonoberfläche dunkler Farbwirkung beobachtet wurden waren jedoch identisch (deutlich ebenere Oberflächenstruktur und teilweise lasurartige Ablagerungen an der Oberfläche). Weitere Untersuchungen bestätigten auch die Ergebnisse der EDX-Analyse und der Röntgendiffraktometrie.

Da sich sowohl die Oberflächenstruktur als auch die Mineralogie der Oberfläche in den Bereichen heller bzw. dunkler Färbung deutlich voneinander unterscheiden, ist in weiteren Versuchen zu klären, welcher Aspekt für die Farbgebung der Sichtbetonoberfläche beim Auftreten des Phänomens „Dunkelverfärbung an Schalungsstoßen“ bestimmend ist. Die Ergebnisse lassen jedoch darauf schließen, dass ein kausaler Zusammenhang zwischen den charakteristischen Kenngrößen Mineralbestand und Oberflä-

chenstruktur existiert: ein veränderter Mineralbestand an der Sichtbetonoberfläche (z.B. durch Transportvorgänge im erhärtenden Beton) ruft eine unterschiedliche Oberflächenstruktur hervor, welche wiederum die Farbwirkung des Betons bestimmt.

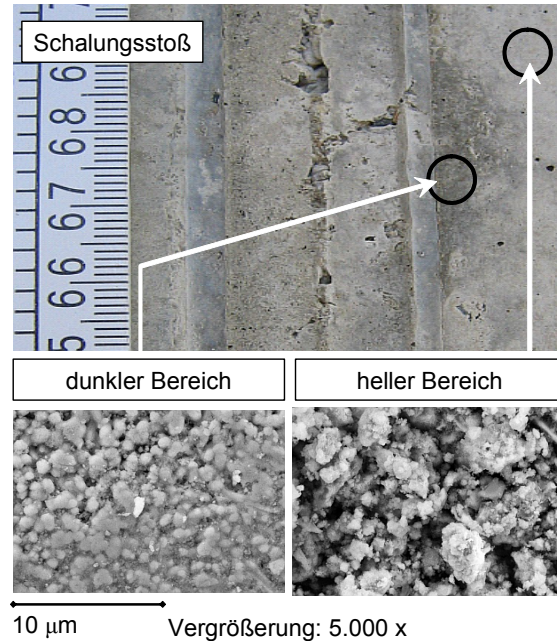


Abb. 11: ausgeprägte Dunkelverfärbungen an einem Schalungsstoß (Bauwerk 2) und Raster-Elektronen-Mikroskop-Aufnahmen des hellen bzw. dunklen Bereichs

2.3.3 Marmorierungseffekte und Wolkenbildungen

So genannte Marmorierungseffekte oder Wolkenbildungen sind bislang weder von den Ursachen noch von den Mechanismen, welche die Hell- oder Dunkeltöne bewirken, zu erklären. Bekannt ist jedoch, dass die Bildung von unerwünschten dunklen Flecken bevorzugt nach der Betonherstellung bei kalter und nasser Witterung auftreten.

Die bisher am cbm durchgeführten Untersuchungen ergaben, dass sich auch bei diesem Phänomen die Oberflächenstrukturen bzw. – texturen der hellen und dunklen Bereiche deutlich voneinander unterscheiden.

Mittels Raster-Elektronen-Mikroskopie konnte im dunklen Bereich eine im Vergleich zum hellen Bereich deutlich geschlosseneren Oberflächenstruktur beobachtet werden (Abb. 12), auf der sich stellenweise kristalline Formen gebildet hatten, die mit Hilfe von EDX-Punkt-Analysen als Strukturen calcitischen Ursprungs identifiziert werden konnten. Dies lässt auf eine Ausblühung von Calciumcarbonat auf der Betonoberfläche schließen.

Bei einer EDX-Flächenanalyse über einen Bereich von 1 mal 1 mm konnten zwischen beiden Bereiche keine signifikanten Unterschiede in der mineralogischen Zusammensetzung festgestellt werden (Abb. 13).

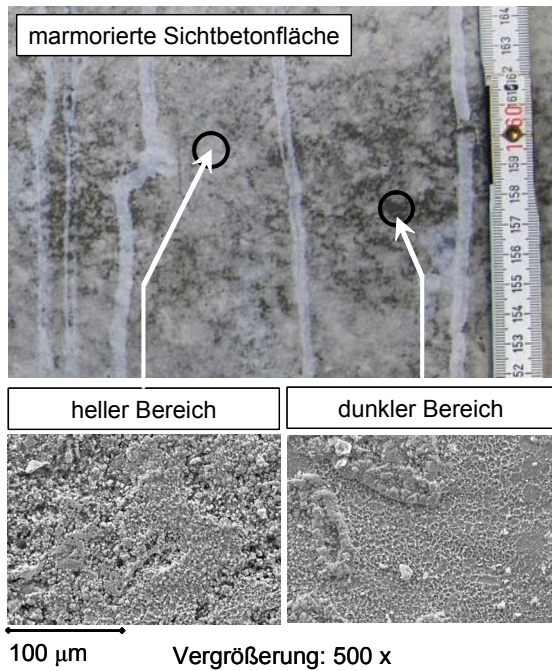


Abb. 12: stark marmorierte Sichtbetonfläche und Raster-Elektronen-Mikroskop-Aufnahmen der Bereiche heller bzw. dunkler Färbung

Bereits im Vorfeld der REM Untersuchungen wurden Messungen des Höhenprofils mit Hilfe des 3D-Oberflächenscanners an Proben aus Bereichen mit heller bzw. dunkler Färbung durchgeführt. Mit Hilfe dieser Untersuchungsmethode kann zusätzlich eine qualitative Aussage über das Höhenprofil der Probe getroffen werden. Aufgrund des sehr kleinen Bildausschnitts war es messtechnisch nicht möglich, exakt den gleichen Bereich der Probe zu untersuchen, der später für die Untersuchungen im Raster-Elektronen-Mikroskop präpariert wurde.

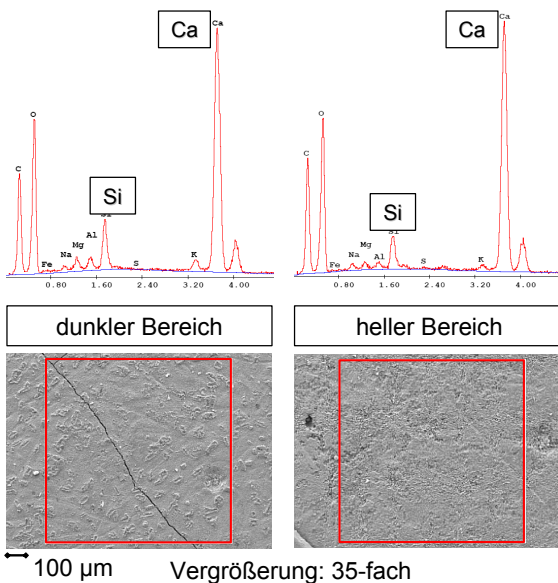


Abb. 13: EDX-Analyse des dunklen (links) bzw. hellen (rechts) Bereichs einer stark marmorierten Sichtbetonfläche

Der optische Eindruck der REM-Aufnahmen konnte anhand der Messungen der Oberflächentextur bzw. des Höhenprofils validiert werden. In Abb. 14 wird deutlich, dass auch unter Verwendung der 3D-Textur-Analyse die in REM-Aufnahmen sichtbaren Oberflächenstrukturen abgebildet wurden. Es zeigte sich, dass der hellere Bereich ein im Vergleich zum dunkleren Bereich deutlich unebeneres Höhenprofil aufweist. Zwar sind die absoluten Höhenunterschiede der hellen Probe kleiner, die erhabenen bzw. flachen Flächenanteile der dunklen Probe sind jedoch in sich ebener und somit die Oberfläche des dunklen Bereichs in sich geschlossener.

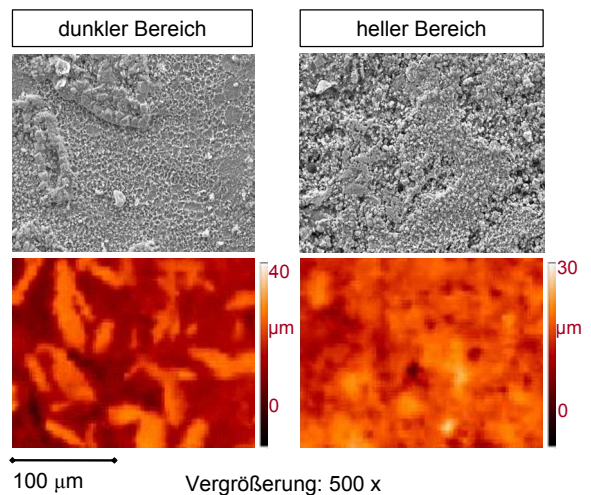


Abb. 14: REM-Aufnahmen (oben) bzw. quantitative Höhenprofile (unten) eines dunklen (links) bzw. hellen (rechts) Bereichs

In weiteren Untersuchungen werden Bohrkern aus Sichtbetonbauwerken, bei denen das Phänomen Marmorierungen bzw. Wolkenbildungen aufgetreten sind, entnommen und hinsichtlich ihrer Oberflächenstruktur, ihres Mineralbestandes und ihrer Oberflächentextur untersucht.

2.3.4 Schwarzverfärbungen

An Schleuderbetonmasten mit sehr glatter Oberfläche traten neben schmalen Rissen 1 bis 2 cm breite Dunkelverfärbungen (Rissbreite in der Regel < 0,1 mm) auf.

Im Raster-Elektronen-Mikroskop wurden im Bereich dunkler Färbung Ablagerungen auf der Betonoberfläche beobachtet, die wiederum zu einer im Vergleich zur Oberfläche heller Färbung deutlich ebeneren Oberflächenstruktur führten (Abb. 15). Mit Hilfe der EDX konnten die lasurartigen Ablagerungen eindeutig als Schicht aus gelösten Zementbestandteilen (Calcium, Natrium, Kalium) identifiziert werden.

Weitere Untersuchungen zeigten, dass infolge starker Dampfdruckunterschiede zwischen Innen und Außen Wasserfilme aus den Rissen austraten, die an der Betonoberfläche abtrockneten und die beobachteten Ablagerungen hinterließen.

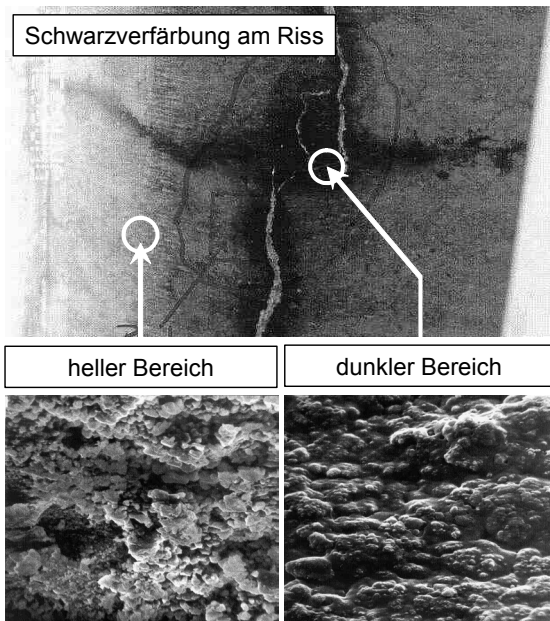


Abb. 15: Schwarzverfärbung der Betonoberfläche an einem Riss und Raster-Elektronen-Mikroskop-Aufnahmen der Bereiche heller bzw. dunkler Färbung

2.4 Ausblick

Aus der Baupraxis ist bekannt, dass die Bildung von unerwünschten dunklen Farberscheinungen an Betonoberflächen bevorzugt nach der Betonherstellung bei kalter und nasser Witterung auftreten.

Erste Laborversuche ergaben, dass bereits die Lagerung von identisch hergestellten Probekörpern bei unterschiedlichen Temperaturen (20 °C bzw. 4 °C) einen Farbunterschied auf der Betonoberfläche unmittelbar nach dem Ausschalen hervorruft (Abb. 16, Betonalter 24 h).

In weiteren Laborversuchen werden die Oberflächen von Sichtbetonproben während der Erhärtung unterschiedlichen Umgebungsbedingungen ausgesetzt (Simulation unterschiedlicher relativer Luftfeuchten, Sonneneinstrahlungen und Temperaturen sowie veränderliche Windstärken, Niederschlag), um letztlich eine Korrelation zwischen den Farbabweichungen und den Umgebungsbedingungen bzw. den daraus resultierenden Transport- und Kristallisationsmechanismen herzustellen.

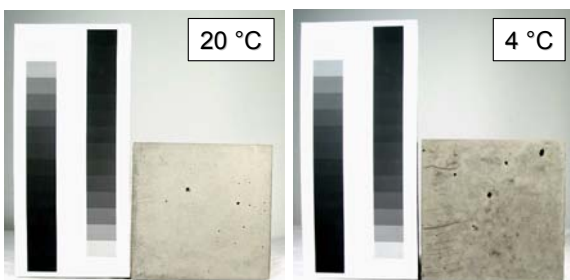


Abb. 16: identisch hergestellte Probekörper unmittelbar nach dem Ausschalen (Betonalter 24 h), Lagerung bei 20 °C (links) bzw. bei 4 °C (rechts)

3 Literatur

- [1] Schmidt-Morsbach, J. (1987) Beton Mängelfibel: Erscheinungsbild, gutachtl. Einstufung, Mängelbeseitigung, Vorbeugung. Bauverlag, Wiesbaden, Berlin
- [2] Merkblatt Sichtbeton, Fassung August 2004, Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V. und Bundesverband der Deutschen Zementindustrie e.V., Eigenverlag
- [3] Schießl, P, Plannerer, M (2000) Forschungs- und Normungsbedarf bei Sichtbeton. Vorträge zur DBV-Arbeitstagung am 19. September 2000 in München, DBV-Heft Nr. 1: Sichtbeton, Berlin, S. 38-40
- [4] Lohaus, L., Anders, A. (2002) Forschungsbedarf bei Sichtbeton. Vorträge zur DBV-Arbeitstagung am 13. März 2002 in Duisburg, DBV-Heft Nr. 5: Sichtbeton 2, Berlin, S. 35-38

Sichtbeton – Betonzusammensetzung, Einbau, Qualitätssicherung

Ludger Lohaus und Karen Fischer

Zusammenfassung

Sichtbeton erfordert ein hohes Maß an Qualitätsbewusstsein im Hinblick auf Ausgangsstoffe, Schalungstechnik, Planung und Bauausführung. Generell sind die Rahmenbedingungen für Sichtbeton schwieriger geworden und die Anforderungen gestiegen. Die moderne Architektur erfordert filigrane Formen mit nicht saugender Schalung, engliegender Bewehrung und kompliziert zu betonierenden Geometrien. Hierzu sind Betonzusammensetzungen erforderlich, die eine hohe Fließfähigkeit aufweisen. Um die zielsichere Anwendbarkeit von Sichtbeton zu ermöglichen, ist darüber hinaus eine Sichtbetonzusammensetzung erforderlich, die robust ist gegenüber Schwankungen der Ausgangsstoffe. Erfahrungen aus der Praxis zeigen z. T. gute, z. T. weniger gute Resultate bei der Verwendung von selbstverdichtendem Beton als Sichtbeton, dessen Robustheit noch stark eingeschränkt ist. Ggf. könnten nach Steigerung der Robustheit des SVB zielsicher Sichtflächen zufrieden stellender Qualität erzeugt werden. Die am Institut für Baustoffe der Universität Hannover entwickelten Prüfschalungen schaffen definierte Randbedingungen, die für Forschungszwecke und auch für den Einsatz auf der Baustelle zur Verfügung stehen. Sie unterstützen die für die jeweiligen Ausgangsstoffe notwendigen Rezepturanpassungen im Labor und ergänzen die Herstellung von Erprobungsflächen mit bauteilgetreuen Abmessungen. Die Anwendung der Prüfschalungen ermöglicht die Optimierung des Sichtbetonsystems aus Schalungshaut, Trennmittel und Frischbeton und die Erzeugung von objektspezifischen Referenzflächen.

1 Einführung

Sichtbeton, in seiner derzeit häufig ausgeführten Form, stellt hohe Anforderungen an die Planung, Arbeitsvorbereitung und Bauausführung. Durch die Entwicklungen in der Architektur werden zusätzlich zu den Anforderungen an das Aussehen z. T. sehr schlanke, geschwungene Bauteile und stark bewehrte verlangt, die aus Sicht der Betontechnologie durch Betone mit weichen bis fließfähigen Konsistenzen und angepasstem Größtkorn zu realisieren sind. Dies widerspricht den Erfahrungen der bisherigen Sichtbetonbauweise, für die steife bis plastische Konsistenzen verwendet werden.

Weiterhin hängt die Qualität der Sichtflächen von den Wechselwirkungen zwischen Betonrandzone, Trennmittel und Schalung sowie den Einflüssen der einzelnen Materialien ab. Der Einfluss des Saugverhaltens der Schalung z. B. ist seit langem bekannt. Im Gegensatz zu der herkömmlichen saugenden Sichtbetonschalung begünstigen nicht die heutzutage häufig gewählten saugenden Materialien Unregelmäßigkeiten der Grautönung an der Betonoberfläche.

Für die Sichtbetonbauweise gilt es also, trotz schwieriger und ungünstiger Randbedingungen, eine bessere Qualität der Betonoberfläche mit gesteigerter Zuverlässigkeit bei gleichzeitig gestiegenem Kosten- und Termindruck sicher zu erreichen. Hierbei sollen uns moderne betontechnologische Entwicklungen eine Unterstützung bieten. Darüber hinaus

werden neue Prüfmethode benötigt, um die Sichtbetoneigenschaften eines Betons im Voraus beurteilen zu können.

2 Sichtbeton: Stand der Kenntnis

Die Qualität einer Sichtfläche stellt sich in der Regelmäßigkeit des Farbtons, der Textur, der Porigkeit sowie der Homogenität der Betonoberfläche dar. Ihre Beurteilung hängt vom individuellen Empfinden des Betrachters sowie dem räumlichen Abstand, den herrschenden Licht- und Witterungsverhältnissen ab.

In den vorhandenen normativen Regelungen zur Betonbauweise werden nur wenige Hinweise zu speziellen Anforderungen bei Sichtbeton gegeben. Eine ausführliche Darstellung der normativen Regelungen sowie erweiterte Empfehlungen für Sichtbeton wurden von Kling und Peck [2] veröffentlicht. Weiterführende Empfehlungen sind bereits vor einigen Jahren im Merkblatt Sichtbeton erschienen. In seiner neu überarbeiteten Fassung bietet das Merkblatt Empfehlungen zu Planung, Ausschreibung, Ausführung und Beurteilung von Sichtbeton [1]. Es werden Anforderungen für unterschiedliche Sichtbetonklassen angegeben.

Bei der Konzeption der Betonzusammensetzung sind neben den Anforderungen an Dauerhaftigkeit und Tragfähigkeit ebenso die Bauteilgeometrie, der Bewehrungsgrad und das Einbauverfahren zu berücksichtigen. Letztere Faktoren beeinflussen insbesondere die Wahl der Frischbetonkonsistenz sowie des Größtkorns. Der Mehlkorngelbalt ist ausreichend

hoch zu wählen, um Sedimentation und Wasserabsondern des Betons zu vermeiden. Eine weitere Maßnahme zur Verminderung der Entmischungsneigung ist ein reduzierter Wassergehalt, wodurch für die Einstellung der Konsistenz verflüssigende Betonzusatzmittel erforderlich werden. Das Merkblatt Sichtbeton empfiehlt $w/z \leq 0,55$, wobei die Konsistenz nach Möglichkeit im Übergangsbereich zwischen plastischer und weicher Konsistenz bei einer Toleranz bei Übergabe von ± 2 cm gewählt werden sollte. Die Verarbeitbarkeit ist durch einen ausreichenden Anteil an Bindemittelleim im Beton zu gewährleisten.

Infolge von Schwankungen der Mengen und der Qualität der Ausgangsstoffe treten immer wieder Ungleichmäßigkeiten in der Farbe und ggf. der Textur des Sichtbetons auf. Insbesondere Schwankungen im Wassergehalt können Farbunterschiede auf der Betonoberfläche auslösen. Weiterhin sollte auf den Einsatz von Restwasser und Restbeton vollständig verzichtet werden.

Über normgerechte Betonzusammensetzungen hinaus steht seit der Entwicklung des selbstverdichtenden Betons (SVB) ein Hochleistungsbeton zur Verfügung, der sich fließend in der Schalung verteilt, ausnivelliert und selbst entlüftet. Da die Verdichtung entfällt, sind Entmischungerscheinungen aufgrund eingetragener Rüttelenergie ausgeschlossen. Selbstverdichtender Beton wurde bereits mit Erfolg als Sichtbeton in der Praxis eingesetzt. Es ist jedoch bekannt, dass SVB empfindlich gegenüber Schwankungen in den Eigenschaften und Mengen der Ausgangsstoffe sowie gegenüber Temperaturschwankungen reagiert [3].

Hinsichtlich der Betontechnologie unterscheidet sich SVB insbesondere im erhöhten Mehlkorngelalt sowie durch ein anderes Entwurfskonzept von normgemäßem Rüttelbeton [4]. Die bisher noch nicht bauaufsichtlich eingeführte SVB-Richtlinie [5] enthält jedoch keine Angaben zu zusätzlichen Anforderungen bei der Herstellung von sichtbar bleibenden Betonflächen mit SVB.

Der Transportbeton sollte in möglichst gleichen Zeitspannen vom Werk auf der Baustelle eintreffen. Für den Fall einer längeren Verweildauer ist eine Alternative für die Anschlussbetonage einzuplanen, damit keine zeitlichen Verzögerungen eintreten und ein Betonierablauf „frisch auf frisch“ gewährleistet ist [1].

Das Einbauverfahren und die Konsistenz des Frischbetons sind aufeinander abzustimmen, so dass das Zusammenhaltevermögen des Betons durch Fördern, Einbauen und Verdichten nicht beeinträchtigt wird. Das Einbauverfahren als solches wirkt sich stark auf das Entmischungsrisiko und den Gehalt an Luftporen im Beton aus. Der Beton ist möglichst unter geringem zusätzlichem Eintrag von Luftporen derart in die Schalung einzubringen, dass eine maximale Schütthöhe von 50 cm nicht überschritten wird. Bei hohen Bauteilen ist die freie Fallhöhe auf

1 m zu beschränken, z. B. durch den Einsatz von Schüttröhren. Bei weicheren Konsistenzen kann das Schüttrohr knapp unter die Oberfläche des bereits eingebrachten Betons getaucht werden, um einen freien Fall des Betons zu vermeiden [6]. Um die Steiggeschwindigkeit abzumindern, kann das Rohr zusätzlich schräg gestellt werden.

Trotz der bekannten Empfehlungen ist die gewünschte Qualität der Betonsichtfläche nicht zuverlässig zu erreichen, welches sich durch immer wieder in der Praxis auftretende Probleme zeigt. Derartige Qualitätsprobleme äußern sich beispielsweise durch

- das Auslaufen von Bindemittelleim aus lückenhafter Schalung
- Marmorierungen (vgl. Abb. 1)
- Wasserläufer
- deutliche Abweichungen im Farbton
- sich abzeichnende Schüttaglagen
- Poren an der Oberfläche
- Braunverfärbungen der Oberfläche



Abb. 1: Marmorierungen

Hinsichtlich der Qualitätssicherung empfiehlt das Merkblatt Sichtbeton die Koordination zwischen allen am Bau Beteiligten während der gesamten Planungs- und Bauausführungsphase. Innerhalb eines „Sichtbetonteams“ können so Zuständigkeiten und Verantwortungsbereiche für alle Arbeitsphasen klar festgelegt werden. Zudem werden in Abhängigkeit der im Merkblatt angegebenen Sichtbetonklassen Anforderungen an die Schalung, Porosität, Farbtongleichmäßigkeit, Ebenheit, Arbeits- und Schalungsfugen sowie Erprobungsflächen gestellt. Diese Merkmale können vor- oder während des Bauablaufs

kontrolliert werden, so dass man auf Qualitätsabweichungen reagieren kann. Durch die Herstellung von Erprobungsflächen unter Berücksichtigung der am Bauwerk herrschenden Bedingungen (Bauteilgeometrie, Bewehrungsgrad, Betondeckung, Schalungssystem, Trennmittel, Betonzusammensetzung) kann ein gewisser Teil der Qualitätssicherung vor Baubeginn erfolgen. Dieses Vorgehen setzt jedoch eine vertragliche Regelung über die Qualitätsanforderungen an den Sichtbeton voraus, in der die Auswahl von Referenzflächen festgelegt werden kann. Diese Referenzflächen sollten vor Beginn der Bauausführung aus den Erprobungsflächen verbindlich ausgewählt werden.

3 Untersuchungsmöglichkeiten für Sichtbeton

3.1 Allgemeines

Die Möglichkeiten, die Oberflächenqualität eines Sichtbetons vor der Herstellung des Bauteils zu prognostizieren, sind begrenzt, da die nötigen Mittel für eine zuverlässige Aussage fehlen. Ein geeignetes Prüfverfahren, um das „Sichtbeton-System“ aus Schalung, Trennmittel und Betonzusammensetzung vorab im Labor zielsicher aufeinander abzustimmen, liegt bisher nicht vor. Untersuchungen im Labor wurden z. B. mit dem so genannten Glaskasten durchgeführt, mit dessen Hilfe die Auswirkungen verschiedener Trennmittel und Betonzusammensetzungen auf die Betonqualität unter den idealisierten Randbedingungen zu beurteilen ist [7]. Zudem sind derzeit keine Verfahren vorhanden, die sich für Annahmeproofung eines Sichtbetons auf der Baustelle vor dem Einbau in die Schalung bewährt haben.

Unabdingbar für den Praxiseinsatz ist die Herstellung von Probeflächen unter Baustellenbedingungen. Dies schließt folgende Parameter ein:

- Arbeitsvorbereitung (Schalungsbau, Bewehren, Personalzusammensetzung)
- geplante Betonzusammensetzung
- Transport
- Einbauverfahren
- Einbaumannschaft
- Verdichtungsverfahren
- Nachbehandlung

Zusätzlich hat die Probebetonage zur gleichen Jahreszeit wie die Bauteilherstellung zu erfolgen, um Witterungseinflüsse gering zu halten. Dies ist allerdings nur eingeschränkt möglich, da z. B. Regen und Temperaturschwankungen nicht zuverlässig vorhersehbar sind.

3.2 Prüfschalungen des IfB

Aufgrund der oben genannten Situation wurden am Institut für Baustoffe innerhalb eines vom Deutschen Beton- und Bautechnik-Verein e. V. (DBV) geförderten Forschungsvorhabens zwei Prüfschalungen entwickelt. Insbesondere für weitere Forschungen

führen diese Prüfschalungen mit ihrer definierten Geometrie zu vergleichbaren Bedingungen. Die so genannte „Stützenschalung“ (vgl. Abb. 2) und die „Wandschalung“ (vgl. Abb. 3) unterscheiden sich im Wesentlichen in ihren Abmessungen. Mit der Stützenschalung werden Proben der Abmessungen 20 cm x 20 cm x 60 cm, mit der Wandschalung Proben von 60 cm x 20 cm x 150 cm hergestellt.

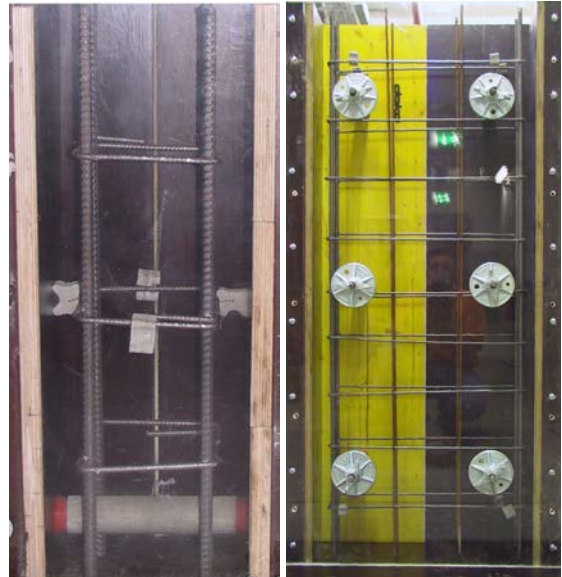


Abb. 2: Prüfschalungen des Instituts für Baustoffe (links: Stützen-, rechts: Wandschalung)

Die Prüfschalungen ermöglichen die Untersuchung der Einflüsse verschiedener Betonzusammensetzungen, Schalungsmaterialien, Trennmittel, Einbauteile, Bewehrungsgrade, Fugenabdichtungen, Verdichtungsintensitäten sowie das Verhalten an Stör- und Fehlstellen in der Schalung.

Die Prüfschalungen können an drei Seiten mit gleichem oder unterschiedlichem Schalungsmaterial und Trennmittel ausgestattet werden. Die Vorderseite der Schalung besteht aus einer durchsichtigen Kunststoffscheibe. Hierdurch ist die Beobachtung des gesamten Betonier- und Verdichtungsablaufs möglich. In die Rückseite ist eine Fugenabdichtung integriert. Für eine Seitenfläche ist die Untersuchung der Auswirkungen von austretendem Bindemittelleim aus Einschnitten in der Schalung vorgesehen. Die andere Seitenfläche wird zur Simulation horizontaler Schalungsfugen herangezogen. Der Einsatz von Bewehrungskörben bei beiden Prüfschalungen verbessert eine möglichst praxisgetreue Nachahmung der Betoniersituation. Durch Abstandhalter erhalten die Probekörper eine definierte Betondeckung. Ein weiterer ästhetisch wichtiger Faktor ist die Grautönung des Betons an Ankerknoten. Deshalb werden die Prüfschalungen mit Ankern versehen, wobei die Wandschalung eine symmetrische Anordnung mehrerer Anker ermöglicht.

Während die Stützenschalung aufgrund ihrer Größe für den Laboreinsatz besser geeignet ist,

weist die Wandschalung größere Sichtflächen und somit bessere Beurteilungsmöglichkeiten auf.

3.3 Betonzusammensetzung

Die im Merkblatt Sichtbeton empfohlene plastische bis weiche Frischbetonkonsistenz hat sich in der Sichtbetonbauweise bewährt. Dennoch ist im Hinblick auf ausgefallene Bauteilgeometrien ggf. eine weiche oder fließfähige Konsistenz erforderlich. Diese Anforderungen können z. B. mit selbstverdichtendem Beton (SVB) erfüllt werden, der selbst geschwungene und verwinkelte Schalungsformen ausfüllen kann. Die Oberfläche ist im Idealfall porenarm und zeigt wenig Verfärbungen. Wird Kalksteinmehl als Füller zugesetzt, ist die Farbe des Betons zudem relativ hell. Da selbstverdichtender Beton sensibel auf Schwankungen der Mengen der Ausgangsstoffe sowie auf Witterungsbedingungen reagiert, sind Schwierigkeiten bezüglich der Gleichmäßigkeit des Sichtbetons zu erwarten. SVB ist nicht uneingeschränkt als idealer Sichtbeton einzusetzen (vgl. Abb. 3-5). Weiterhin ist bei der Auswahl der Rezeptur zu berücksichtigen, dass die Porigkeit der Oberfläche von der Viskosität der Betonzusammensetzung abhängt.



Abb.: 3: Wand in SVB mit lokalen Problemstellen



Abb. 4: Science Center Wolfsburg: Sichtbeton mit SVB



Abb.: 5: Wand in SVB mit relativ homogener Optik

Innerhalb der am Institut für Baustoffe durchgeführten Versuche konnte eine helle, farblich gleichmäßige Betonoberfläche mit der gewählten SVB-Rezeptur (vgl. Tab. 1) erzielt werden. Gleichzeitig traten jedoch auch Fehlstellen in den Bereichen der Abstandhalter auf. Die dort entstandenen Lunker sind auf eine nicht ausreichende Umfließung der Abstandhalter zurückzuführen. Weitere Versuche an den für Laborbedingungen bereits recht großformatigen Proben aus der Wandschalung sollten Aufschluss geben über das Verhalten des Betons bei Betonierpausen zwischen den Schüttilagen. Der eingesetzte SVB zeigte einen Trennstrich am Übergang zwischen den Einbaulagen. Auf der Oberfläche des eingefüllten Betons bildete sich eine Haut aus, die einen trennscharfen Farbunterschied auf der Betonoberfläche hinterließ (vgl. Abb. 6).

Dennoch sahen die SVB-Probekörper deutlich besser aus als die meisten übrigen bislang erstellten Laborproben. Eine erkennbar problematische Betonrezeptur aus Rüttelbeton mit geringem Mehlkorngelalt entgegen den im Merkblatt Sichtbeton [1] enthaltenen Empfehlungen ist für den Probekörper in Abb. 7 verwendet worden. Die Schüttilagen sowie die Abstandhalter der Bewehrung sind zwar kaum zu erkennen, jedoch weist die Betonfläche sehr starke Farbunterschiede aufgrund abgesonderten Wassers am Probenfuß und um die Ankerlöcher auf. Die sichtbare, ebenfalls verfärbte Trennung in der Mitte der Fläche ist auf den abgedichteten Schalungsstoß zurückzuführen. Selbst an dieser Abdichtung ist unter Einwirkung der Rüttelenergie Wasser von der Betonrandzone nach außen abgesondert worden.

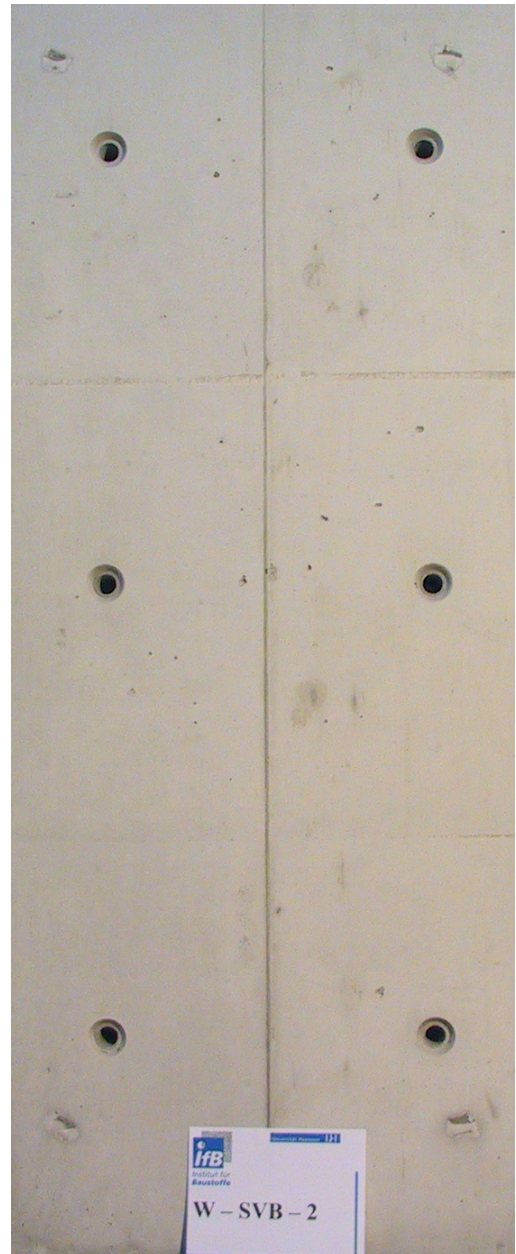


Abb. 6: Sichtbetonprobe aus SVB

Doch auch ein Beton entsprechend den Empfehlungen des Merkblatts Sichtbeton kann insbesondere bei Undichtigkeit der Schalhaut zu Flächen minderer Sichtbetonqualität führen. Für die Untersuchung dieses Falls ist in ein Schalbrett der Prüfschalungen ein Schlitz eingeschnitten, aus dem Bindemittelleim austreten kann.

Im Gegensatz dazu besitzt der SVB, der mit 330 kg/m^3 Zement, 200 kg/m^3 Kalksteinmehl und $1,4 \text{ kg/m}^3$ organischer Stabilisierer hergestellt wurde, kaum Farbveränderungen (vgl. Abb. 8, rechte Seite). Lediglich das Hervortreten der Feinmörtelschicht im Schalungsschlitz bleibt auf der Oberfläche des Betons erkennbar. Dieses Verhalten ist auf das wesentlich bessere Zusammenhaltevermögen des verwendeten SVB zurückzuführen und darauf, dass keine Rüttelenergie zu Entmischungen an der Störstelle

führt. Durch den stark erhöhten Anteil an Mehlkorn und die zusätzliche Anwendung von Stabilisierer wird eine Entmischungsneigung des Betons verhindert.



Abb. 7: Sichtbetonproben aus mehlkornarmem Rüttelbeton weicher Konsistenz

Ein weiterer wesentlicher Faktor ist in diesem Zusammenhang der Einfluss des Einbauens und Verdichtens (vgl. Abschnitt 0). Die Entmischungsneigung des Betons als Frischbetoneigenschaft spielt eine erhebliche Rolle und steht stark im Zusammenhang mit dem Einbau- und Verdichtungsprozess. So unterscheiden sich die Verfahren von Rüttelbeton und SVB erheblich (vgl. Abschnitt 0). Durch die fehlende Verdichtung des SVB wird der verflüssigende und entmischende Einfluss durch die Anregung des Rüttlers eliminiert.

Ein Vergleich anhand der durchgeführten Stützenversuche zwischen Rüttelbetonen zeigt jedoch

deutlich den Einfluss des Mehlkorngehalts auf die Sichtbetonqualität. Abb. 9 zeigt den Einfluss des ausgelaufenen Bindemittelleims aus der Schalhautfehlstelle auf der Betonoberfläche. Die Proben wurden aus Beton mit sehr weicher bis fließfähiger Konsistenz hergestellt, wobei links eine Probe mit geringem, rechts mit hohem Mehlkorngehalt abgebildet ist (vgl. Tab. 1). Die Probe mit erhöhtem Mehlkorngehalt zeigt deutlich schwächere Farbabweichungen und geringere Lunkerbildung.

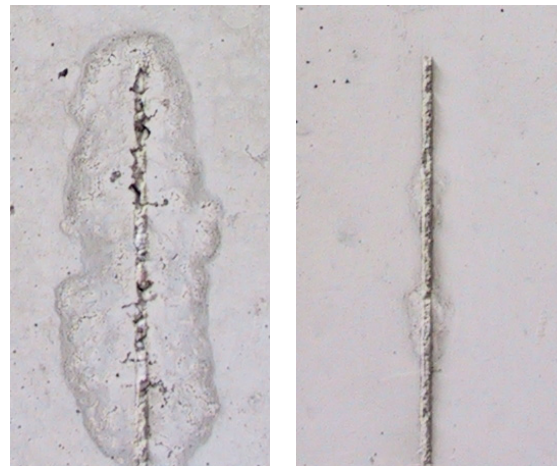


Abb. 8: Einfluss von austretendem Bindemittelleim aus der Schalung auf die Sichtbetonfläche (rechts: Rüttelbeton, links: SVB)

Die Auswirkungen des Mehlkorngehalts zeigen sich auch auf der übrigen Oberfläche in Form von Marmorierungen und Porenbildung. Bei dem Beton mit geringem Mehlkorngehalt sind längliche Poren zu erkennen, die auf starke Entmischungserscheinungen des Frischbetons beim Einbau in die Schalung zurückgeführt werden können. Durch die Neigung zum Wasserabsondern wird der Zementleim getrennt, so dass sich mehlkornfeine Bestandteile lokal konzentrieren. Diese sind als dunkle Marmorierungen auf der Betonoberfläche erkennbar.

Derartige Effekte werden nicht nur durch den Einbau- und Verdichtungsprozess beeinflusst, sondern ebenfalls durch Wechselwirkungen zwischen Schalung, Trennmittel und Betonrandzone. Um dies für Vergleichszwecke unterschiedlicher Betonzusammensetzungen bzw. Probekörper auszuschließen, kann zur Beurteilung die mit Plexiglas geschaltete Betonfläche als Referenzfläche herangezogen werden, da auf dieser Fläche kein Trennmittelauftrag erforderlich ist. Die in Abb. 10 dargestellten Referenzflächen zeigen die insgesamt geschlossenere Oberfläche bei höherem Mehlkorngehalt.

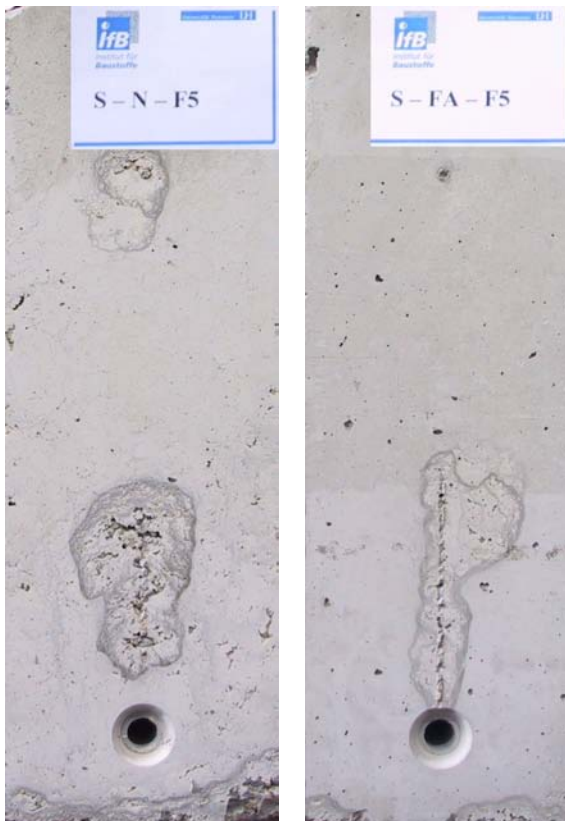


Abb. 9: Auswirkungen der Neigung zum Wasserabsondern (links: mehlkornarm, rechts: mehlkornreich)

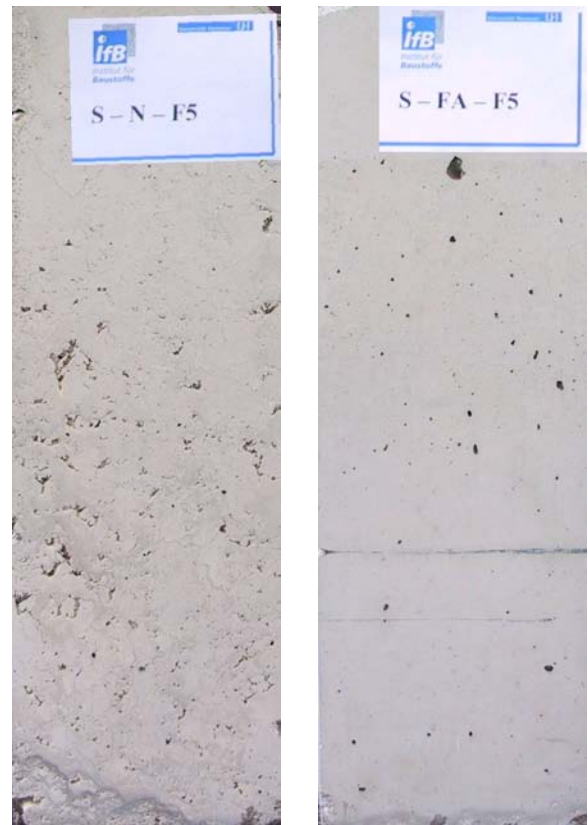


Abb. 10: Referenzflächen aus Beton mit unterschiedlichem Mehlkorngehalt (links: mehlkornarm, rechts: mehlkornreich)

Nicht nur die Neigung zum Wasserabsondern (Bluten) wirkt sich auf die Gestaltung der Betonoberfläche aus, sondern auch ein Sedimentieren des Fischbetons kann sich auf der Sichtfläche abzeichnen. Das Absinken grober Gesteinskörnung wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens anhand gesondert hergestellter Betonzylinder, die nach dem Erhärten aufgesägt wurden, qualitativ untersucht. Abb. 11 zeigt das Sedimentationsverhalten der Betone mit sehr weicher bis fließfähiger Konsistenz, wobei entsprechend den Abb. 9 und 10 links eine Probe mit geringem, rechts mit hohem Mehlkorngehalt abgebildet ist (vgl. Tab. 1). Die stabilisierende Wirkung des erhöhten Mehlkorngehalts auf die Sedimentationsneigung ist deutlich zu erkennen. Dieser Versuch ist zudem weitgehend unabhängig von Einbau und Verdichtung, da die Zylinder nach gleichem Ablaufschema eingefüllt und mit gleicher Verdichtungsintensität auf einem Rütteltisch hergestellt wurden.

Die Neigung zu Sedimentation und Wasserabsondern des Betons ist abhängig vom Mehlkorngehalt, dem Wassergehalt und der Konsistenz. Diese Größen sind aufeinander abzustimmen, um ein Entmischen des Betons zu vermeiden.

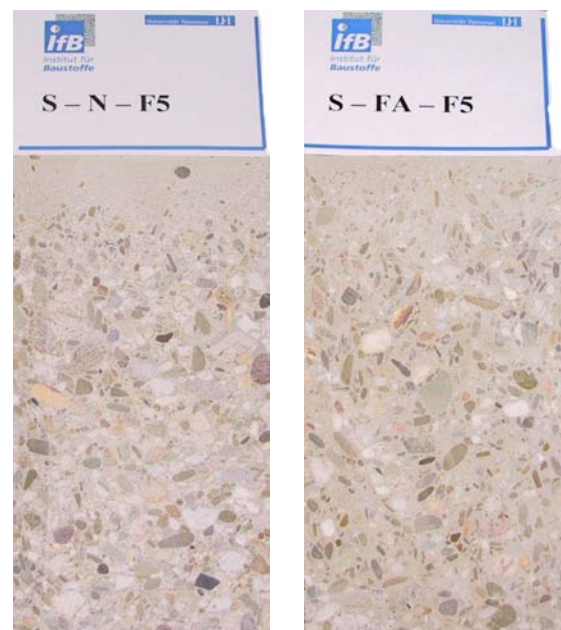


Abb. 11: Sedimentationsneigung in Abhängigkeit des Mehlkorngehalts (links: mehlkornarm, rechts: mehlkornreich)

Tab. 1: Kennwerte der verwendeten Betone

Beton	CEM I 32,5 R [kg/m ³]	SFA [kg/m ³]	Gesteinskörnung [kg/m ³]	Wasser (ohne FM) [kg/m ³]	Fließmittel [kg/m ³] Stabilisier [kg/m ³]	(w/z) _{eq} ohne FM [-]	Ausbreitmaß [cm]
S-N-F5	330	-	1850	175	4,6 -	0,53	51
S-FA-F5	330	150	1686	175	5,9 -	0,47	59
W-SVB-2	330	270	1602	170	4,5 1,0	0,52	-
W-N-F3	330	-	1850	175	3,2 -	0,53	49

Entscheidend für die zuverlässige Herstellung einer definierten Sichtbetonqualität ist aus beton-technologischer Sicht der Einsatz von Betonen, die sich robust gegenüber Schwankungen der Eigenschaften und Mengen der Ausgangsstoffe sowie der Umgebungsbedingungen verhalten. Diese Robustheit bezieht sich auf sichtbetonspezifische Eigenschaften, die bisher weder durch Regelungen definiert noch spezifiziert werden. Es ist also zunächst erforderlich, Eigenschaften zu definieren, mit Hilfe derer die Eignung eines Betons als Sichtbeton beschrieben werden kann. Im frischen Betonzustand reichen die üblichen Frischbetonkennwerte, deren Prüfverfahren normativ geregelt sind, nicht aus. Daher ist die Entwicklung weiterer Kennwerte gefordert.

3.4 Einbau

Wie bereits erwähnt stehen die Einwirkungen des Einbauverfahrens auf die Qualität der Sichtfläche in direktem Zusammenhang mit der Konsistenz und der Entmischungsneigung (Bluten und Sedimentieren) des Frischbetons. Bei der Betrachtung des Einflusses des Einbauverfahrens ist zwischen Betonfertigteilen, die unter relativ beherrschbaren Bedingungen erzeugt werden, und Bauteilen in Ortbetonbauweise zu unterscheiden. Die üblichen auf der Baustelle einsetzbaren Verfahren zum Einbau des Frischbetons konzentrieren sich im Hochbau auf den Krahnkübel und die Betonpumpe. In der Regel kann von der Verwendung von Transportbeton ausgegangen werden. Unter der Voraussetzung, dass eine für das Einbauverfahren geeignete Konsistenz gewählt wurde, können während des Einbaus folgende Probleme auftreten, die sich auf die Qualität der Sichtfläche der Betonbauteile auswirken können:

- schwankende Transportzeiten
- zu hohe Schüttilagen / extrem ungleichmäßige Höhe der Schüttilagen
- zu lange Wartezeiten zwischen den Schüttilagen
- Beschmutzen der Schalung beim Betoneinbau
- Verteilen des Betons mit dem Rüttler
- unzureichende oder zu intensive Verdichtung
- Kontakt zwischen Bewehrung und Schalung durch Begehen (Unterseite Betondecke)

Durch schwankende Transportzeiten des Frischbetons ergeben sich unterschiedliche Mischzeiten und verschiedene Hydratationsstufen des Betons, die ebenfalls von der Temperatur abhängen. Besonders im Sommer kann es so zu Schwankungen der Frischbetoneigenschaften zum Zeitpunkt des Einbaus in die Schalung kommen. Der häufig erforderliche Ausgleich der Konsistenz durch Zugabe von Fließmittel auf der Baustelle führt dementsprechend zu unterschiedlichen Fließmittel- und somit auch Wassergehalten in den verschiedenen Einbauchar- gen.

Die Höhe der Schüttilagen steuert die Ausprägung des Schüttkegels, der sich auf der Betonoberfläche farblich oder durch verstärkte Porenbildung abzeichnen kann. Bei hohen Schüttilagen kann eine Porenansammlung auch nicht durch eintauchen des Innenrüttlers in die darunter liegende Schicht verhindert werden. Ändert sich die Höhe der einzelnen Schüttilagen innerhalb eines Bauteils extrem, erhöht sich das Risiko eines ungleichmäßigen Eindrucks der gesamten Sichtfläche.

Wird der Beton mit dem Rüttler verteilt ergeben sich lokale Entmischungen, die in Form von Farbveränderungen oder Wasserläufern auf der Betonoberfläche sichtbar bleiben können. Analog dazu kann eine zu intensive Verdichtung zum Bluten des Betons führen, welches in der Randzone Marmorierungen oder ebenfalls Wasserläufer hervorruft. Hingegen hat eine unzureichende Verdichtung die Bildung von Poren und Lunker an der Betonoberfläche bis hin zu Kiesnestern über Querschnittteile zur Folge (vgl. Abb. 12). Die Intensität und Gleichmäßigkeit der Verdichtung stellt somit einen entscheidenden Faktor für die Oberflächenqualität von Sichtbeton dar. Während steife Konsistenzen stark zu verdichten sind, erfordern fließfähige Konsistenzen eine schwache Verdichtung bzw. gar keine bei SVB.



Abb. 12: Verdichtungsfehler

Insbesondere die Herstellung von Deckenunterseiten in Sichtbetonbauweise führt zu erhöhten Schwierigkeiten. Diese beginnen beim Verlegen der Bewehrung auf die Schalung, wobei während der Flechtarbeiten Drähte auf die mit Trennmittel behandelte Schalung fallen. Diese Drähte müssen aufwendig von der Schalhaut entfernt werden, welches nicht ohne Beeinflussung des Trennmittelauftrags möglich ist. Zudem ist es wahrscheinlich, dass in Abhängigkeit des Bewehrungsgrands mehr oder weniger Drähte zurückbleiben. Diese Situation ist während des Arbeitsablaufs bis zum Zeitpunkt der Betonage der Witterung (Sonneneinstrahlung, Feuchte etc.) ausgesetzt. Aufgrund dessen kann sich Rost von der Bewehrung lösen und auf die Schalhaut gelangen. Hinzu kommen mögliche Wechselwirkungen zwischen Schalhaut, Trennmitteln und Betonbestandteilen, die ebenfalls zu Braunverfärbungen führen können.

Für eine Übertragung von Forschungsergebnissen auf die Praxis besteht das Problem, dass die praktischen Einbaubedingungen nur sehr begrenzt angenähert werden können. Nicht nur die äußeren Bedingungen (Temperatur etc.) sind im Labor schwer nachzustellen, sondern auch Einflüsse aus der jeweiligen Bauteilgeometrie, den Originalabmessungen sowie dem Betonierdruck sind unter Laborbedingungen eingeschränkt. Für die im Labor eingesetzte Stützenschalung wurden verschiedene Einbauverfahren getestet. Beton mit weicher Konsistenz kann von Hand in die Schalung eingefüllt und mit einem Innenrüttler verdichtet werden. Hierbei wurden gute Ergebnisse erzielt. Abb. 13 zeigt einen in die Stützenschalung eingefüllten Beton mit weicher Konsistenz vor und nach dem Verdichten.



Abb. 13: Frischbeton in der Stützenschalung vor und nach dem Verdichten



Abb. 14: Einbauverfahren für SVB im Labor

Im Gegensatz dazu erfordert ein SVB einen ausreichenden Fließweg, um ausreichend zu entlüften. Im Labor wird dies durch den Einsatz einer Rutsche erreicht, über die der Beton in die Schalung fließt (vgl. Abb. 14). Da es sich um eine sehr schlanke Probengeometrie handelt, wird der Beton entlang einer Schalungsseite geführt, um ein Entmischen sowie den Eintrag von Luftporen während eines freien Falls zu verhindern. An den Proben wurden keine Effekte durch das Abfließen des Betons an der Schalhaut festgestellt.

Für die Ausführung von Sichtbeton sind kontinuierliche Einbaubedingungen erforderlich. Der Einbau sollte nach Möglichkeit innerhalb eines Bauwerks oder einer Untersuchungsreihe durch das gleiche Team erfolgen.

3.5 Qualitätssicherung

Über die Qualität eines Sichtbetonbauwerks kommt es immer wieder zu Streitigkeiten, die nicht selten vor Gericht ausgetragen werden. Wenn besondere Eigenschaften an das Aussehen eines Betons bestehen, sind diese vertraglich festzulegen und umfassend zu beschreiben. Dabei ist darauf zu achten, dass die geforderte Qualität technisch erreichbar ist. Nur unter diesen Voraussetzungen kann eine sinnvolle Qualitätssicherung erfolgen.

Mit Hilfe der im Merkblatt Sichtbeton [1] eingeführten Sichtbetonklassen ist der Zustand der Schalhaut vorgegeben und überprüfbar. Die Anforderungen an die Betonoberfläche können jedoch erst nach der Betonage im ausgehärteten Zustand des Betons beurteilt werden. Eine Qualitätssteuerung kann also nur durch nachträgliche Beurteilung der Flächen und Anordnung von entsprechenden Maßnahmen für die nächst folgende Betonage erfolgen. Durch die Herstellung von Erprobungsflächen ist zwar eine Verbesserung der Sichtbetonqualität vor Baubeginn möglich. Die Anzahl der Probebetonagen ist jedoch zumeist durch finanzielle Vorstellungen begrenzt. Aus diesem Grund wäre vorab ein Verfahren zur zuverlässigen Abstimmung des Sichtbeton-Systems im Labor eine sinnvolle Ergänzung zu den bisher existierenden qualitätssichernden Maßnahmen.

Mit der Entwicklung der Prüfschalungen für Sichtbeton steht zunächst ein Hilfsmittel zur Verfügung, das ebenso für Forschungszwecke wie in der Baupraxis einsetzbar ist. Mit der Stützenschalung können zunächst Versuche im Labor durchgeführt werden, innerhalb derer eine Variation der Betonrezeptur, Schalhaut und des Trennmittels möglich ist, bis die gewünschte Sichtbetonqualität an den Probekörpern vorliegt. Dadurch können einige Fehlermöglichkeiten bereits in der Planungsphase ausgeschaltet werden.

Die Wandschalung kann zunächst ebenfalls im Labor Einsatz finden, um die Effekte der mit der Stützenschalung hergestellten Probekörper anhand größerer Flächen zu verifizieren. Die Laborversuche sind jedoch noch nicht allein für eine praxisgerechte Abbildung der Sichtbetonqualität ausreichend, da diese erheblich von den Lieferungsbedingungen des Transportbetons, den Einbau- und Witterungsbedingungen abhängig ist. Um diese unberechenbaren Bedingungen in den Planungsprozess von Sichtbetonbauwerken einzubeziehen, ist es erforderlich, Probeflächen anzulegen, die bauteilgetreue Abmessungen besitzen. Die Möglichkeiten Probeflächen anzulegen sind jedoch auf nicht sichtbare Bauteile, z. B. im Keller, oder zusätzlich anzufertigende Bauteile begrenzt.

Mit der Wandschalung steht eine Prüfschalung definierter Geometrie zur Verfügung, mit der Referenzflächen unter Baustellenbedingungen hergestellt werden können. Auch ist es möglich, eine Bemusterung der Farbentwicklung unterschiedlicher Zemente, Schalhautoberflächen oder anderer Einflusspa-

rameter vorzunehmen. Die Referenzflächen können der vor Ort arbeitenden Betonierkolonne parallel zu den Probeflächen im Vorfeld wichtige Erfahrungen zu den Anforderungen beim Betonier-, Verdichtungs- und Nachbehandlungsablauf liefern.

Werden Referenzflächen während der Betonage der ausgeschriebenen Sichtbetonbauteile hergestellt, sind diese mit einer repräsentativen Probe aus dem mittleren Bereich der Transportmischerfüllung zu versehen. Referenzflächen sind mit der Wandschalung zu jedem Betonierabschnitt herstellbar, bei Verwendung mehrerer Fahrmischer können die Schalungen in mehreren Betonierabschnitten befüllt werden. Für einen eventuellen Streitfall stehen so Proben zur Verfügung, die aufgrund ihrer gleichen Geometrie eine vergleichbare Beprobung und Beurteilung der Sichtbetonqualität verschiedener Betonierabschnitte ermöglichen, ohne die eigentliche Sichtfläche zu beeinträchtigen.

Die Möglichkeiten der Qualitätssicherung bei der Annahme des Frischbetons beschränken sich derzeit auf die Empfehlung, eine Toleranz von ± 2 cm des Ausbreitmaßes auf die Zielvorgabe zuzulassen. Mit dieser Vorgabe können jedoch keine Schwankungen im Wassergehalt, die z. B. durch Toleranzen bei der Feuchtebestimmung der Gesteinskörnung auftreten können, geprüft werden. Doch gerade durch Unterschiede im Wassergehalt kann die Farbgleichmäßigkeit beeinträchtigt werden. Für eine verbesserte Qualitätssicherung sind für Sichtbeton Betonzusammensetzungen erforderlich, die sich robust gegenüber Schwankungen in den Mengen der Ausgangsstoffe, insbesondere dem Wassergehalt, verhalten (vgl. Abschnitt 3.3).

4 Ausblick

Zu dem Verständnis für die Zusammenhänge der in der Praxis auftretenden Phänomene sowie zur Erarbeitung erweiterter Empfehlungen für die Herstellung eines Sichtbetons wird derzeit ein AiF-Verbundforschungsvorhaben (Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsgemeinschaften) Sichtbeton in Zusammenarbeit von DBV und VDZ durchgeführt. Das Institut für Baustoffe hat sich zum Ziel gesetzt, sowohl betontechnologische Einflüsse auf Sichtbeton zu charakterisieren als auch Empfehlungen zur Entwicklung geeigneter und robuster Sichtbetonzusammensetzungen auszuarbeiten.

Eine geeignete Sichtbetonzusammensetzung sollte an die heutigen architektonischen Anforderungen angepasst sein, da die Akzeptanz durch den Betrachter für die Nachfrage der Sichtbetonbauweise erforderlich ist. Hierzu sind erweiterte Empfehlungen auszuarbeiten, die insbesondere die Auswirkungen durch Schwankungen im Wassergehalt auf die Sichtbetonqualität, z. B. die Farbe, berücksichtigen sollten.

Ein Ansatz stellt die Verbesserung des Wasserückhaltevermögens durch eine stärkere Robustheit der Sichtbetonzusammensetzung dar. Ausgegangen

von den architektonischen Entwicklungen der letzten Jahre, scheinen auch in Zukunft schlanke Bauteile mit ausgefallenen, z. T. geschwungenen Geometrien gefragt zu sein. Dafür wäre ein selbstverdichtender Beton geeignet, da seine Technologie trotz der noch vorherrschenden Probleme sehr leistungsfähig ist. Aufgrund des bisher noch nicht vollständig gelösten Robustheitsproblems werden auch noch weitere Lösungsansätze gesucht. Derzeit scheint für einen Sichtbeton mit fließfähiger Konsistenz ein Rüttelbeton sinnvoll zu sein, der ähnliche Fließigenschaften wie SVB besitzt, leicht zu verdichten ist und innerhalb der normativen Anforderungen zusammengesetzt werden kann.

5 Literatur

- [1] Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V., Bundesverband der Deutschen Zementindustrie e.V. (Hrsg.) (2004) Merkblatt Sichtbeton. Eigenverlag
- [2] Kling, B.; Peck, M. (2003) Sichtbeton im Kontext der neuen Betonnormen. beton, Heft 4, S. 170-176
- [3] Höveling, H.; Lohaus, L. (2003) Robustimprovement für Selbstverdichtenden Beton (SVB), ibausil 2003
- [4] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton DAfStb (Hrsg.) (2001) Sachstandsbericht Selbstverdichtender Beton (SVB). Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Heft 516, Beuth Verlag, Berlin
- [5] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton DAfStb (Hrsg.) (2003) DAfStb-Richtlinie Selbstverdichtender Beton (SVB-Richtlinie). Beuth Verlag, Berlin und Köln
- [6] Rapp, G. (1969) Technik des Sichtbetons. Beton Verlag, Düsseldorf
- [7] Gatz, H. P.; Kley, A. (1997) Einfluß von Trennmitteln, Schalung und Betonkonsistenz auf die Qualität des Sichtbetons. Abschlussbericht Projekt 96210, Bundesanstalt für Straßenwesen (bast), Bergisch-Gladbach

Sichtbeton – Schalhaut und Trennmittel

Bernd Hillemeier, Roland Herr, Matthias Kannenberg und Karsten Schubert

Zusammenfassung

Die Qualität von Beton mit gestalteten Ansichtsflächen - Sichtbeton – wird nach praktischen Erfahrungen dominierend von den Grenzflächeneigenschaften des Systems Frischbeton – Schalhaut bestimmt.

Die Bearbeitung des AiF-DBV-Forschungsprojekts „Sichtbeton“ an der TU Berlin geht modellhaft von 4 Arbeitsthemen aus. Diese sind durch die Stichworte Porenflüssigkeit, Benetzungsspannung, polare und disperse Oberflächenenergiebeträge der polymeren Schaltafelwerkstoffe und pseudofeste Oberflächenfilme der Trennmittel auf der Schalhaut geprägt .

Im Ergebnis von drei Untersuchungsreihen unter Verwendung von 3 Zementen, einem Betonverflüssiger, 10 Schalhäuten und einem Trennmittel wurden gefunden, dass Kontaktwinkelmessungen nach YOUNG und Bestimmungen der Oberflächenenergie von Polymerwerkstoffen der Schalhäute nach dem Ansatz von OWENS et al. für die Charakterisierung des Systems als geeignet erscheinen.

Aufgrund der Vielzahl der Einflussfaktoren ist eine Aufteilung des Gesamtsystems in mehrere Teilsysteme erforderlich, die einzeln in Bezug auf Oberflächenspannungen der flüssigen Phasen und Adhäsionsarbeit der Feststoffe analysiert werden müssen. Die Ergebnissen der Analyse der Grenzflächeneigenschaften werden künftig den Befunden aus den zur Zeit an anderer Stelle laufenden Forschungsarbeiten über die 2D- Bildanalyse von Sichtbetonoberflächen gegenübergestellt.

1 Einleitung

Neben der bekannten Leistungsfähigkeit des Betons in der Konstruktion wird heute insbesondere seine Qualität als „Sichtbeton“ oder „Beton mit gestalteten Ansichtsflächen“ gefordert, um zu gewährleisten, dass neben Glas und Stahl wieder zunehmend Beton für hohe gestalterische Anforderungen eingesetzt wird.

Für die wesentlichen Aspekte der Ausschreibung, Herstellung und Abnahme von Sichtbeton novellierten der Deutschen Beton und Bautechnik Verein E.V. und der Bundesverband der Deutschen Zementindustrie e.V. im Jahre 2004 das Merkblatt „Sichtbeton“. Die Überarbeitung berücksichtigt die Einbindung des Sichtbetons in die neuen europäischen Normen und Richtlinien für Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton, Beton nach DIN EN 206-1, DIN 1045-2 und die Betonausführung nach DIN 1045-3 sowie die Aspekte der Schuldrechtsreform 2002.

Was trägt das neue Merkblatt „Sichtbeton“ zur Steigerung seiner Qualität bei und wo liegen gegenwärtig die technischen Grenzen einer hochwertigen Sichtbetonausführung? Diese Fragen soll der vorliegende Beitrag beantworten.

2 Das Merkblatt „Sichtbeton“ vom August 2004 - ein Leitfaden und seine Grenzen

Das Anliegen des Merkblatts 2004 ist es, durch Fachleute aus Theorie und Praxis des Sichtbetons Hinweise für die Baupraxis zu geben, bei deren Beachtung die angestrebte Sichtbetonqualität erreicht werden kann.

Die Erfahrung aus der Betonpraxis – sowohl im Labor als auch auf der Baustelle – zeigen allerdings, dass selbst bei größtmöglicher Sorgfalt ein Ergebnis auftreten kann, das den Erwartungen, die dem Bauvertrag zugrunde liegen, nicht gerecht wird.

Die Sichtbetonherstellung ist eine komplexe Leistung von fachgerechter Gestaltung, Planung, Baustofftechnologie und baubetrieblicher Ausführung. Neben einer Anzahl von „konventionellen“ Fehlern, deren mögliches Auftreten im Merkblatt im Detail analysiert wurde, können Unregelmäßigkeiten vor allem bei der Herstellung von Sichtbeton mit glatter, nicht saugender Großflächenschalung auftreten und den Gesamteindruck beeinträchtigen. Für die zuletzt genannten Qualitätsmängel bestehen heute noch wissenschaftlich ungenügend geklärte Zusammenhänge zwischen den Grenzflächeneigenschaften von Schalhaut und Frischbeton, welche die Sichtbetonqualität beeinflussen.

Das Sichtbeton-Merkblatt 2004 differenziert zunächst die technisch herstellbaren Sichtbetonqualitäten und listet die Anforderungen an die Sichtbetonqualitäten auf

- Klassifizierung der Güteeigenschaften nach Sichtbeton-Klassen
- Bewertung der Qualitätskriterien

und stellt außerdem nach dem gegenwärtigen Stand der Technik

- vermeidbare und eingeschränkt vermeidbare
- (noch) nicht vermeidbare

Sichtbetonmängel einander gegenüber.

Zunächst definiert das „Sichtbetonmerkblatt“ 4 Sichtbetonklassen (Tabelle 1).

Tab. 1: Sichtbetonklassen, Anforderungen, Ausführungsbeispiele

Sichtbetonklasse	Anforderungen	Beispiele
SB 1	geringe Anforderungen	Kellerwände, Gewerberäume
SB 2	normale Anforderungen	Treppenhausräume, Stützwände
SB 3	hohe gestalterische Anforderungen	Fassaden im Hochbau
SB 4	besonders hohe gestalterische Anforderungen	Repräsentative Bauteile im Hochbau

Die Qualitätsansprüche an die einzelnen Sichtbetonklassen sind eng mit den zugeordneten Qualitätskriterien verbunden. Dazu zählen Textur, Schalelementestoß, Porigkeit, Farbtongleichmäßigkeit, Ebenheit, Erprobungsflächen, Schalhautklasse und Kosten.

Die hohen Qualitätsforderungen, beispielsweise an die Porigkeit, werden anhand der detaillierten Angaben der Porenanteile in Tabelle 2 erläutert.

Tab. 2: Detailangaben zum Qualitätskriterium „Porigkeit“

Porigkeitsklasse	P1	P2	P3	P4
Maximaler Porenanteil ¹⁾ in mm ²	3000	2250	1500	750
Maximaler Porenanteil, bezogen auf eine Prüffläche 500 x 500 mm ²	1,2 %	0,90 %	0,60 %	0,30 %
¹⁾ Porendurchmesser 2 < d < 15 mm				

Die nachstehende Tabelle 3 enthält eine Auflistung bekannter und vermeidbarer Merkmale des Sichtbetons, die nach dem Stand der Technik zweifelsfrei als Mängel bezeichnet werden, die an einer oder mehre-

ren Stellen in der Kausalkette aus fachgerechter Gestaltung, Planung, Baustoff-technologie und baubetrieblicher Ausführung entstanden sind.

Tab 3: Vermeidbare Mängel in der Sichtbetonherstellung und ihre wahrscheinlichsten Ursachen (Beispiele)

Sichtbetonmangel	Mögliche Fehlerursache
Farbunterschiede Schüttaglagen	Betonherstellung oder Fehler beim Einbringen und Verdichten des Betons
Hautbildungen / Arbeitsfugen	Betonierfluss
Abzeichnung der Bewehrung	Abstandhaltung; Betondeckung
Betonverfärbungen durch nicht versiegelte Schnittkanten von Schaltafeln	Auswahl Schaltafeln / Schalungsbau
Ausblühende Sichtflächen	Zementart, Betonart, Entschaltermin, Nachbehandlung

Darüber hinaus werden an Sichtbeton Anforderungen gestellt, die nach dem gegenwärtigen Stand der Betontechnologie technisch nicht zielsicher erfüllbar sind. Zu diesen Anforderungen zählen:

- Gleichmäßiger Farbton aller Ansichtsflächen im Bauwerk
- Porenfreie Ansichtsflächen
- Einhaltung der Porenflächenanteile entsprechend der Porigkeitsklassen P 1 bis P 4
- Gleichmäßige Porengröße und -verteilung in einer Einzelfläche und in allen Ansichtsflächen im Bauwerk
- Ausblühfreie Ansichtsflächen von Ortbeton
- Farbton- und Texturgleichheit im Bereich von Betonfläche und Schalungsstößen
- Scharfe Kanten ohne kleinere Abbrüche und Ausblutungen
- Vermeidung von Wolkenbildungen und Marmorierungen.

Abweichungen davon werden als Mängel eingestuft, die ihre Ursache in unzureichenden Erkenntnissen über die Grenzflächenwechselwirkungen zwischen Frischbeton, Trennmittelart und den organischen Polymerüberzügen auf nicht saugfähigen Schalhautoberflächen haben.

3 Experimentelle Nachweise der gegenwärtigen Grenzen der Gestaltung von Sichtbetonoberflächen

In den vergangenen Jahren wurden mehrfach experimentelle Untersuchungen zur Wirkung von Trennmitteln auf die Betonrandzone bei Stahl- und Holzschalungen [1] und über die gemeinsame Wirkung von Schaltafeln mit polymeren Oberflächen plus Trennmitteln [2, 3] durchgeführt. Als Beispiele er-

wähnt seien die Versuchs-Betonierung eines unbewehrten „Betonbalkens“ der Abmessungen Länge x Breite x Höhe = 5000 x 400 x 600 mm mit 10 unterschiedlichen Schaltafeloberflächen anlässlich der Readymix-Synopsis [2] am 27.3.2003 im Zementwerk Rüdersdorf bei Berlin sowie die Ergebnisse der Befunde des AiF-DBV-Verbundforschungsprojektes „Sichtbeton“ [3]

Bei der Versuchsbetonierung in Rüdersdorf [2] kam ein leicht verarbeitbarer Beton C 80/95 der Konsistenzklasse F6 nach DIN EN 12350-5 und einem Ausbreitmaß von 630 mm zum Einsatz. Als Bindemittel wurde eine Zementmischung aus CEM III/A und CEM III/C verwendet. Der Beton enthielt Fließmittel. Die Außen- und Erhärtungstemperatur betrug 10 °C. Die Ergebnisse der visuellen Bewertung und Beschreibung der resultierenden Sichtbetonoberflächen nach der Entschalung nach 24-h-Erhärtung enthält die Tabelle 4.

Tab. 4: Beschreibung der Betonoberflächen nach Tage-Entschalung [2]

Bezeichnung Schaltafeln und Betonoberfläche	Trennmittel Isorex 6 (ISOLA)
	Porigkeit/Farbeeekte
A1 nicht saugend	viele große runde Poren, dunkelgrauer Flächeneindruck
A2 nicht saugend	wenige grobe Poren, hellgrauer Flächeneindruck
A3 stark saugend	praktisch porenfrei, gleichmäßiger hell-grauer Flächeneindruck
A4 saugend	wenige, ungleichmäßig verteilte grobe Poren, eine „gemaserte“ Oberflächentextur, hellgrauer Flächeneindruck
A5 nicht saugend	wenige grobe Poren, hellgrauer Flächeneindruck
Bezeichnung Schaltafeln und Betonoberfläche	Trennmittel DOKA Trenn
	Porigkeit/Farbeeekte
B1 nicht saugend	viel feine Poren mit homogener Verteilung, relativ dunkler Flächeneindruck
B2 nicht saugend	wenige feine Poren, mittelgrauer Flächeneindruck
B3 stark saugend	praktisch porenfrei, wolki-ger Oberflächeneindruck aus helleren und dunkleren Bereichen
B4 saugend	feine Poren, gleichmäßige Verteilung, mittelgrauer Flächeneindruck
B5 nicht saugend	feine Poren, gleichmäßige Verteilung, schwache Textur, mittel-grauer Flächeneindruck

Das Fazit :

- Derselbe Beton führt im Kontakt mit fünf Schaltafeln und zwei Trennmitteln zu zehn verschiedenen Sichtbetonoberflächen.
- Saugende Schalungen bilden wesentlich porenärmere Oberflächen als nicht saugende.
- Gegenwärtig gibt es keine Grundlagenerkenntnisse, welche die bestehenden Zusammenhänge zwischen den Grenzflächenzuständen von Schalhaut und Frischbeton erklären.
- Die Quantifizierungen der oben genannten Oberflächeneffekte nach der Entschalung und im Verlaufe der Nacherhärtung/Alterung des Betons sind nicht mehr mit herkömmlichen Mitteln einer verbalen „Bildbeschreibung“ zu leisten.

Im Rahmen des AiF-DBV-Verbundforschungsprojektes „Sichtbeton“ [3] und des AiF-GFAI-Projektes „Bildgestützte Bewertungsverfahren für Sichtbetonoberflächen“ [4] sind im Jahr 2004 an sechs Forschungsstellen erneut Untersuchungen der Zusammenhänge zwischen Frischbetonen und einer Auswahl von Schaltafeln mit nicht saugenden Polymeroberflächen plus Trennmittel begonnen worden.

Die Sichtbetonoberflächen, die mit einer Referenz-Stützenschalung der Abmessung L x B x H = 200 x 200 x 600 mm und einem einheitlich zusammengesetzten Referenzbeton C 30/37 mit einer Verarbeitbarkeit F3 nach DIN EN 12350-5 und einem Ausbreitmaß A = 45 +/- 2 cm erhalten wurden zeigen erneut, dass die Schalhaut- und Trennmitelauswahl einen bedeutenden Einfluss auf die Poren- (Lunker)-häufigkeit und den Porenflächenanteil in der Sichtbetonoberfläche haben. Bemerkenswert sind die sehr differenten Porenflächen bei der Verwendung von Schaltafeln mit einer Schalhautklasse, z.B. den Phenolharzen.

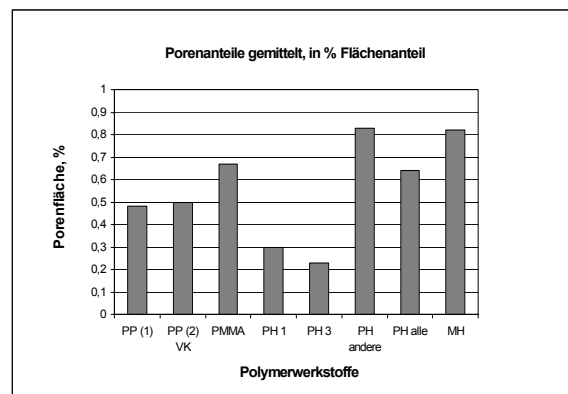


Abb. 1: Einfluss der chemischen Zusammensetzung der Polymeroberfläche der Schalhaut auf die Porosität der Sichtbetonoberfläche, in Flächenprozent (nach [5])
Legende: PP = Polypropylen, PMMA = Polymethylmethacrylat, PH = Phenolharz, MH = Melaminharz

Zieht man die Porigkeitsklassen des Sichtbeton-Merkblattes (siehe obige Tabelle 2) zur Beurteilung

des Ergebnisses der optoelektronischen Bildanalyse der Referenzbetone (Abbildung 1) [5] heran, so heißt das, dass in Abhängigkeit von der Auswahl des Schalhautmaterials aus der gleichen Betonmasse Sichtbetone mit drei Porigkeitsklassen (P 2 bis P 4) herstellbar sind.

Das Forschungsthema der TU Berlin lautet „Sichtbeton: Untersuchung der chemisch-physikalischen Wechselwirkungen zwischen Frischbeton, Schalhaut und Trennmittel als Grundlage neuer Prüfmethode für die Baupraxis“.

4 Grundlagenuntersuchungen zu den Energiezuständen an der Grenzfläche zwischen Zementleim und Schalhaut

Arbeitsthese 1: Porenflüssigkeit statt Zementleim

Die Bindephase des Betons, der Zementleim, besteht bei der Verwendung von Portlandzement CEM I mit einer mittleren Dichte von 3,10 g/cm³ und einem Wasser-Zement-Wert von W/Z = 0,50 aus 60,6 Vol-% Wasser (Porenlösung) und 39,4 Vol-% Zementpulver. Wie die nachstehenden Analyseergebnisse zeigen, wandelt sich das Anmachwasser in wenigen Minuten in eine hochalkalische (pH>13) Na-, K-, Ca-, OH- und SO₄-Ionen enthaltende Porenflüssigkeit um.

Aufgrund der Volumenverhältnisse zwischen Porenlösung und Zement wird von der Arbeitsthese 1 ausgegangen, dass die Grenzflächenvorgänge zwischen Beton und Schalhaut dominierend von der flüssigen Phase geprägt werden.

Arbeitsthese 2: Die Oberflächengüte des Betons hängt von der Benetzung der Schalhaut ab

Das Benetzungsverhalten ist Ausdruck der molekularen Wechselwirkung von flüssigen und festen Stoffen.

Eine Flüssigkeit steht mit ihrem umgebenden Gasraum im Gleichgewicht; der Terminus $\gamma_{L,G}$ beschreibt die Oberflächenspannung der Flüssigkeit.

Ein Festkörper steht ebenfalls mit seiner umgebenden Gasphase im Gleichgewicht; der Terminus $\gamma_{S,G}$ beschreibt die Oberflächenenergie des Festkörpers. Eine direkte Messung der Oberflächenenergie von Festkörpern ist physikalisch nicht möglich. Es besteht jedoch die Möglichkeit, diese über die Bestimmung des Kontaktwinkels einer Flüssigkeit mit der Festkörperoberfläche näherungsweise zu bestimmen.

Die Oberflächenenergie von Festkörpern ist durch Hydrophilie/-phobie, Polarität, Heterogenität, Rauigkeit und Verunreinigungen (Maskierungsschichten) stark beeinflusst. Damit verbunden ändert sich der Kontaktwinkel der Flüssigkeit.

Aus der Oberflächenspannung der Flüssigkeit und der Oberflächenenergie des Festkörpers resultiert die Grenzflächenspannung $\gamma_{L,S}$ zwischen Flüssigkeit und Festkörperoberfläche. Die Zusammenhänge beschreibt die YOUNG'sche Gleichung.

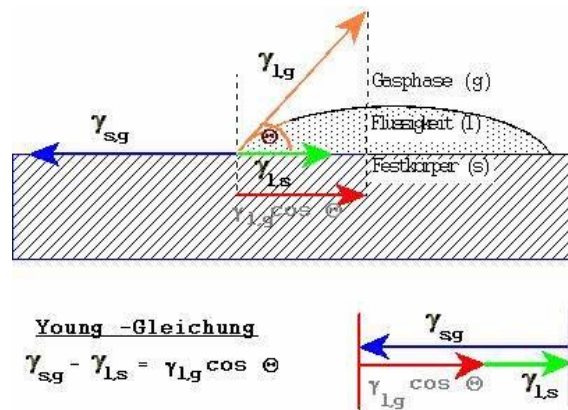


Abb. 2: Vektorielle Darstellung des Kräftegleichgewichts am liegenden Tropfen

In der YOUNG-Gleichung bedeuten:

- $\gamma_{L,G}$ = Oberflächenspannung der Flüssigkeit zu ihrer umgebenden Gasphase
- $\gamma_{S,G}$ = Oberflächenenergie eines Festkörpers zur umgebenden Gasatmosphäre
- $\gamma_{L,S}$ = Grenzflächenspannung zwischen Flüssigkeit und Festkörperoberfläche
- Θ = Rand-, Kontakt- oder Benetzungswinkel ($0^\circ < \Theta < 180^\circ$)
- $\Theta < 90^\circ$ Flüssigkeit wirkt benetzend
- $\Theta > 90^\circ$ Flüssigkeit wirkt nicht benetzend
- $\gamma_{S,G} - \gamma_{L,S} > 0$ Benetzungsspannung, kritische Oberflächenspannung γ_C

Der Wert für die Oberflächenspannung einer Flüssigkeit zu ihrer umgebenden Gasphase $\gamma_{L,G}$ kann mit der „Methode des hängenden Tropfens“ bestimmt werden, der Randwinkel Θ wird mit dem Goniometer gemessen und die kritische Oberflächenenergie des Festkörpers γ_C wird nach der Methodik von ZISMANN ermittelt (Abb. 3).

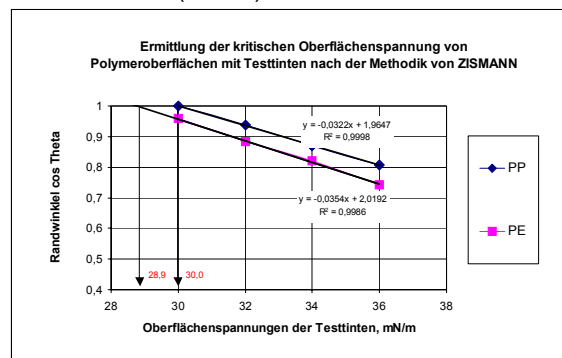


Abb. 3: Experimentelle Ermittlung der kritischen Grenzflächenenergie γ_C eines Festkörpers nach der Methode von ZISMANN mit Eichflüssigkeiten bekannter Oberflächenspannung.

In Abbildung 3 wurde die kritische Grenzflächenenergie γ_C für Polypropylen PP = 30,0 mN/m und für Polyethylen PE = 28,9 mN/m bestimmt.

Arbeitsthese 3: Die Benetzung der Schalhaut (ohne Trennmittel) durch wässrige Lösungen erfordert die Berücksichtigung der dispersen und polaren Energieanteile der organischen Polymerwerkstoffe der Schalhaut

Beim Kontakt eines flüssigen Mediums, wie z.B. Wasser, anorganische Basen, wässrige Salzlösungen oder Gemische daraus, so wie die Porenflüssigkeit des Betons, deren Moleküle eine unsymmetrische Ladungsverteilung und damit ein permanentes Dipolmoment besitzen, wird in einem unpolarem Stoff, z.B. in einem Polymerwerkstoff, ein Dipolmoment induziert.

Die Wechselwirkungskräfte zwischen induzierten Dipolen bezeichnet man als Dispersionswechselwirkungen oder LONDON'sche Kräfte. Zu den Dispersionswechselwirkungen treten die polaren Wechselwirkungen hinzu.

Die Oberflächenenergie $\gamma_{S;G}$ eines Festkörpers muss folglich in einen dispersen

$\gamma_{S;G}^{dispers}$ und einen polaren Anteil $\gamma_{S;G}^{polar}$ aufgeteilt werden.

$$\gamma_{S;G} = \gamma_{S;G}^{dispers} + \gamma_{S;G}^{polar} \quad (1)$$

Organische Polymerwerkstoffe, die auch für die Herstellung von Schaltafeln verwendet werden, besitzen je nach ihrem strukturellen Aufbau, sehr unterschiedlich große disperse und polare Anteile ihrer Oberflächenenergie $\gamma_{S;G}$.

Sauerstofffreie, reine Polyolefin-Werkstoffe, z.B. Polypropylen und Polyethylen, haben eine Polarität von $P \approx 0\%$, während PMMA Polymethylmethacrylat, PVAC Polyvinylacetat und PHMA Polyhexamethylenadipamid (Nylon 66) eine hohe Polarität $P \approx 33\%$ aufweisen. Für eine Reihe von polymeren Werkstoffen, insbesondere von solchen mit einer breiten technischen Variabilität der Syntheseverfahren, wie bei Phenol-Formaldehyd-Harzen und deren Copolymerisaten, z.B. Melamin-Phenolharz-Werkstoffen, existieren keine zuverlässigen Daten über die Oberflächenenergie $\gamma_{S;G}$ und ihre zugehörigen dispersen bzw. polaren Anteile.

Nach FOWKES beeinflussen lediglich die dispersen Anteile der Oberflächenenergie die Haftung, z.B. eines Wasserfilms, an der Phasengrenze. Die Adhäsionsarbeit W_a kann über ein geometrisches Mittel wie folgt berechnet werden:

$$W_a = 2 \cdot \sqrt{\gamma_{S;G}^{dispers} + \gamma_{L;G}^{dispers}} \quad (2)$$

Da mit Hilfe des Ansatzes nach FOWKES lediglich disperse Wechselwirkungen erfasst werden, ist dieser Ansatz für die Analyse der hier untersuchten Grenzflächenwechselwirkungen von wässrigen Lösungen mit organischen Polymerwerkstoffen, die sowohl disperse als auch polare Wechselwirkungen zeigen, ungeeignet.

Der Ansatz nach OWENS, WENDT, RABEL und KÄLBLE (ORWK-Ansatz) hingegen unterscheidet zwischen dispersen und polaren Anteilen. Somit

ergibt sich eine erweiterte Beschreibung der Adhäsionsarbeit W_a

$$W_a = 2 \cdot \sqrt{\gamma_{S;G}^{dispers} + \gamma_{L;G}^{dispers}} + 2 \cdot \sqrt{\gamma_{S;G}^{polar} + \gamma_{L;G}^{polar}} \quad (3)$$

Setzt man diesen Ausdruck in die YOUNG-DUPRE-Gleichung ein

$$W_a = \gamma_{L;G} (1 + \cos \Theta) \quad (4)$$

so erhält man die folgende Gleichung für die Adhäsionsarbeit W_a

$$\gamma_{L;G} (1 + \cos \Theta) = 2 \cdot \sqrt{\gamma_{S;G}^{dispers} + \gamma_{L;G}^{dispers}} + 2 \cdot \sqrt{\gamma_{S;G}^{polar} + \gamma_{L;G}^{polar}} \quad (5)$$

Stellt man diese Gleichung um, erhält man eine Geradengleichung vom allgemeinen Typ $y = mx + b$, wobei $0,50 \gamma_{L;G} (1 + \cos \Theta) / (\gamma_{L;G}^{dispers})^{0,5}$ für y und $(\gamma_{L;G}^{polar} / \gamma_{L;G}^{dispers})^{0,5}$ für x stehen. Ist die Oberflächenspannung $\gamma_{L;G}$ der Flüssigkeit und sind ihre zugehörigen dispersen und polaren Oberflächenspannungsanteile bekannt, dann entspricht die Steigung m der Geraden dem polaren Anteil der Festkörperoberflächenenergie $\gamma_{S;G}^{polar}$ und der Y-Achsenabschnitt b dem dispersen Anteil der Festkörperoberflächenenergie $\gamma_{S;G}^{dispers}$.

Experimentell ist hierzu die Bestimmung der Kontaktwinkel von mindestens zwei Flüssigkeiten unterschiedlicher Oberflächenspannungen erforderlich, deren polare $\gamma_{L;G}^{polar}$ und disperse Anteile $\gamma_{L;G}^{dispers}$ bekannt sind.

Eine Übersicht der Oberflächenspannungen unterschiedlicher Flüssigkeiten zeigt Tabelle 5.

Tab. 5: Messflüssigkeiten für die Bestimmung der Oberflächenenergie von polymeren Werkstoffen mit Hilfe der Methode nach OWENS et al. (ORWK-Ansatz).

Flüssigkeit	$\gamma_{L;G}$	$\gamma_{L;G}^{polar}$	$\gamma_{L;G}^{dispers}$
	[mN/m]		
Wasser	72,8	51,0	21,8
Dimethylformamid DMF	37,3	4,9	32,4
Dimethylsulfoxid DMSO	44,0	8,0	36,0
Ethylenglykol EG	48,0	19,0	29,0
Dijodmethan	50,8	2,3	48,5
Glyzerin	63,4	26,4	37,0

Für die Grundlagenuntersuchungen an Schaltafeloberflächen aus Polymerwerkstoffen können mit der dargestellten Methodik die Oberflächenenergiebeiträge als Summe und als disperse und polare Teilbeiträge ermittelt werden. Darauf aufbauend kann mit korrelativen Untersuchungen geprüft werden, ob zwischen der Oberflächenenergie $\gamma_{S;G}$ einer konkreten Schaltafeloberfläche und/oder der kritischen Oberflächenspannung γ_c (Benetzungsspannung) und den quantitativ bestimmten Oberflächenstrukturdefekten (z.B. Poren-/Lunkerzahl etc.) ein Zusammenhang besteht.

Arbeitsthese 4: Die Benetzung des Systems „Schalhaut plus Trennmittel“ durch wässrige Lösungen

kann mit Hilfe der Methode nach OWENS et al. (ORWK-Ansatz) durchgeführt werden
Die Arbeitstheze 4 ist nur dann umsetzbar, wenn im Messzeitraum von wenigen Minuten zwischen der „Unterlage“ (Trennmittelfilm) und Messflüssigkeit (Porenlösung) keine oder keine wesentlichen Wechselwirkungen ablaufen. Folgende Forderungen müssen erfüllt sein:

- Die „Unterlage“ (Trennmittelfilm) und Messflüssigkeit (Porenlösung) dürfen chemisch nicht miteinander reagieren oder gegenseitig in Lösung gehen,
- Die Messflüssigkeit darf nicht im flüssigen oder dampfförmigen Zustand auf der Unterlage adsorbieren,
- Es darf keine Hysterese des Kontaktwinkels, d.h. es dürfen keine unterschiedliche Winkel bei fortschreitender und zurückweichender Flüssigkeitsfront, auftreten.

5 Experimentelles

5.1 Experimentelle Ausführung der Randwinkel-, Oberflächenspannungs- und Oberflächenenergiemessungen

Die Durchführung der experimentellen Untersuchungen zur Ermittlung der energetischen Zustände zwischen Zement- bzw. Betonporenflüssigkeiten und Schaltafeloberflächen erfolgt in Kooperation mit der BAM Berlin, Fachgruppe VI.3 „Analyse und Struktur von Polymeren“. Die Messungen werden mit Hilfe eines Kontaktwinkelgoniometers vom Typ G2 der Fa. KRÜSS, Hamburg, durchgeführt.

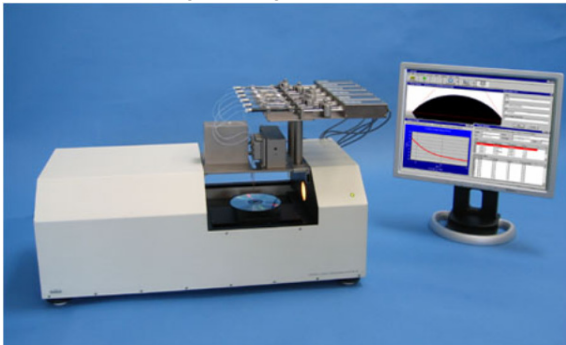


Abb.4 : KRÜSS-Kontaktwinkelmessgerät G2

5.2 Die Gewinnung der Porenlösungen aus Zementleim, -mörtel und -beton durch geeignete Phasentrennverfahren fest-flüssig

Für die Gewinnung der Porenflüssigkeiten aus Zementpasten, -mörteln und -betonen stehen an der TU Berlin folgende Phasentrennverfahren zur Verfügung: a) Filternutschentechnik mit Unterdruck, Abb. 5a (Wasserstrahlpumpe 17 mbar; Vakuumpumpe mit Grobvakuum 0,1 mBar), b) Zentrifugiertechnik, Abb. 5b (wird erforderlich, wenn a) versagt) und c) die Auspresstechnik, Abb. 5c (ist erforderlich, wenn a) und b) versagen)



Abb. 5a



Abb. 5b

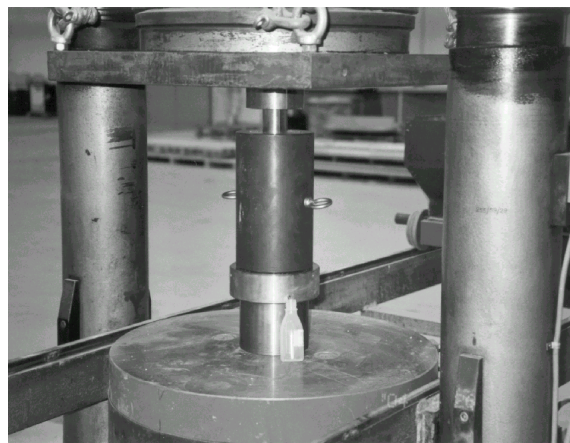


Abb. 5c

Abb. 5a, b, c: Phasentrennverfahren zur Gewinnung von Porenlösungen aus Zementsteinpasten, Zementstein und -mörtel

5.3 Eingesetzte Zemente und Analytik der Porenflüssigkeiten

Für die Untersuchungen wurden – zwecks Einbeziehung der wichtigsten handelsüblichen Zementsorten CEM I, CEM II und CEM III – drei Zemente nach DIN EN 196 eingesetzt. Die chemischen Analysendaten zeigt die Tabelle 6.

Tab. 6: Zemente nach DIN EN 196 für die Gewinnung von Porenlösungen und für Betonversuche

Oxide/ Bestandteile M-%	Zementarten		
	CEM I 42,5 R vom 21.6.2004 Rüdersdorf	CEM II/B- S 32,5 R vom 03.8.2004, Deuna *)	CEM III/A 32,5 N – NW/NA vom 20.10.2004, Eisen- hüttenstadt
SiO ₂	19,3	23,77	28,51
Al ₂ O ₃	4,30	7,17	8,75
TiO ₂	n.b.	0,33	0,59
P ₄ O ₁₀ P(V)-Oxid	n.b.	0,24	n.b.
Fe ₂ O ₃	2,50	1,72	1,49
Mn ₂ O ₃	n.b.	0,08	n.b.
CaO	63,1	55,08	48,66
MgO	2,71	4,33	7,82
SO ₃	3,40	2,74	2,74
Na ₂ O	0,27	0,30	0,35
K ₂ O	0,99	1,14	0,77
Na ₂ O- Äquivalent	0,92	1,05	0,86
Cl	n.b.	n.b.	0,07
Glühverlust	2,90	2,86	1,94
CO ₂	n.b.	1,69	n.b.
H ₂ O	n.b.	1,17	n.b.
Sulfid S ²⁻	n.b.	0,43	0,54
Sauerstoff- Äquivalent	n.b.	-0,21	n.b.
HCl- Unlösliches	n.b.	n.b.	0,15

*) Referenzzement im Verbundforschungsprojekt „Sichtbeton“

Diese Zemente wurden für die Herstellung praxisrelevanter Porenlösungen und für Labor-Betonprüfkörper (Referenzstützenschalung L x B x H = 200 x 200 x 600 mm) verwendet.

Für die Gewinnung von Porenlösungen wurden Zementmörtel aus Zement und Normsand mit 1:2 Masseteilen und einem W/Z-Wert = 0,50 hergestellt. Die Hydratation erfolgte in verschlossenen PE-Weithalsflaschen bei 21 °C. Die Separation der Porenlösungen erfolgte nach Reaktionszeiten von 15 Minuten bis 4 Stunden. Daran anschließend wur-

den die Porenlösungen mit folgenden Methoden analysiert:

- Hydroxidionen: acidimetrische Titration mit 0,1 n HCl gegen Methylrot
- Sulfationen: Fällung als BaSO₄ und gravimetrische Bestimmung
- Natrium- und Kaliumionen: Atomabsorptions-Spektroskopie
- Calciumionen: komplexometrische Titration

Die Analysenergebnisse der Porenlösungen zeigt die Tabelle 7.

Tab. 7: Ergebnisse der chemischen Analyse der anorganischen Inhaltsstoffe der Porenlösungen aus einem Hydratationszeitraum von 0,25 bis 4 h bei 21 °C

Zement- art	Zeit h	Porenlösungsinhaltsstoffe, mE/L				
		Na	K	Ca	OH	SO ₄
CEM I 42,5 R Rüders- dorf; Na ₂ Oäq = 0,92 %	0,25	47,3	344,4	38,2	134,6	270,1
	1,0	29,7	361,2	34,1	141,5	260,5
	4,0	26,2	347,8	30,0	186,2	218,4

CEM II/B-S 32,5 R Deuna; Na ₂ Oäq = 1,05 %	0,25	23,8	226,7	42,5	99,3	193,2
	1,0	27,0	230,8	37,6	104,3	190,1
	4,0	27,8	235,4	39,1	131,5	165,2

CEM III/A 32,5 NW/NA Eisenhütt enstadt Na ₂ Oäq = 0,86 %	0,25	35,6	169,9	39,2	99,0	145,5
	1,0	35,8	161,9	36,5	104,1	129,6
	4,0	37,0	162,8	35,0	104,0	131,1

Aus Tabelle 7 ist ersichtlich, dass die Porenlösungen bereits nach 15 min Reaktionszeit in Abhängigkeit von der Zementart eine Hydroxidionenkonzentration von 100 bis 135 mE/L, entsprechend einem berechneten pH-Wert von 13,0 bis 13,27, aufweisen. Die Porenlösungen sind in diesem Reaktionszeitraum als relativ hoch basische Alkali – Erdalkali – Hydroxid – Sulfat - Mischlösungen zu bezeichnen. Die hohen Sulfatkonzentrationen, welche die Löslichkeit des Gipses weit überschreiten, sind nur durch die hohe Löslichkeit der Alkalisulfate der Klinker erklärbar. Die Ca-Konzentrationen liegen angenähert im Bereich der Sättigung einer Calciumhydroxidlösung von 42 mE/L oder knapp darunter.

Die hohen Sulfationenkonzentrationen, insbesondere des Zementes vom Typ CEM I, sind in den weiteren Untersuchungen im Zusammenhang mit der Verwendung und der Wirkung von Polycarboxylatethern (PCE) als Beton - Fließmittel näher zu

betrachten. YAMADA et al. [6] und YOSIOKA [7] hatten bei Untersuchungen zu den Ursachen der unterschiedlichen Wirksamkeit von PCE - Fließmitteln nachgewiesen, dass hohe Sulfationenkonzentrationen in den Porenlösungen die Wirksamkeit von PCE herabsetzen.

Als Ursache dafür werden Zeit-Konkurrenz-Reaktionen bei der Absorption von Sulfat- und Carboxyl-Gruppen an Zementoberflächen diskutiert. Nicht absorbierte PCE verbleiben in der Porenflüssigkeit und können sich auf die Oberflächenspannung der flüssigen Phase auswirken, was im Zusammenhang mit unseren Untersuchungen zur Wechselwirkung zwischen Porenlösung und Schalhaut von besonderem Interesse ist.

5.4 Auswahl der Schaltafeln und Präparation der Schalhautoberflächen

5.4.1 Auswahl der Schaltafeln nach dem chemischen Aufbau der polymeren Deckschichten auf der Betonseite

Für die Untersuchungen wurden folgende Arten von nicht saugenden Schaltafeln mit Polymerwerkstoff-Filmen bzw. -Folien oder als Vollkunststoff ausgewählt (Tabelle 8).

Tab. 8: Ausgewählte nicht saugende Schaltafeln mit Oberflächen aus polymeren Werkstoffen

Schaltafeltyp	Polymere Feststoffschicht	Besonderheiten
FSH	Phenolharz PH	Filmdicke entspr. 120g/m ²
FSH	Phenolharz PH	Filmdicke entspr. 360g/m ²
FSH	Phenolharz PH	Filmdicke entspr. 240g/m ²
3-Schicht-Platte	Melamin/Korund/Lack MKL	Dünnere Lackfilm
FSH	Melamin-Phenolharz MHPH	keine Angaben
FSH	Polypropylen PP	keine Angaben
Vollkunststoff	Polypropylen PP	keine Angaben
FSH	Polyurethan PU	"No-Oil-Platte"
Vollkunststoff	Polymethylmethacrylat PMMA	keine Angaben
Vollkunststoff	Polycarbonat (Macrolon) PC	keine Angaben

FSH = Furniersperrholz

5.4.2 Künstliche Alterung der Schalhautoberflächen

Im Rahmen des Verbundforschungsprojektes „Sichtbeton“ war vereinbart worden, dass die einzusetzenden Schaltafeln vor der Betonierung der Referenzprüfkörper einem künstlichen „Alterungsprozess“ zu

unterziehen sind. Damit soll im Betonlabor dem Praxisbefund Rechnung getragen werden, dass erst die Mehrfachverwendung von Schaltafeln zu reproduzierbaren Betonoberflächen führt.

Der künstliche Alterungsprozess beinhaltet folgende Bearbeitungsstufen der betonseitigen Polymerwerkstoff-Oberfläche von fabrikneuen Schaltafeln:

- Auftragen eines Zementleimes aus Referenzzement CEM II/B-S 32,5 auf die betonseitige Polymerwerkstoff-Oberfläche; Erhärtung der Zementpaste 24 h bei 20 °C mit Feuchthaltung in PE-Folientüten.
- Entfernung des erhärteten Zementleims mit einem Spachtel
- Reinigung der Oberfläche durch Behandlung mit 5 % HCl-Lösung
- Abspülen der Polymerwerkstoff-Oberfläche mit Leitungswasser und mit destilliertem Wasser
- Trocknung der Oberfläche an der Luft unter Laborklima.

5.4.3 Auftragen von Betontrennmittel auf Schalhautoberflächen

Im Rahmen des Verbundforschungsprojektes „Sichtbeton“ war vereinbart worden als Betontrennmittel ein lösemittelhaltiges Trennmittel auf der Basis von ca. 50 % Mineralölkohlenwasserstoffen (MKW) und 50 % relativ leicht verdunstbarem Lösemittel einzusetzen. Vorversuche hatten ergeben, dass eine Abdunstzeit von ca. 30 Minuten erforderlich ist, bis sich eine Massekonstanz des Ölfilms auf dem Schalhautsubstrat einstellt [8].

Der Trennmittelauftrag auf die Schaltafeln für die Betonversuche und für die Untersuchungen der Randwinkel der Porenlösungen und der Ermittlung der Grenzflächenenergie beinhaltet folgende Arbeitsstufen:

- Festlegung der angestrebten Trennmittelmenge nach Abdunstung des Lösemittels in g pro m² und Abschätzung der mittleren Dicken des Films.
- Massebestimmung der Schaltafel ohne Trennmittel
- Auftrag des Trennmittels mit einem gut getränkten Lappen
- Massebestimmung der Schaltafel mit Trennmittel sofort und über einen Zeitraum von 60 min
- Notierung der aufgetragenen Trennmittelmenge
- Berührungsfreier Einbau der Trennmitteltragenden Schalplatten in die Betonform bzw. berührungsfreie Lagerung bis zur Durchführung der Kontaktwinkelmessungen.

6 Ergebnisse von Kontaktwinkelmessungen

6.1 Ergebnisse der Bestimmung des Kontaktwinkels von reinem Wasser und von Zementporenlösungen auf fabrikneuen Schaltafeln

Für die Untersuchungen wurden bidestilliertes Wasser sowie Zementporenlösungen aus Mörteln der oben genannten Zemente CEM I, CEM II und CEM III eingesetzt. Die Porenflüssigkeit wurde nach 1-h-Hydratation mit Hilfe der Zentrifugiertechnik abgetrennt. Die Messwerte der Kontaktwinkel in Tabelle 9 sind arithmetische Mittelwerte aus jeweils 5 Einzelmessungen in X- und Y-Richtung der fabrikneuen Schalhaut-Oberflächen.

Tab. 9: Ergebnisse der Kontaktwinkelmessungen von reinem Wasser und von Zementporenlösungen (PL) auf fabrikneuen, nicht gealterten Schaltafeln

Polymertyp Oberfläche	Bidestilliertes Wasser	PL aus CEM I 42,5 R	PL aus CEM II/B-S 32,5	PL aus CEM III/A 32,5
Melaminharz MH auf 3S-Platte	66,5	67,1	65,3	65,5
Polypropylen (1) PP auf FSH	92,1	85,7	87,5	88,5
Polypropylen (2) PP auf Vollkunststoff	84,5	81,6	85,9	88,4
Phenolharz PH auf FSH	72,1	60,7	62,1	66,0
Polymethyl- methacrylat PMMA	65,0	n.b	62,9	n.b

FSH = Furniersperrholz

Die nachstehende Abbildung 6 zeigt im Vergleich die Tropfenformen von Wasser auf den Schaltafeloberflächen aus Melaminharz und Polypropylen.

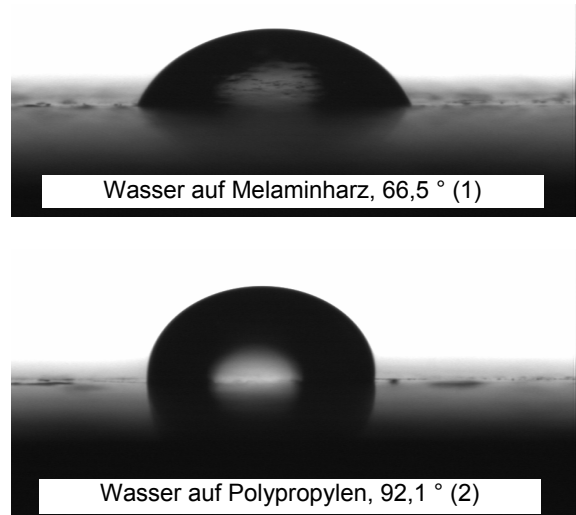


Abb. 6: Unterschiedliche Kontaktwinkelausbildung von Wasser auf Schaltafeloberflächen aus Melaminharz (1) und Polypropylen (2)

Aus Tabelle 9 sind drei wesentliche Tendenzen in der Beeinflussung der Größe der Kontaktwinkel erkennbar:

- Der dominierende Einfluss auf die Größe des Randwinkels geht von der Art des Polymerwerkstoffes aus.
- Zwischen vergleichbaren Polymerwerkstoffen, hier Polypropylen auf Schaltafeln unterschiedlicher Produzenten, sind signifikante Kontaktwinkelunterschiede messbar, die auf Unterschiede in den Oberflächeneigenschaften hinweisen.
- Reines Wasser und Zementporenlösungen aus Zementpasten ohne Zusatzmittel zeigen vergleichbare Messwerte in einem engen Streufeld. Dieser Sachverhalt ist in Übereinstimmung mit Literaturdaten über relativ geringe Abweichungen der Oberflächenspannungen von Wasser, Laugen und Salzlösungen.

Die Berechnung der Adsorptionsarbeit W_a nach FOWKES bzw. nach OWENS et al. ist nach der gegenwärtig verfügbaren Datenlage für die dispersen und die polaren Anteile der Oberflächenenergie nur für die Systeme Wasser / PP und Wasser / PMMA möglich. Polypropylen PP als typischer Polyolefin-Werkstoff besitzt praktisch keinen polaren Anteil an der Oberflächenenergie, während PMMA einen polaren Anteil von ca. 25% besitzt. Die Adsorptionsarbeit W_a von Wasser auf PP ist mit 54,8 mN/m relativ niedrig entsprechend einem großen Kontaktwinkel von 92,1°, die von Wasser auf PMMA ist mit 97,46 mN/m relativ hoch, was die stärkere Spreitung und den geringeren Kontaktwinkel von 65° erklärt.

6.2 Ergebnisse der Bestimmung des Kontaktwinkels von Zementporenlösungen auf künstlich gealterten Schalhautoberflächen ohne Trennmittel

Für die Untersuchungen wurden Zementporenlösungen aus Mörteln der oben genannten Zemente CEM I, CEM II und CEM III eingesetzt. Die Messwerte der Kontaktwinkel in Tabelle 10 sind arithmetische Mittelwerte aus jeweils 5 Einzel-messungen in X- und Y-Richtung von sowohl fabrikneuen als auch 1-mal künstlich gealterten Schalhaut-Oberflächen.

Tab.10: Ergebnisse der Kontaktwinkelmessungen von Zementporenlösungen (PL) auf fabrikneuen und auf 1-mal künstlich gealterten Schaltafeln

Polymertyp Oberfläche	Schaltafel- Vorbehandlung	PL aus CEM I 42,5 R	PL aus CEM II/B-S 32,5	PL aus CEM III/A 32,5
Melaminharz MH auf 3-S-Platte	fabrikneu	67,1	65,3	65,5
	1 x gealtert	72,3	73,3	73,5
Polypropylen (2) PP auf Vollkunst- stoff	fabrikneu	81,6	85,9	88,4
	1 x gealtert	88,0	90,3	93,1
Phenolharz PH 240g/m ² auf FSH	fabrikneu	59,0	60,4	67,3
	1 x gealtert	37,0	39,2	36,4
Phenolharz PH 120g/m ² auf FSH	fabrikneu		75,1	79,1
	1 x gealtert	40,0	36,6	67,1

FSH = Furniersperrholz

Aus Tabelle 10 sind drei wesentliche Tendenzen in der Beeinflussung der Größe der Kontaktwinkel erkennbar:

- Der dominierende Einfluss auf die Größe des Randwinkels geht von der Art des Polymerwerkstoffes aus.

- Die künstliche Alterung der Polymerwerkstoffe führt bei den unterschiedlichen Polymeroberflächen zu differenten Effekten. Bei den Melaminharz- und Polypropylenoberflächen steigen die Kontaktwinkel durch die Alterung schwach an; folglich nimmt die Oberflächenenergie der Polymerflächen in Relation zur Oberflächenspannung der flüssigen Phase ab. Bei den Phenolharzbeschichteten Furniersperrholzplatten nimmt infolge der Alterung der Kontaktwinkel sehr stark ab; die Porenflüssigkeit spreitet signifikant besser, was auf eine starke Zunahme der Oberflächenenergie der Schaltafeloberflächen hinweist.
- Die Zementporenlösungen aus Zementpasten ohne Zusatzmittel zeigen (mit einer Ausnahme) in den Größenordnungen vergleichbare Messwerte in einem engen Streuungsfeld. Dieser Sachverhalt zeigt an, dass die Art der Porenflüssigkeit bei diesen Untersuchungen keinen signifikanten Einfluss auf die Grenzflächenwechselwirkungen erkennen lässt.

6.3 Ergebnisse der Bestimmung des Kontaktwinkels von Zementporenlösungen auf künstlich gealterten Schalhautoberflächen mit Trennmittel

Für die Untersuchungen wurde die Zementporenlösung aus CEM II-Mörteln eingesetzt. Die Messwerte der Kontaktwinkel in Tabelle 11 sind arithmetische Mittelwerte aus jeweils 5 Einzelmessungen in X- und Y-Richtung der Schaltafeln. Es wurden die Messwerte der Kontaktwinkel von sowohl fabrikneuen, 1-mal künstlich gealterten und mit einem dominierend aus Mineralölkohlenwasserstoffen bestehenden Trennmittel einander gegenüber gestellt.

Tab.11: Ergebnisse der Kontaktwinkelmessungen von CEM II-B/S 32,5- Porenlösung (PL) auf fabrikneuen, auf 1-mal künstlich gealterten und mit Trennmittel versehenen Schaltafeln

Polymertyp/ Oberfläche	Randwinkel in Grad		
	fabrikneu	1-mal gealtert	1-mal gealtert plus Trennmittel MKW-Basis ²⁾
Melaminharz/Phenolharz MHPH auf FSH	81,5	71,4	66,7
Polypropylen(1) PP auf FSH	87,5	89,6	54,3
Polypropylen(2) PP auf Vollkunststoff	85,9	90,3	50,5
Phenolharz PH (360 g/m ²) auf FSF	71,7	79,3	78,9
Polymethylmethacrylat PMMA	62,9	69,6	85,0

FSH = Furniersperrholz
1) Auftragsmenge 15 g/m²

Aus Tabelle 11 sind in Bezug auf die Beeinflussung der Kontaktwinkelausbildung durch das Trennmittel folgende Tendenzen erkennbar:

- Der Trennmittelauftrag mit einem Mineralölkohlenwasserstoffzerzeugnis führt auf unterschiedlichen, gealterten Polymeroberflächen zu sehr unterschiedlichen Wirkungen.
- Das MKW-Trennmittel bewirkt auf Melaminharz-Oberflächen eine relativ geringe, auf Polypropylen-Oberflächen eine starke Abnahme des Kontaktwinkels. Der Ölauftrag ist hiermit einer stärkeren Spreitung der Porenlösung infolge einer Zunahme der Oberflächenenergie verbunden.
- Das MKW-Trennmittel bewirkt auf der hier geprüften Phenolharz-Oberfläche praktisch keine Änderung des Kontaktwinkels, während dieser beim Werkstoff PMMA stark zunimmt, was bei PMMA auf eine Abnahme der Oberflächenenergie infolge des Ölauftrages hinweist.

Fazit

- Im Fazit der Untersuchungen steht, dass der dominierende Einfluss auf die Größe des Kontaktwinkels von Porenlösungen (ohne Betonverflüssiger oder Fließmittel) von der Art des Polymerwerkstoffes ausgeht und damit folglich von der polymerspezifischen Adsorptionsenergie und damit verbunden von den dispersen und polaren Oberflächenenergieanteilen abhängig ist.
- Die künstliche Alterung der Polymerwerkstoffe führt bei den unterschiedlichen Polymeroberflächen zu sehr unterschiedlichen Effekten, die wiederum stoffspezifisch von der Wirkung der Alterung auf die Polymeroberflächen abhängen. Die maßgeblichen Einflussfaktoren auf die Alterung sind (noch) nicht bekannt.
- Der Auftrag von MKW-Trennmittel auf die Polymerflächen bewirkt beispielsweise bei PP als Polymer mit disperser Struktur und mit niedriger Adsorptionsarbeit $W_a = 54,8 \text{ mN/m}$ gegenüber Wasser eine Zunahme der Oberflächenenergie. Bei PMMA als Polymer mit hohen polaren Strukturanteilen und mit hoher Adsorptionsarbeit gegenüber Wasser $W_a = 97,46 \text{ mN/m}$ wird wegen der Zunahme des Kontaktwinkels eine Abnahme der Oberflächenenergie postuliert. Exakte Berechnungen sind dann möglich, wenn die Oberflächenenergie der pseudofesten Trennmittelfilme ermittelt wurde.
- Aufgrund der Vielzahl der Einflussfaktoren ist eine Zerlegung des Gesamtsystems in Teilsysteme erforderlich, die einzeln in Bezug auf Oberflächenspannung und Adhäsionsarbeit analysiert werden müssen. Im Ergebnis der Analyse der Grenzflächeneigenschaften wird die Korrelation zu Qualitätskriterien der Sichtbetonoberflächen, z.B. zur Porigkeit, untersucht.

7 Zusammenfassung / Schlussfolgerungen

Die Qualität von Beton mit gestalteten Oberflächen – Sichtbeton – wird nach praktischen Erfahrungen dominierend von den Grenzflächeneigenschaften des Systems Frischbeton – Schalhaut bestimmt.

Die Bearbeitung des AiF-DBV-Forschungsprojektes „Sichtbeton“ an der TU Berlin geht modellhaft von vier Arbeitsthemen aus, die durch die Stichworte Benetzungsspannung, Porenflüssigkeit, polare und disperse Oberflächenenergiebeiträge der polymeren Schaltafelwerkstoffe und pseudofeste Oberflächenfilme der Trennmittel auf der Schalhaut geprägt sind.

Im Ergebnis von drei Untersuchungsreihen unter Verwendung von drei Zementen, einem Betonverflüssiger, zehn Schalhäuten und einem Trennmittel wurden gefunden, dass Kontaktwinkelmessungen nach YOUNG und Bestimmungen der Oberflächenenergie von Polymerwerkstoffen der Schalhäute nach dem Ansatz von OWENS et al. für die Charakterisierung des Systems als geeignet erscheinen.

Aufgrund der Vielzahl der Einflussfaktoren ist eine Aufteilung des Gesamtsystems in mehrere Teilsysteme erforderlich, die einzeln in Bezug auf Oberflächenspannungen der flüssigen Phasen und Adhäsionsarbeit der Feststoffe analysiert werden müssen. Die Ergebnissen der Analyse der Grenzflächeneigenschaften werden künftig den Befunden aus den zur Zeit an anderer Stelle laufenden Forschungsarbeiten über die 2D- Bildanalyse von Sichtbetonoberflächen gegenübergestellt.

Literatur

- [1] Dickerboom, L. et al.: Wirkung von Trennmittel auf die Betonrandzone. Report 3 des VDB Verein Deutscher Betoningenieure, 16. Seiten. Im Internet unter: www.betoningenieure.de.
- [2] Silbereisen, R., Lyhs, P. und Bollmann, K.: Dokumentation der Versuchs-betonierung anlässlich der READYMIX-Veranstaltung „Synopsis 2003“ am 27.3.2003, Rüdersdorf bei Berlin.
- [3] AiF-DBV-Verbundforschungsprojekt „Sichtbeton“, 2004 bis 2005.
- [4] AiF-GFAI-Forschungsprojekt „Bildgestützte Bewertungsverfahren für Sichtbetonoberflächen“, ZUTECH-Projekt 2003 bis 2005. Kurzbegriff „Bildanalyse“.
- [5] Stanke, G., Hillemeier, B., Herr, R. und Hoske, P.: Zwischenstandsbericht zum AiF-GFAI-Forschungsprojekt „Bildanalyse“ im Rahmen des Koordinierungsgesprächs zum AiF-DBV-Verbundforschungsprojekt „Sichtbeton“ am 23.9.2004, TU Hannover, Institut für Baustoffe.
- [6] Yamada, K. et al.: (2001) Controlling of the adsorption and dispersing force of polycar-

bonat-type superplasticizer by sulphate ion concentration in aqueous phase. Cem. Concr.Res., Vol 31, S. 375 – 383.

- [7] Yosioka, K., Tazawa, E., Kawai, K. und Enohata, T.: (2002) Adsorption characteristics of superplasticizer on cement component minerals. Cem. Concr. Res. Vol. 32, S. 1507 – 1517.
- [8] Rickert, J.: Mitteilung im Rahmen des Koordinierungsgespräches zum AiF-DBV-Verbundforschungsprojekt „Sichtbeton“ am 23.9.2004, TU Hannover, Institut für Baustoffe.

Sichtbetone aus Leichtbeton

Harald S. Müller und Michael Haist

Zusammenfassung

Sichtbetone aus Leichtbeton gestatten die Ausführung von Betonbauwerken mit höchsten Anforderungen an die sichtbar bleibenden Oberflächen bei gleichzeitigem Verzicht auf eine zusätzliche Wärmedämmung. Bei der Herstellung und Verwendung von Leichtbeton zur Ausführung von Sichtbetonbauten müssen verschiedene Aspekte besonders berücksichtigt werden, die im Wesentlichen auf die Natur der verwendeten leichten Gesteinskörnung zurückzuführen sind. Dabei handelt es sich zum einen um Unterschiede im Frischbetonverhalten, die die Sichtbetoneigenschaften massiv beeinflussen können. Aber auch im erhärteten Zustand weicht das Verhalten von Leichtbeton von dem von Normalbeton deutlich ab. Neben den technischen Hintergründen für diese Unterschiede werden im vorliegenden Beitrag Empfehlungen zur Herstellung, Planung und Qualitätssicherung von Sicht-Leichtbetonen gegeben. Der Beitrag schließt mit einigen ausgewählten Projektbeispielen.

1 Einführung

Die Herstellung von Bauteilen mit besonderen Anforderungen an das Aussehen der Betonoberfläche erfordert eine nahtlose Zusammenarbeit zwischen der planenden und der ausführenden Seite, sowie ein hohes Maß an technischem Können bei der baupraktischen Umsetzung [1]. Dies gilt in besonderer Weise für Sicht-Leichtbeton, da Leichtbetone generell etwas „anspruchsvoller“ als übliche Konstruktionsbetone sind.

Wesentlich zum Verständnis der Maßnahmen bei der Planung und Ausführung von Sichtbeton ist die Tatsache, dass dessen Sichteigenschaften maßgeblich durch die Eigenschaften der Kontaktzone zwischen dem (frischen) Beton und der Schalhaut geprägt werden. Die Entwicklung und Optimierung einer Betonrezeptur muss daher immer einhergehen mit einer gezielten Auswahl von Schalung, Schalhaut und Trennmittel. Weiterhin beeinflussen der Einbau, die Verdichtung und schließlich die Nachbehandlung des Betons maßgeblich dessen Erscheinungsbild. Doch auch über die Fertigstellung eines Bauteils oder Gebäudes hinaus muss beachtet werden, dass der Beton in ständiger Wechselwirkung mit der Umgebung steht und sein Aussehen sich dementsprechend mit der Zeit verändert.

Neben seiner geringen Rohdichte bei gleichzeitig hoher Druckfestigkeit, die die Realisierung deutlich schlankerer Konstruktionen ermöglicht, sind es die guten Wärmedämmeigenschaften von Leichtbeton, die es gestatten, Bauwerke ohne zusätzlich aufgebrauchte Wärmedämmung auszuführen – eine essentielle Forderung für Sichtbeton. Insbesondere bei beidseitig sichtigen Betonflächen wird der Vorteil von Leichtbeton deutlich, da auf eine kostenintensive Kerndämmung verzichtet werden kann. Weiterhin

zeichnet sich Leichtbeton durch eine geringe Wärmedehnung aus. Zwangs- und Eigenspannungen aufgrund von Temperaturgradienten und eine daraus resultierende Rissbildung an Sichtflächen können minimiert werden, soweit hydratationsbedingte Temperaturerhöhungen in Grenzen gehalten werden.

Den genannten Vorzügen von Leichtbeton stehen jedoch auch verschiedene Nachteile gegenüber, die bei der Ausführung von Sichtbetonbauwerken besonders berücksichtigt werden müssen. So ist die oftmals unerwünschte Verformungsfähigkeit, d. h. die elastische Dehnung und das Schwinden von Leichtbeton, bedingt durch die geringere Steifigkeit der Leichtzuschläge, höher als bei normalschwerem Konstruktionsbeton. Allerdings wirkt sich der geringere E-Modul wiederum günstig auf den Auf- bzw. Abbau von Eigen- und Zwangsspannungen in Bauteilen und Baukonstruktionen aus. Leichtbetone erfordern in der Regel einen erhöhten Verarbeitungs- und Verdichtungsaufwand. Im Weiteren führt ihre geringere Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität zu einer gegenüber normalschweren Betonen erhöhten Hydratationswärmeentwicklung [2, 3, 4]. Durch geeignete Maßnahmen können jedoch hieraus resultierende nachteilige Auswirkungen auf die Festbeton- und Bauteileigenschaften vermieden werden.

Obwohl die Herstellung von Leichtbetonen in der Praxis beherrscht wird, bleibt festzustellen, dass aus der offenporigen und damit Wasser saugenden leichten Gesteinskörnung erhöhte Anforderungen in Bezug auf das Herstellen, Fördern und Verarbeiten des Frischbetons resultieren. Dies gilt insbesondere für die Herstellung von Bauteilen aus Leichtbeton mit Sichtanforderungen. Schwankungen in der Feuchte der leichten Gesteinskörnung haben ein unterschiedliches Saugvermögen zur Folge, was wiederum zu Veränderungen im Wasserzementwert und damit der Helligkeit und Farbgebung führt. So sind praktische

Maßnahmen wie ein intensives Vornässen des Zuschlags oder eine längere Mischdauer unerlässlich.

Weiterhin erweist sich die Verdichtung von Leichtbeton häufig als problematisch. Aufgrund der geringen Rohdichte der Betone und der hohen Porosität der verwendeten leichten Gesteinskörnung werden die durch Verdichtungsgeräte wie Innen- oder Außenrüttler eingetragenen Schwingungen stark gedämpft. Eine deutlich verlängerte sowie engmaschigere Verdichtung des Betons ist daher erforderlich. Im Falle der Verwendung einer stark vorgehästeten oder sogar wassergesättigten leichten Gesteinskörnung bewirkt die eingetragene Rüttelenergie unter Umständen eine Wasserabgabe des Zuschlags. Insbesondere im Bereich von Ecken und Kanten als auch auf lotrechten Flächen kann dies zur Bildung von Wasserläufern sowie zu einer Versandung der Sichtflächen führen.

Die Entwicklung hin zu selbstverdichtendem Leichtbeton (SVLB) stellte hier einen bedeutenden Innovationsschritt dar. Diese Betone können aufgrund ihres erhöhten Mehlkorngehaltes und ihrer Mehlkornzusammensetzung – anders als konventionelle Leichtbetone – problemlos per Pumpförderung eingebaut werden. Da der fehlerempfindliche Verdichtungsprozess vollständig entfällt, kann eine erhebliche Verbesserung der Bauteil- und insbesondere der Sichtqualität erzielt werden.

2 Ausgangsstoffe, Zusammensetzung und Herstellung von Sicht-Leichtbeton

Sicht-Leichtbetone unterscheiden sich von normal-schweren Sichtbetonen primär durch die Verwendung leichter, poröser Gesteinskörnungen. Der Wasserhaushalt dieser Körnungen prägt dabei maßgeblich das Betonverhalten im frischen Zustand und hat somit direkten Einfluss auf die Sichteigenschaften. Darüber hinaus führt das in den porösen Gesteinskörnern gespeicherte Wasser zu einem, von Normalbeton stark abweichenden Trocknungsverhalten und hygrischen Verformungsverhalten. Auch dies hat zum Teil weitreichende Konsequenzen für das Aussehen der Betonoberfläche. Nicht zuletzt sollte den unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften sowie dem unterschiedlichen Bruchverhalten bei der Bemessung insbesondere für Zwangs- und Eigen-spannungen Rechnung getragen werden [5].

2.1 Ausgangsstoffe

2.1.1 Leichte Gesteinskörnung

Der Schlüssel zum Verständnis des Verhaltens frischer Leichtbetone, welches in der Praxis vielfach als kritisch angesehen wird, liegt in den Eigenschaften der Leichtzuschläge. Dabei spielt deren Randzone, die in unmittelbarer Wechselwirkung mit den anderen Komponenten des Betons – vor allem Wasser und Zement steht – eine maßgebende Rolle.

Merkmale

Übliche, durch einen Bläh- bzw. Sinterprozess künstlich hergestellte leichte Gesteinskörnungen besitzen eine vergleichsweise dichte Sinterhaut und ein vernetztes Porensystem im Inneren mit Porendurchmessern zwischen ca. 20 bis 800 µm. Die Sinterhaut ist sowohl für die Frisch- als auch die Festbetoneigenschaften von entscheidender Bedeutung.

Abbildung 1 zeigt oben einen Schnitt durch ein Bläh-tonkorn und unten die Porenradienverteilung der Sinterhaut für Bläh-tonzuschläge unterschiedlicher Schüttdichte sowie für Blähglas, bestimmt mit Hilfe der Quecksilberdruckporosimetrie. Die Dichtigkeit der Sinterhaut ist dabei nicht direkt mit der Rohdichte des Zuschlagkorns verknüpft. Die Radien der Sinterhautporen variieren zwischen 0,01 und 40 µm, abhängig von der Art der Gesteinskörnung. Bei allen Bläh-tonzuschlägen sind die Poren der Sinterhaut aufgrund der vorhandenen Radien kapillar hoch aktiv.

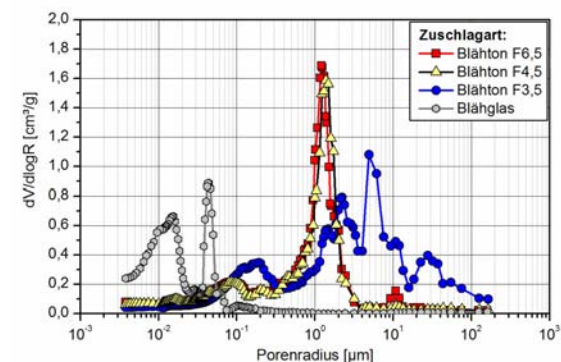


Abb. 1: Leichtzuschlagkorn in Ansicht und Querschnitt (oben) sowie Porenradienverteilung der Sinterhaut ausgewählter Leichtzuschläge im Quecksilberdruckporosimetrie-Versuch (unten)

Angetrieben durch diese Kapillarwirkung der Sinterhautporen sind Leichtzuschläge in der Lage, der Mörtelmatrix des Leichtbetons eine erhebliche Menge an Wasser bzw. Mehlkornleim zu entziehen. Bleibt dieses Verhalten bei der Betonherstellung unberücksichtigt, hat dies einen Konsistenzverlust zur Folge. Durch eine gezielte Befeuchtung der Zuschläge vor der Betonherstellung kann hingegen ein erheblicher Teil dieses Saugvorgangs vorweggenommen werden. Dabei ist die zielsichere und materialgerechte Einstellung des Vornässgrades der einzelnen Zuschläge von besonderer Bedeutung. Mit Hilfe der in DIN V 18004 aufgeführten Verfahren sollte dazu im Vorfeld der Betonherstellung zunächst

die Wasseraufnahme der Leichtzuschläge bestimmt werden. Die ermittelte Wasseraufnahme unterschätzt jedoch die in einem Mischvorgang tatsächlich mögliche Wasseraufnahme.

Bei Leichtzuschlägen mit Sinterhaut ist das Absorptionsverhalten durch eine anfangs rasche, sich dann jedoch stark verlangsamende Wasseraufnahme gekennzeichnet. Dieses Verhalten resultiert aus der im Zuschlag enthaltenen Luft, die unter dem auf das Korn wirkenden isotropen Druck bei ungestörter Wasserlagerung nicht entweichen kann. Wird der Zuschlag hingegen während des Saugvorgangs z. B. in einem Mischer bewegt, kommt es zu einer Beschleunigung des Entlüftungsvorgangs und Erhöhung der Wasseraufnahme. Die nach DIN V 18004 bestimmte 24-stündige Wasseraufnahme WA_{24} (ungestörte Wasserlagerung) an ofentrockenen Leichtzuschlägen unterschätzt somit das Absorptionsverhalten der Leichtzuschläge. Weiterhin wird beobachtet, dass kernfeuchte Leichtzuschläge mit jedoch trockener Oberfläche erhöhte Mengen an Wasser zusätzlich zur vorhandenen Kernfeuchte aufnehmen. Die Summe aus dieser Wasseraufnahme und der Ausgangsfeuchte überschreitet dabei deutlich den Prüfwert der Wasseraufnahme ofentrockener Leichtzuschläge (siehe [5]).

Vorbehandlung

Zur Einstellung eines definierten Vornässgrades von leichter Gesteinskörnung mit Sinterhaut sollte die nach DIN V 18004 ermittelte Wasseraufnahme zwar zugrunde gelegt, aber um ca. 30 - 50 % (in Abhängigkeit von der gewählten Zuschlagsart) erhöht werden. Hierbei müssen jedoch die damit verbundenen Auswirkungen auf das Festbetonverhalten (siehe Abschnitt 4) zwingend berücksichtigt werden.

Bei der praktischen Durchführung der Einstellung des Vornässgrades der Zuschläge wird zunächst deren Ausgangsfeuchte im Darrversuch nach DIN EN 1097-5 bestimmt. Die Menge des Vornässwassers berechnet sich dann aus der 1,3 bis 1,5-fachen Menge der nach DIN 18004 bestimmten Wasseraufnahme abzüglich der Ausgangsfeuchte der Gesteinskörnung. Durch gezieltes Mischen der verworbenen Leichtzuschläge mit der berechneten Menge an Vornässwasser – vor der Zugabe der restlichen Betonausgangsstoffe – wird eine definierte Zuschlagsfeuchte eingestellt. Die Praxis zeigt, dass das Vornässwasser während und im Anschluss an den Mischvorgang nahezu vollständig von der Gesteinskörnung kapillar aufgenommen wird.

In Bezug auf die Herstellung von Sicht-Leichtbeton kommt der kontrollierten Einstellung des Vornässgrades der leichten Gesteinskörnung eine große Bedeutung zu. Bei Gehalten von grober Gesteinskörnung im Beton von ca. 400 bis 800 kg/m³ und einer Wasseraufnahme von 5 bis 20 M.-% führt die Nichtbeachtung der oben beschriebenen Vorgehensweise zu erheblichen Schwankungen im Wasserzementwert. Dies hat wiederum starke Auswirkungen auf die Sichtbetoneigenschaften.

Offenporige leichte Gesteinskörnungen

Besonders stark ausgeprägt ist der Einfluss des Vornässens bei offenporiger leichter Gesteinskörnung, deren Wasseraufnahme noch weitaus größer ist als bei Zuschlägen mit Sinterhaut. Hierbei handelt es sich unter anderem um Bims, Lava, Blähton sand, Blähschiefersand und Kesselsand. Ihre Porenstruktur führt bei Kontakt mit Wasser bzw. Mehlkornleim – anders als bei Leichtzuschlägen mit Sinterhaut – sehr schnell zu einer hohen Sättigung der Körner. Aufgrund des hohen Vernetzungsgrades der einzelnen Poren kann das absorbierte Wasser jedoch nicht dauerhaft gehalten werden. Insbesondere bei sehr hohen Vornässgraden wird daher ein Teil des Wassers bei intensiver Durchmischung an die Mörtelmatrix abgegeben. Diese unkontrollierte Wasserabgabe, insbesondere unter Rüttlereinwirkung kann zu Wasserläufern und Versandungseffekten an den Sichtflächen führen. Andererseits können Schwankungen im Anmachwassergehalt durch die Pufferwirkung der offenporigen Körnungen ausgeglichen werden, wenn das leichte Zuschlagkorn nicht vollständig mit Wasser gesättigt ist. Vor diesem Hintergrund sind Vornässgrade von ca. 2/3 der Wasseraufnahme nach DIN V 18004 bei leichten Gesteinskörnungen ohne Sinterhaut empfehlenswert.

Neben dem äußerst positiven Puffervermögen besitzen Leichtsande noch einen weiteren Vorteil in Bezug auf die Herstellung von Betonen mit Sichtanforderungen. Um eine geschlossene, möglichst poren- und lunkerfreie Oberfläche in der Kontaktzone Schalhaut-Beton sicherzustellen, sollte die Zusammensetzung von Sichtbeton grundsätzlich einen erhöhten Feinteilgehalt aufweisen. Da bei Leichtsanden i. d. R. ein hoher Mehlkornanteil (Partikel $\varnothing < 0,125$ mm) vorliegt, können diese Anteile auf den Mehlkorngehalt des Betons angerechnet und somit der Gehalt an Bindemittel bzw. Zusatzstoffen entsprechend reduziert werden. Dabei ist jedoch zu bedenken, dass diese Gesteinskörnung auch die Farbgebung des Betons beeinflussen kann. Hierin unterscheiden sich Leichtbetone deutlich von Normalbeton.

2.1.2 Zement und Zusatzstoffe

In Bezug auf die zu verwendende Zementart sowie die Art der zu verwendenden Zusatzstoffe unterliegt Sicht-Leichtbeton den gleichen Anforderungen wie herkömmlicher Sichtbeton. Grundsätzlich sollte beachtet werden, dass die Farbe der Sichtbetonoberfläche stark durch die Farbe und Eigenschaften des Zementsteines bestimmt wird. Wie bereits erwähnt, muss bei Verwendung von Leichtsanden zusätzlich die Farbgebung der Feinstanteile des Sandes berücksichtigt werden.

Besondere Beachtung muss bei Leichtbeton der Hydratationswärmeentwicklung des Zements geschenkt werden. Aufgrund seiner guten Wärmedämmeigenschaften kann es insbesondere in massigen Bauteilen zu einer starken Erwärmung des

Leichtbetons kommen. Neben der daraus resultierenden Eigen- bzw. ggf. Zwangsspannungsproblematik gilt es bei Leichtbeton eine weitere Besonderheit zu beachten. Im Porenraum der leichten Gesteinskörnung sind erhebliche Mengen an Wasser gespeichert. Bei einer starken Erwärmung des Betons, dehnt sich die ebenfalls in den Körnern enthaltene Luft aus und treibt das Vornässwasser aus dem Korn. In Verbindung mit Temperaturen von über ca. 70 °C kann dies die Bildung von Sekundäretringit begünstigen. Das Quellpotential dieses Minerals hätte eine massive innere Schädigung des Betons zur Folge.

Vor diesem Hintergrund kommen bei der Herstellung von Sichtbetonbauteilen aus Leichtbeton in der Regel Zemente mit einer langsamen Festigkeitsentwicklung zum Einsatz. Besonders positiv hat sich u. a. auch die Verwendung von Steinkohlenflugasche erwiesen. Hieraus resultiert jedoch ein langsamer Erhärtungsverlauf und eine verlängerte Nachbehandlungsdauer.

Neben Flugasche können bei Sicht-Leichtbeton auch andere Zusatzstoffe eingesetzt werden. Dabei kommt Silica-Staub i. d. R. nur bei hochfesten Leichtbetonen mit einer Druckfestigkeit von $f_{ck,cube} > 55 \text{ N/mm}^2$ zum Einsatz. Verbreiteter ist die Verwendung von Pigmenten zur gezielten Beeinflussung der Betonfarbe. Hierbei sollte überprüft werden, ob die Verwendung eines Weißzements erforderlich ist. Dies gilt insbesondere bei der gleichzeitigen Verwendung von Leichtsandern mit hohem Feinteilgehalt. Selbstverständlich kann Silicastaub auch als reines Pigment eingesetzt werden. In jedem Fall gilt es vorab zu prüfen, wie sich die verwendeten Zusatzstoffe auf das Frisch- und Festbetonverhalten auswirken. So ist z. B. bekannt, dass die Zugabe von Silicastaub eine erhebliche Beeinträchtigung des Pumpverhaltens von Leichtbeton zur Folge hat (siehe auch Abschnitt 3 und [6]).

2.1.3 Zusatzmittel

Der Einsatz von Betonzusatzmitteln ist auch bei Leichtbetonen äußerst weit verbreitet. Insbesondere hochwirksame Fließmittel und Betonverflüssiger gestatten die Herstellung von Betonen mit geringen Wasserzementwerten und gleichzeitig guter Verarbeitbarkeit, zwei wichtige Randbedingungen für gute Sichtbetoneigenschaften. Bei der Wahl eines Fließmittels sollte im Vorfeld geprüft werden, wie dieses auf eine mögliche Wasserabgabe der leichten Gesteinskörnung reagiert. Oberster Grundsatz der Wahl von Zusatzmitteln ist es, einen Beton möglichst großer Robustheit bei gleichzeitig guter Verarbeitbarkeit herzustellen.

Um insbesondere Entmischungserscheinungen entgegenzuwirken, kommen bei Sicht-Leichtbeton auch häufig Stabilisierer auf Methylcellulose- oder Stärkebasis zum Einsatz. Diese greifend regulierend in den Wasserhaushalt der Betone im frischen Zustand ein und verhindern somit ein Aufschwimmen der leichten Gesteinskörnung. Im kombinierten Ein-

satz mit Pigmenten, werden Absonderungen und Anreicherungen von Pigment vermieden.

2.2 Betonzusammensetzung

Da bei Leichtbeton in der Regel die leichte Gesteinskörnung eine geringere Druckfestigkeit aufweist als die umgebende Zementsteinmatrix, kann eine Steigerung der Betondruckfestigkeit nur durch eine Abstimmung von Wasserzementwert, Bindemittelgehalt und der Art der verwendeten Gesteinskörnung erfolgen. Weiterhin ist eine gezielte Abstimmung der Dichten der Körnungen, die in einer Mischung verwendet werden, notwendig. Stark unterschiedliche Dichten der Mörtelmatrix und der groben Gesteinskörnung können Entmischungserscheinungen zur Folge haben. Vor diesem Hintergrund sind die Auswahl der Art der feinen und groben Gesteinskörnung sowie deren jeweilige Anteile eingeschränkt.

Hinzu kommen die aus der Dauerhaftigkeit und den gewünschten Oberflächeneigenschaften resultierenden Anforderungen, die ebenfalls bei der Rezepturenentwicklung berücksichtigt werden müssen. Aufgrund der Vielfalt dieser Randbedingungen ist eine pauschalisierte Angabe einer Rezeptur für einen Sicht-Leichtbeton nicht möglich. Die Mischungsentwicklung sollte sich jedoch an den im Folgenden beschriebenen Grundsätzen orientieren.

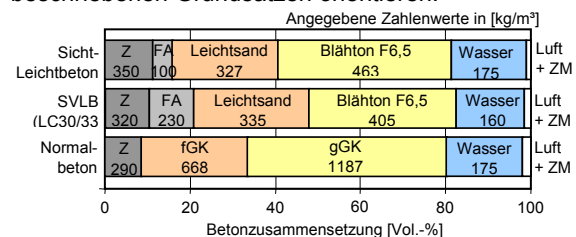


Abb. 2: Exemplarischer Vergleich der Zusammensetzung von herkömmlichem Leichtbeton LC30/33 D1,4, Selbstverdichtendem Leichtbeton SVLB LC30/33 D1,4 und Normalbeton C30/37 mit Zement (Z), Flugasche (FA), feiner Gesteinskörnung 0/2 (fGK), grober Gesteinskörnung 2/8 (gGK), Wasser und Luft

Ausgehend von den Anforderungen an das spezifische Gewicht, die mechanischen Eigenschaften und die Dauerhaftigkeit des Betons sollte zunächst eine Grundrezeptur, wie sie z. B. in Abbildung 2 für einen LC30/33 der Dichteklasse D1,4 dargestellt ist, festgelegt werden. In Abhängigkeit von der angestrebten Festigkeitsklasse muss die Art der verwendeten groben Gesteinskörnung festgelegt werden. Hierbei gilt als Grundregel, dass mit zunehmender Festigkeitsanforderung auch die Rohdichte der erforderlichen groben Gesteinskörnung zunimmt. Um dennoch die geforderte Rohdichteklasse des Betons einzuhalten ist zu klären, ob die angestrebte Rohdichteklasse noch mit einer Natursandmatrix erreicht werden kann oder ob der Natursand teilweise oder gänzlich durch Leichtsand ersetzt werden muss. Im zuletzt genannten Fall müssen die Auswirkungen auf

die Farbgebung des Betons, wie bereits im vorangegangenen Abschnitt erläutert, bedacht werden.

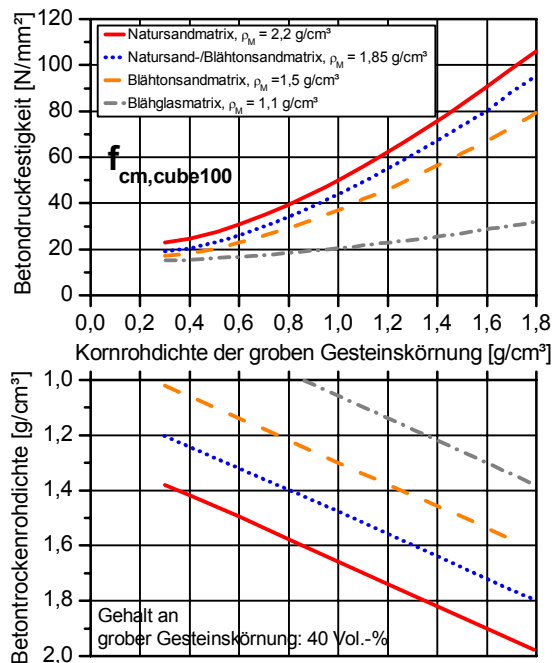


Abb. 3: Nomogramm zur Abschätzung der Druckfestigkeit und Trockenrohddichte konstruktiver Leichtbetone bei Verwendung von Hochleistungsmatrizen [5]

Als Hilfestellung können die in Abbildung 3 dargestellten Nomogramme nach Faust (siehe [5]) verwendet werden. Diese ermöglichen eine Zuordnung der zu erwartenden Würfeldruckfestigkeit zur Kornrohddichte der groben Gesteinskörnung und zur erwartenden Trockenrohddichte des Betons. Als Grundlage wird hierfür von einer Hochleistungsmatrix, mit einem effektiven Wasserzementwert von 0,4 bis 0,6 und Zementgehalten von ca. $350 kg/m^3$ ausgegangen.

Im Anschluss an die Auswahl der Art der groben und feinen leichten Gesteinskörnung sollte in einem nächsten Schritt die Zusammensetzung der Zementsteinmatrix und die Art der verwendeten Bindemittel festgelegt sowie die Menge des Mehlkorns ermittelt werden. Bei der Festlegung der erforderlichen Zementsteinfestigkeit und damit des w/z -Wertes muss zwingend die Leistungsfähigkeit der verwendeten leichten Gesteinskörnung berücksichtigt werden. Faust [5] gibt dazu Nomogramme für unterschiedliche Zement- und Zuschlagarten an, die eine Ermittlung des w/z -Wertes ermöglichen. Da weiterhin der Wasseranspruch der Gesteinskörnungen aufgrund der stark differierenden Kornform und Oberflächenstruktur und nicht zuletzt wegen des Saugverhaltens der Körnung nicht allgemein entsprechend den Fuller-Kurven angegeben werden kann, erfolgt die Ermittlung des Zement-, Zusatzstoff- und Wassergehalts durch Festlegung des Mehlkornleimgehalts, also der Summe der Volumina von Wasser, Zement, Zusatzstoff und Zusatzmittel im Beton. Mit Hilfe die-

ser Kenngröße, des w/z -Wertes und ggf. dem Anteil an Zusatzstoffen im Beton ist es möglich, die Einwaagen für einen Kubikmeter Leichtbeton zu ermitteln.

Die Zusammensetzung eines Sicht-Leichtbetons ist somit durch die Kenngrößen Wasserzementwert, Zement- und Zusatzstoffgehalt sowie durch den Vornässgrad der leichten Gesteinskörnung bestimmt. Die zuletzt genannte Kenngröße wird häufig indirekt, d. h. durch den so genannten Gesamtwassergehalt angegeben. Er errechnet sich aus der Summe des w/z -wirksamen Anmachwassers, des zugegebenen Vornässwassers und der Ausgangsfeuchte der Gesteinskörnung und ist neben dem Anmachwassergehalt eine wichtige Kenngröße für die Betoneigenschaften. Eine Überprüfung des Gesamtwassergehalts in Form eines Darrversuchs kann z. B. als Annahmekontrolle auf der Baustelle dienen. Daher empfiehlt es sich, bei der Festlegung der Betonzusammensetzung einen Sollwert einschließlich zulässiger Abweichungen für den Gesamtwassergehalt zwingend festzuschreiben. So sind ein stark unterschiedlicher Feuchtegehalt der leichten Gesteinskörnung und damit ein unterschiedliches Trocknungsverhalten, welches eine Fleckenbildung an der Sichtfläche zur Folge hätte, ausgeschlossen.

In Bezug auf die Sichteigenschaften kommt dem Leichtbeton im Vergleich zu einem gleichfesten Normalbeton sein grundsätzlich relativ hoher Bindemittelgehalt bei gleichzeitig geringem Wasserzementwert zu gute. Dabei sollte jedoch berücksichtigt werden, dass die Farbe des Betons besonders stark durch die Farbe des Mehlkorns im Beton sowie durch den w/z -Wert beeinflusst werden. Vor diesem Hintergrund ist es sinnvoll, bei der Entwicklung von Sicht-Leichtbetonen schon in einem frühen Stadium Handmuster herzustellen, die eine Einordnung der Betonfarbe gestatten. Dabei sollte beachtet werden, dass zu diesem Zweck bereits die für den späteren Einsatz vorgesehene Schalhaut und das Trennmittel zur Verwendung gelangen.

2.3 Herstellung und Transport

Wie die vorangegangenen Ausführungen zeigen, wird das Verhalten von Leichtbeton im frischen Zustand maßgeblich durch das Feuchteabsorptionsvermögen der leichten Gesteinskörnung beeinflusst. Diesem Umstand muss zwingend auch bei der Betonherstellung Rechnung getragen werden.

Bei der Verwendung dichter normalschwerer Gesteinskörnung wird in der Regel davon ausgegangen, dass die Feuchte der Gesteinskörnung an der Oberfläche der Partikel haftet und das so adsorbierte Wasser vollständig auf den Wasserzementwert angerechnet werden muss. Bei Leichtzuschlägen muss wie in Abschnitt 2.1 dargelegt, hingegen zwischen dem im porösen Kern der Gesteinskörnung gespeicherten Wasser und dem an der Kornoberfläche haftenden Wasser unterschieden werden. Dies hat zur Folge, dass die Feuchte bzw. der Wassergehalt der Gesteinskörnung nicht mit automatischen Feuch-

temesseinrichtungen erfasst werden können. Diesem gravierenden Nachteil muss durch eine, in regelmäßigen Abständen durchgeführte, manuelle Feuchtebestimmung, z. B. durch Darren einer repräsentativen Zuschlagmenge (nach DIN EN 1097-5) begegnet werden. Mit Kenntnis des Wassergehalts und des Wasseraufnahmevermögens der Körnung können somit dessen Einwaage sowie die für eine ausreichende Vornässung notwendige Menge an Vornässwasser berechnet werden.

In diesem Zusammenhang sei darauf hingewiesen, dass durch eine trockene und witterungsgeschützte Lagerung der leichten Gesteinskörnung Schwankungen in der Ausgangsfeuchte der Leichtzuschläge minimiert werden können. Weiterhin sind bei der Herstellung von Leichtbeton volumetrische Dosieranlagen von besonderem Vorteil. Eine fehlerbehaftete Einwaage der leichten Gesteinskörnung aufgrund von Schwankungen im Feuchtegehalt der Zuschläge – wegen der geringen Dichte der Gesteinskörnung führen derartige Schwankungen zu stärkeren Veränderungen der volumetrischen Zusammensetzung des Leichtbetons als bei Normalbeton – ist somit ausgeschlossen.

Im Rahmen der Betonherstellung wird zunächst die erforderliche Menge an leichter Gesteinskörnung dem Mischer zugeführt. Anschließend wird die berechnete Menge an Vornässwasser zugegeben und zusammen mit der Gesteinskörnung gemischt. Die Mischdauer sollte dabei in Abhängigkeit von der Sauggeschwindigkeit der leichten Körnung gewählt werden. In der Regel ist hier eine Vormischdauer von ca. 45 bis 60 s ausreichend. Im Anschluss daran werden Zement und Zusatzstoffe sowie das Anmachwasser und ggf. Zusatzmittel zugegeben. Die Mischdauer (d. h. nach Zugabe aller Ausgangsstoffe) ist dabei stark von der Bauart, dem Füllgrad und nicht zuletzt vom Zustand des Mixers abhängig. Die Mischdauer sollte jedoch gegenüber den Anforderungen bei der Herstellung von Normalbeton deutlich verlängert werden. Dies gilt insbesondere für Sicht-Leichtbeton. Hier ist eine optimale Durchmischung aller Ausgangsstoffe zwingend erforderlich.

Von diesem Grundsatz sollten auch die Überlegungen zur Auswahl der Mischtechnik, d. h. des Mixers geleitet sein. Da Leichtzuschläge in der Regel eine deutlich geringere Kornfestigkeit als natürliche Gesteinskörnungen aufweisen ist die Gefahr eines Kornbruchs und damit einer Veränderung der Sieblinie während des Mischvorgangs bei der Herstellung von Leichtbeton weitaus stärker ausgeprägt und sollte insbesondere bei Sicht-Leichtbeton im Vorfeld bedacht werden. In diesem Zusammenhang haben sich Ein- bzw. Zweiwellen-Trogmischer als besonders geeignet erwiesen. Aber auch Tellermischer sind für die Herstellung von Leichtbeton geeignet. Hier sollte jedoch verstärkt auf den Zustand der Mischwerkzeuge geachtet werden.

Bei der Herstellung großer Mengen an Beton für durchgehende Betonierabschnitte in Sichtbetonquali-

tät sollte der dazu verwendete Mischer ausschließlich für diese Aufgabe vorgehalten werden. Eine zwischenzeitliche Nutzung zur Herstellung anderer Betonsorten erfordert eine Zwischenreinigung des Mixers. Andernfalls kann es zu starken Verunreinigungen des Sichtbetons kommen.

Nach Beendigung des Mischvorgangs wird der Beton i. d. R. an Mischfahrzeuge abgegeben. Wie bei Sichtbeton üblich, so sollte auch bei Sicht-Leichtbeton jedes Fahrzeug einer Augenscheinprüfung hinsichtlich des Zustandes der Mischtrommel unterzogen werden. Restmengen an Beton oder gar Wasser müssen unbedingt vor Beginn des Ladevorgangs vollständig entfernt werden, um eine Verunreinigung des Betons und damit eine Verschlechterung seiner späteren Sichtqualität auszuschließen.

Im Folgenden wird die nach Ansicht der Autoren geeignete werksmäßige Vorgehensweise zur Herstellung von (Sicht-) Leichtbeton nochmals zusammengefasst:

- Prüfung der Wasseraufnahme (W_a) der leichten Gesteinskörnung und Festlegung des Vornässgrades (VG_{soll}) im Rahmen der werkseigenen Produktionskontrolle.
- Prüfung des Wassergehalts (VG_{ist}) der einzelnen Fraktionen leichter Gesteinskörnung mindestens ein Mal vor Produktionsbeginn (bei bewitterter Lagerung ggf. häufiger).
- Ermittlung der erforderlichen Masse feuchter leichter Gesteinskörnung $m_{GK,feucht}$ auf Grundlage der Mischungsberechnung ($m_{GK,tr}$ = Soll-Einwaage der trockenen Gesteinskörnung laut Mischungsberechnung):

$$m_{GK,feucht} = (1 + VG_{ist}) \cdot m_{GK,tr}$$

- Ermittlung der Masse des noch erforderlichen Vornässwassers $W_{GK,VG}$ um den festgelegten Vornässgrad VG_{soll} der Gesteinskörnung zu erreichen (Hinweise zur Festlegung siehe Abschnitt 2.1):

$$W_{GK,VG} = \begin{cases} (VG_{soll} - VG_{ist}) \cdot m_{GK,tr} & \text{für } VG_{ist} \leq VG_{soll} \\ 0 & \text{für } VG_{ist} > VG_{soll} \end{cases}$$

- Dosierung der feuchten leichten Gesteinskörnung ($m_{GK,feucht}$) und des Vornässwassers ($W_{GK,VG}$) und Mischen der Stoffe (Dauer in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit des Saugvorgangs).
- Dosierung des Zements, der Zusatzstoffe, des Anmachwassers und der Betonzusatzmittel und ausreichend langes Mischen der Komponenten.

3 Verarbeitung von Sicht-Leichtbeton

Die Verarbeitung von Konstruktionsleichtbetonen beinhaltet trotz langjähriger Verwendung dieses Baustoffs in der Praxis nach wie vor eines der Kernprobleme des konventionellen Leichtbetons. Dies

äußert sich besonders dann, wenn hohe Anforderungen an die Sichteigenschaften gestellt werden. Unter Einhaltung der in Abschnitt 2 gemachten Festlegungen bezüglich der Zusammensetzung und Herstellung sowie der nachfolgenden Ausführungen ist jedoch die Gewährleistung auch höchster Sichtanforderungen problemlos möglich. Insbesondere sollten die folgenden zwei Grundsätze bei der Verwendung von Leichtbeton berücksichtigt werden:

- Die geringe Dichte von Leichtbeton erfordert eine intensivere Verdichtung als dies bei herkömmlichem Beton der Fall ist. Da eine Über- bzw. Unterverdichtung eine Entmischung des Betons zur Folge haben können, ist ein besonders sorgfältiges und fachgerecht durchgeführtes Vorgehen erforderlich.
- Die verwendete leichte Gesteinskörnung steht im ständigen Feuchteausgleich mit der umgebenden Mehlkornleimatrix. Da eine übermäßige Wasserabgabe der Gesteinskörnung Entmischungerscheinungen bedingen würde, dürfen nur untersättigte leichte Körnungen eingesetzt werden. Unter dieser Voraussetzung wirkt das Absorptionsvermögen der Zuschläge puffernd auf Schwankungen im Anmachwassergehalt. Dies hat eine erhebliche Vergleichmäßigung der Frischbetoneigenschaften zur Folge.

Nach der Anlieferung auf der Baustelle muss der Beton zunächst gründlich im Fahrmischer aufgemischt werden (Hinweise hierzu gibt auch DIN 1045-3). Anschließend sollte eine repräsentative Probe entnommen und auf das Ausbreitmaß hin geprüft werden.

Zur Herstellung von Bauteilen mit hohen Anforderungen an das Aussehen der Betonoberfläche hat sich auch bei Sicht-Leichtbetonen die Regelkonsistenz (Konsistenzklasse F3; Ausbreitmaß a zwischen 42 und 48 cm) als sehr geeignet erwiesen. Betone mit einer derartigen Konsistenz sind robust in der Verarbeitung und die Gefahr einer Überverdichtung und damit Entmischung ist relativ gering. Von der Verwendung verdichtungsarmer Leichtbetone (Konsistenzklasse $> F6$) muss im Zusammenhang mit Sichtanforderungen hingegen dringend abgeraten werden. Die Gefahr einer Überverdichtung ist hier stark ausgeprägt. Sind derartig weiche Konsistenzen aufgrund der vorliegenden Bauteilgeometrien dennoch notwendig, so sollte die Verwendung von selbstverdichtendem Leichtbeton in Erwägung gezogen werden (siehe z. B. [7]). Wie der Name bereits sagt, entfällt bei einem derartigen Beton der Verdichtungsprozess vollständig.

Insbesondere zu Beginn eines großen Betonierabschnittes ist es weiterhin sehr ratsam, den Beton der ersten beiden Fahrzeuge auf seinen Gesamtwassergehalt hin zu prüfen (siehe auch Abschnitt 2.2). In enger Abstimmung mit dem Transportbetonwerk, können so Sollwertabweichungen des Vornässgrades oder Anmachwassergehalts schnell

festgestellt und die Wasserzugabe entsprechend korrigiert werden.

Bei langen Transportzeiten zwischen dem Herstellwerk und der Baustelle sollte überlegt werden, ob die Einstellung der Betonkonsistenz auf der Baustelle mit Hilfe einer mobilen Dosieranlage für Betonzusatzmittel erfolgen kann. Umweltbedingte Einflüsse können somit minimiert werden. Bei diesem Vorgang müssen die einschlägigen Regeln zum Dosieren von Betonzusatzmitteln in Fahrmischern beachtet werden.

Die Förderung von Sicht-Leichtbeton muss in der Regel mit dem Betonkübel erfolgen, da ein Pumpen von herkömmlichem Konstruktionsleichtbeton der empfohlenen Konsistenzklasse nicht möglich ist. Lediglich bei der Verwendung von selbstverdichtendem Leichtbeton ist eine Pumpförderung möglich. Diese wirkt sich äußerst positiv auf die Sichteigenschaften des zu betonierenden Bauteils aus, da die Betonförderung kontinuierlich erfolgen kann und somit die Gefahr einer Schüttagbildung ausgeschlossen wird. Für alle Förderungsarten gilt jedoch, dass ein Lufteintrag in den Beton durch große Fallhöhen zwingend ausgeschlossen werden muss. Beim Befüllen mit dem Betonkübel ist daher die Verwendung von Schüttrichtern und Schläuchen, mit sich nach unten verjüngendem Querschnitt anzuraten (siehe Abbildung 4).



Abb. 4: Einbau von Sicht-Leichtbeton mit dem Betonkübel über Schüttrichter mit angeschlossenen Schläuchen

Aufgrund des geringen Eigengewichts von Leichtbeton und der damit verbundenen erhöhten Verdichtungsunwilligkeit sollten die Schüttaghöhe bei wandartigen Bauteilen maximal 30 bis 40 cm betragen. Weiterhin ist eine intensive Vernadelung der einzelnen Schüttag mit der Rüttelflasche erforderlich. Abweichend von den Empfehlungen der einschlägigen Regelwerke und Merkblätter sollte der Abstand der Eintauchstellen der Rüttelflasche, in Abhängigkeit von der Frischbetonrohichte auf das fünf bis siebenfache des Rüttelflaschendurchmessers reduziert werden. Beim Einführen der Rüttelgeräte in den frischen Beton muss ein Kontakt mit der Bewehrung und der Schalhaut zwingend ausgeschlossen werden. Zu diesem Zweck hat sich die

Verwendung von PVC-Halbschalen, die als Führungsschiene für den Rüttler dienen, als besonders hilfreich erwiesen. So kann auch ein Verspritzen der Schalhaut mit Zementleim im oberen noch nicht gefüllten Teil der Schalung vermieden werden. Derartige Leimrückstände wären auf der entschalteten Betonoberfläche deutlich sichtbar.

4 Besonderheiten im Festbetonverhalten von Sicht-Leichtbeton

Besondere optische Merkmale von Oberflächen aus Leichtbeton sind primär auf das unterschiedliche Trocknungsverhalten und das von Normalbeton abweichende hygrische Verformungsverhalten zurückzuführen. Dies äußert sich z. B. in einer fein verteilten Bildung von Rissen geringster Breite (< 0,05 mm). Auch wird bei Leichtbeton eine über Jahre andauernde Trocknung beobachtet, der u. a. bei der nachträglichen Veredelung der Betonoberfläche Rechnung getragen werden muss.

4.1 Trocknungs- und hygrisches Verformungsverhalten von Sicht-Leichtbeton

Leichtbeton unterscheidet sich in seinem Trocknungs- und hygrischen Verformungsverhalten erheblich von Normalbeton. Dies ist im Wesentlichen auf das in der leichten Gesteinskörnung gespeicherte Wasser zurückzuführen, das nur sehr langsam an die umgebende Zementsteinmatrix und schließlich an die Luft abgegeben wird. Der Feuchtetransport erfolgt dabei nicht nur über das Kapillarporensystem des Zementsteins, sondern auch über die Poren der leichten Gesteinskörnung.

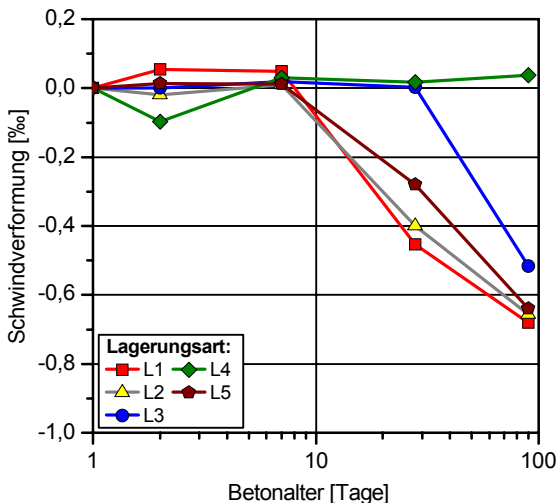


Abb. 5: Schwindverformung eines Leichtbetons bestimmt an Prismen (40x40x160 mm³) für unterschiedliche Lagerungsarten (L1: Wasserlagerung bis 7 d, anschließend Normklima; L2: Feuchtlagerung bis 7 d, anschließend Normklima; L3: Feuchtlagerung bis 28 d, anschließend Normklima; L4: versiegelte Lagerung; L5: Lagerung bei Normklima)

Charakteristisch für das hygrische Verformungsverhalten von Sicht-Leichtbeton sind Quellverformungen im frühen Betonalter, die erst bei länger andauernder Trocknung durch Schwindprozesse abgebaut werden und eine Schwindverkürzung des Bauteils zur Folge haben (siehe Abbildung 5). In Abhängigkeit vom Feuchtgradienten sind z. T. erhebliche Verformungsunterschiede in Folge von Schwinden und Quellen über den Bauteilquerschnitt zu verzeichnen. Diese führen wiederum zu Eigenspannungen und bei Überschreiten der Betonzugfestigkeit zur Bildung von Rissen.

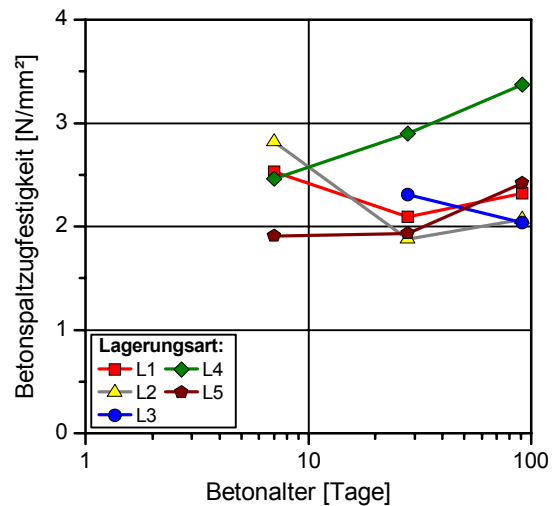


Abb. 6: Betonspaltzugfestigkeit bestimmt an Betonzylindern (Ø = 150 mm, H = 300 mm) für unterschiedliche Lagerungsarten (siehe Abbildung 5)

Bestätigt werden diese Feststellungen durch Ergebnisse der Prüfung der Spaltzugfestigkeit (siehe Abbildung 6). Die Proben, die keine Nachbehandlung erfahren haben und einer sofortigen Trocknung nach dem Entschalen ausgesetzt wurden (Lagerungsart L5) weisen eine deutlich reduzierte Spaltzugfestigkeit auf. Dies lässt auf eine Vorschädigung der Betonrandzone in Folge großer Eigenspannungen schließen. Diese Schädigung wird zwar durch eine intensive Nachbehandlung reduziert, kann jedoch nicht vollständig ausgeschlossen werden. Insbesondere in höherem Betonalter kommt es zu einem Angleich der Betonspaltzugfestigkeit für die unterschiedlichen Lagerungsarten. Eine intensive und langandauernde Betonnachbehandlung ist daher bei Sicht-Leichtbeton allein nicht ausreichend um eine Rissbildung in der oberflächennahen Randzone zu minimieren. Der Schlüssel liegt vielmehr in der Reduktion des Vorrätsgrades der leichten Gesteinskörnung und damit der Kernfeuchte des Betons.

Nach DIN 1045-1 entspricht das Schwinden des Leichtbetons der Summe aus Schrumpfen (Grundschwinden), analog jenem von Normalbeton, sowie dem Trocknungsschwinden, welches gegenüber Normalbeton um den Faktor 1,5 bzw. 1,2 (für LC 20/22 und höher) zu erhöhen ist. Dies ist sicherlich

eine sehr grobe Abschätzung für die vergleichsweise komplexe Schwindcharakteristik von Leichtbeton. Wie bereits erläutert, hängt beispielsweise die Größe des Trocknungsschwindens ganz entscheidend vom Feuchtegehalt der porösen Leichtzuschläge ab. Solange die Zuschläge im Inneren eines Betonkörpers das in ihnen gespeicherte Wasser an die hydratisierende und trocknende Zementsteinmatrix abgeben, tritt ein Quellen auf. Diese Verformung geht erst dann in ein Schwinden über, wenn das Feuchtereservoir allmählich aufgezehrt ist und die von der Oberfläche aus eintretende Trocknungsfrost das Verformungsverhalten dominiert. Ob das sich dann einstellende Endschwindmaß von Leichtbetonen tatsächlich größer als jenes von normalschweren Betonen ist, müssen zurzeit noch laufende Untersuchungen klären [8].

4.2 Mechanische Eigenschaften

Bei allen Werkstoffen hängt die Festigkeit von der Porosität ab. Abbildung 7 zeigt den Zusammenhang zwischen Festigkeit und Rohdichte für verschiedene Leichtbetone. Setzt man die Festigkeit zur Rohdichte in Relation, so weisen die Leichtbetone mit Leichtsand wesentlich höhere, also günstigere Quotienten auf.

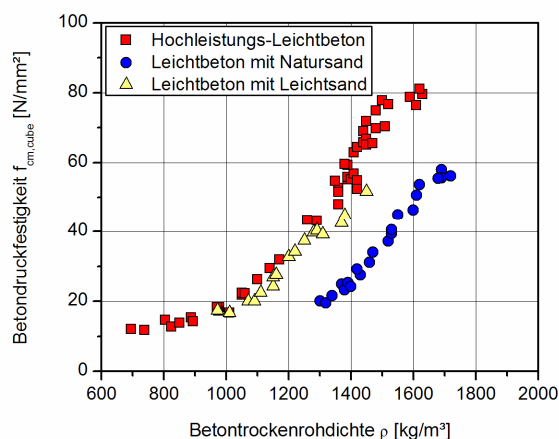


Abb.7: Betondruckfestigkeit in Abhängigkeit von der Betontrockenrohddichte (nach [3])

Der Versagensmechanismus bei Leichtbeton, der durch die Steifigkeits- und Festigkeitsunterschiede zwischen Matrix und Mörtel bestimmt wird, kann auf der Grundlage theoretischer Überlegungen anhand der Verbundwerkstofftheorie schlüssig nachvollzogen werden. Charakteristisch für das Versagen ist der Kornbruch, der in Verbindung mit der spröden Matrix zu einem überwiegend spröden Versagen des Leichtbetons führt. Dies drückt sich unter anderem in einem gegenüber Normalbeton steiler abfallenden Ast im Spannungs-Dehnungsdiagramm aus.

Mit dem spröden Materialverhalten ist eine gegenüber normalschwerem Beton ebenfalls reduzierte und von der Betondichte ρ abhängige Zugfestigkeit f_{ctm} des Leichtbetons verbunden. Diese kann nach DIN 1045-1 auf Grundlage der Zugfestigkeit eines normalschweren Betons f_{ctm} gleicher Druckfestigkeit

mit Hilfe der Beziehung $f_{lctm} = f_{ctm} \cdot (0,40 + 0,60 \cdot \rho/2200)$ abgeschätzt werden.

Weiterhin ist auch der E-Modul von Leichtbeton E_{lcm} stark von der Art der verwendeten Gesteinskörnung abhängig. Er sinkt mit abnehmender Betonrohddichte ρ und kann nach DIN 1045-1 unter Verwendung der Beziehung $E_{lcm} = E_{cm} \cdot (\rho/2200)^2$ aus dem E-Modul für normalschweren Beton E_{cm} gleicher Druckfestigkeit abgeleitet werden.

Kriechdehnungen von Leichtbeton treten in derselben Größe wie bei normalschwerem Konstruktionsbeton gleicher Festigkeitsklasse auf. Grund hierfür ist, dass die an sich zur erwartende erhöhte Kriechneigung des Leichtbetons wegen der vergleichsweise wenig steifen Leichtzuschläge durch das geringere Kriechen seiner festeren Zementsteinmatrix, die zur Erzielung eines Leichtbetons gleicher Festigkeitsklasse erforderlich ist, kompensiert wird. Der Vornässgrad der Leichtzuschläge wird zwar auch beim Kriechen eine Rolle spielen, kann hier jedoch eher als beim Schwinden vernachlässigt werden. Nach DIN 1045-1 ist die Kriechzahl φ für normalschwere Betone trotzdem mit einem von der Trockenrohddichte des Betons ρ abhängigen Faktor $\eta_E = (\rho/2200)^2$ abzumindern, da die elastische Verformung ($\varphi = \epsilon_{\text{Kriechen}}/\epsilon_{\text{elastisch}}$) mit demselben Faktor erhöht wurde (siehe Angaben zum E-Modul).

Die Wärmedehnung von Leichtbeton darf nach DIN 1045-1 gegenüber normalschwerem Beton mit dem Faktor 0,8 abgemindert werden.

4.3 Dauerhaftigkeit von Leichtbeton

Die hohe Dauerhaftigkeit von Leichtbetonen hat ihre Ursache in der dichten, gegenüber Normalbetonen eher festeren Zementsteinmatrix und dem ausgezeichneten Verbund zwischen Matrix und Zuschlagkorn. Dieser entsteht durch die Verzahnung zwischen Korn und Matrix und eine gute Hydratation im Bereich der Kontaktzone sowie eine hydraulische bzw. puzzolane Reaktion zwischen Kornoberfläche und angrenzendem Zementstein. Neuere Untersuchungen bestätigen den hohen Frost-Tau- und Frost-Tausalz-Widerstand von Leichtbetonen, die sich in der Praxis auch bei scharfer Witterungsbeanspruchung seit Jahren bewährt haben [3]. Neben den oben genannten Einflussfaktoren ist dies auch auf die Porosität der Leichtzuschläge zurückzuführen. Dem gefrierenden Wasser sowie kristallisierenden Salzen steht dadurch ein ausreichendes Volumen für die Expansion zur Verfügung. Voraussetzung hierfür ist jedoch ein moderater Vornässgrad der Leichtzuschläge.

Auch hinsichtlich des Karbonisierungsverhaltens liegen keine wesentlichen Unterschiede zum Verhalten von normalen Konstruktionsbetonen vor. Mit der in Richtlinien geforderten Erhöhung der Betondeckung wird lediglich dem Sachverhalt Rechnung getragen, dass ein den Bewehrungsstab berührendes Zuschlagkorn als Diffusionsbrücke für CO_2 wirken kann. Dies gilt insbesondere für Betone mit Leichtsandmatrix. Aufgrund des hohen Mehlkornges

halts in Verbindung mit der hohen Porosität sind diese Betone deutlich diffusionsoffener als Betone mit Natursandmatrix. Die Karbonatisierung schreitet daher für Betone mit Leichtsand rascher voran. Dennoch können für die Beurteilung der Dauerhaftigkeit von Leichtbeton die Grenzwerte für die Zusammensetzung von Beton nach DIN 1045-2 bzw. DIN EN 206-1 herangezogen werden.

4.4 Bauphysikalische Eigenschaften

Ein großer Vorteil der Leichtbetone ist ihre geringere Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität. Abbildung 8 zeigt die Wärmeleitfähigkeit von Leichtbeton in Abhängigkeit von der Betontrockenrohddichte.

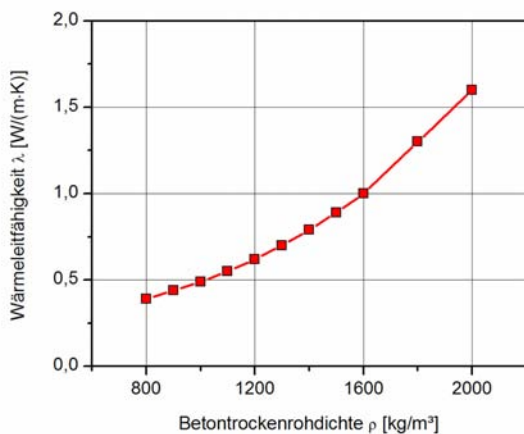


Abb. 8: Wärmeleitfähigkeit von Leichtbeton nach DIN V 4108-4

Die Feuerwiderstandsdauer von Bauteilen aus Leichtbeton ist wegen seiner geringeren Wärmeleitfähigkeit, einer kleineren Wärmedehnzahl und der erhöhten Verformbarkeit größer als bei Bauteilen aus Normalbeton. Dem bei Brandversuchen zu beobachtenden Abplatzen von Leichtbetonschichten, das durch hohe Wasserdampfdrücke, ausgehend von hohen Zuschlagfeuchtegehalten, verursacht wird, kann heutzutage durch die Zugabe von hydrophoben, niederschmelzenden Fasern wirksam begegnet werden.

5 Planung von Bauwerken aus Sicht-Leichtbeton und Qualitätssicherung

5.1 Planung

Wie die in den vorangegangenen Abschnitten gemachten Ausführungen gezeigt haben, unterscheidet sich Sicht-Leichtbeton sowohl im frischen als auch im erhärteten Zustand in einer Reihe von Aspekten von normalschwerem Sichtbeton. Diese Unterschiede müssen auch im Planungsprozess und insbesondere im Qualitätssicherungssystem der Baumaßnahme Berücksichtigung finden.

Wie bei der Planung von Bauobjekten aus Normalbeton stehen zu Beginn der Planung von Bauwerken aus Leichtbeton mit Sichtenanforderungen

zunächst rein technische Kriterien, wie die Druckfestigkeit, die Steifigkeit und die Rohdichte des Betons im Vordergrund. Entscheidungskriterium für die Wahl eines Leichtbetons mit Sichtenanforderungen ist häufig die gute Wärmedämmwirkung dieses Werkstoffes. Eine einfache Vorbemessung kann dabei mit Hilfe von Abbildung 8 erfolgen. Unter Kenntnis der anzustrebenden Betontrockenrohddichte und der festgelegten mechanischen Kenngrößen kann in einem nächsten Schritt eine Vorplanung der Betonzusammensetzung entsprechend Abschnitt 2 erfolgen. Wie bereits erläutert, muss dabei die Auswahl der Betonausgangsstoffe und der Zusammensetzung mit Blick auf die Betonfarbe und die weiteren Sichteigenschaften erfolgen.

Besondere Beachtung muss bei der Planung von Bauwerken aus Sicht-Leichtbeton der Bemessung im Hinblick Eigen- und Zwangsspannungen, die ggf. aus der abfließenden Hydratationswärme, insbesondere aber aus der hygri-schen Verformung des Betons resultieren (siehe Abschnitt 4) geschenkt werden. Obwohl diese durch geeignete betontechnologische Maßnahmen, wie sie z. B. in Abschnitt 4 aufgeführt sind, reduziert werden können, muss dieses Verformungsbestreben Eingang in die Bauteilbemessung sowie die Planung des Fugenbildes finden.

Die unter dem Überbegriff „Leichtbeton“ zusammengefassten Werkstoffe differieren in ihren Eigenschaften deutlich stärker als dies bei normalschwerem Beton der Fall ist. Dies ist auf die Tatsache zurückzuführen, dass die Betone sowohl im Hinblick auf die Sichteigenschaften als auch auf das mechanische Werkstoffverhalten stark durch die Eigenschaften der verwendeten leichten Gesteinskörnung geprägt werden. Vor diesem Hintergrund wird dringend empfohlen, bei der Ausschreibung von Objekten in Sicht-Leichtbeton auch die Art und ggf. sogar den Hersteller der leichten Gesteinskörnung von vornherein festzulegen.

Die Ausschreibung sollte nach Ansicht der Autoren somit mindestens folgende Angaben enthalten:

- erforderliche Druckfestigkeit im Bemessungsalter (bei Leichtbeton ist die Verschiebung des Bemessungsalters auf 56 Tage nicht unüblich)
- Dauerhaftigkeitsanforderungen (Expositions-klassen nach DIN 1045-2 und DIN EN 206-1 [15])
- Rohdichteklasse bzw. Zielwert der Betontrockenrohddichte
- Wärmedämmwert λ
- Farbe des Betons (ggf. unter Verweis auf ein Referenzobjekt oder Farbtabelle)
- Sichtbetonanforderungen entsprechend [1]
- Art und ggf. Herkunft der verwendeten leichten Gesteinskörnung
- Angaben zur Gestaltung des Qualitätssicherungssystems

5.2 Qualitätssicherung

Wie auch bei normalschwerem Sichtbeton ist ein funktionierendes und sich über alle Phasen und Teile des Bauablaufs erstreckendes Qualitätssicherungssystem Grundlage für die erfolgreiche Ausführung von Sichtbetonbauwerken. Im Folgenden wird auf die Besonderheiten von Sicht-Leichtbeton eingegangen.

Die Eigenschaften und insbesondere Sichteigenschaften von Leichtbeton werden maßgeblich durch das Saugverhalten und den Sättigungsgrad der leichten Gesteinskörnung beeinflusst. Vor diesem Hintergrund ist eine lückenlose Überwachung des Absorptionsvermögens und des Feuchtegehaltes der leichten Gesteinskörnung notwendig. Dazu geeignete Maßnahmen wurden in Abschnitt 2 vorgestellt. Auch nach Ankunft des Betons auf der Baustelle ist ein erhöhter Qualitätssicherungsbedarf gegeben. So sollten zu Beginn jedes Betonierabschnittes der Gesamtwassergehalt und bei jedem Fahrzeug das Ausbreitmaß des Betons geprüft werden.

Stärker noch als bei herkömmlichem Sichtbeton hängt die Qualität von Bauteilen aus Sicht-Leichtbeton von den handwerklichen Fähigkeiten und der Erfahrung des einbauenden Personals ab. Eine intensive Schulung der Einbaukolonnen ist daher unabdingbar. Gleichzeitig sollte die Vorgehensweise beim Betoneinbau nicht nur im Rahmen der Erstellung von Referenzflächen sondern z. B. auch bei der Erstellung von Bereichen, bei denen zunächst keine Sichtenanforderungen bestehen, geübt werden. Die Erfahrung zeigt deutlich, dass die damit verbundenen Mehrkosten durch die Verbesserung der Sichtbetonqualität und damit den Wegfall von Nacharbeiten und Betonkosmetik mehr als aufgewogen werden.

Ein weiterer wesentlicher Aspekt bei der Qualitätssicherung von Sicht-Leichtbeton stellt die Überwachung der Betonnachbehandlung dar. Diese muss neben einem reinen Schutz gegen Austrocknung auch zwingend Vorkehrungen gegen eine mechanische Beschädigung der frischen Bauteile enthalten. Diese sind ggf. bis zum Abschluss der Baumaßnahme aufrecht zu erhalten. Mit Blick auf die ausgeprägte Eigen- und Zwangsspannungsproblematik sollte weiterhin ein Schutz gegen Verdunstung möglichst lange vorgesehen werden. Hier gelten die einschlägigen Regeln wie bei normalschwerem Sichtbeton.

6 Ausgeführte Bauwerke in Sicht-Leichtbeton

Im Folgenden werden einige neuere Anwendungen bzw. Bauwerke, bei denen die Autoren beratend tätig waren, vorgestellt. Hierbei handelt es sich um das Land- und Amtsgericht des Landes Brandenburg in Frankfurt (Oder) sowie das Ökumenische Kirchenzentrum Freiburg-Rieselfeld. Beiden Bauwerken ist gemeinsam, dass der verwendete Leichtbeton als Sichtbeton ausgeführt wurde und neben der Tragfunktion gleichzeitig die volle Wärmedämmung des

Gebäudes übernimmt. Beispielhaft für die Verwendung von Leichtbeton im Fertigteilbereich wird die Volkswagen Arena in Wolfsburg kurz vorgestellt.

6.1 Land- und Amtsgericht Frankfurt (Oder)

Das Land- und Amtsgericht des Landes Brandenburg in Frankfurt (Oder) wurde nach einem Entwurf des Architekturbüros Bumiller Architekten (Berlin) gebaut. Alle Außenwände wurden mit einem Leichtbeton der Festigkeitsklasse LC16/18 und der Rohdichteklasse D1,2 ausgeführt. Da die Wärmedämmung des Bauwerkes allein durch die geringe Wärmeleitfähigkeit des Betons von $\lambda_R \leq 0,54 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ sicherzustellen war, wurden in bestimmten Bereichen Wandstärken von bis zu 70 cm erforderlich.

Eine weitere wesentliche Anforderung stellte die geforderte Sichtbetonqualität dar. Im Rahmen der Erstellung verschiedener Referenzflächen wurden alle für die Beurteilung der Ansichtsflächen relevanten Parameter festgelegt. Neben einer möglichst ebenen und glatten Oberfläche sollten die Sichtflächen weitgehend poren- sowie lunckerfrei ausgeführt werden.



Abb. 9: Ansicht und Details des Land- und Amtsgerichts Frankfurt (Oder) [Quelle: PICHLER Ingenieure GmbH, Andreas Schulz]

Unter Beachtung der oben aufgeführten Randbedingungen sowie der spezifischen Anforderungen an die Farbgebung des Betons wurde eine Rezeptur entwickelt, mit der die geforderten Sichtbetoneigenschaften erfüllt sowie die mechanischen, bauphysikalischen und ästhetischen Eigenschaften sichergestellt werden konnten. Da alle genannten Eigenschaften ebenfalls stark von der Qualität der Ausführung der Betonarbeiten abhängig sind, wurde ein weiterer Schwerpunkt der Betonentwicklung auf die Sicherstellung robuster Frischbetoneigenschaften gelegt.

Zur Gewährleistung der notwendigen Betontrockenrohdichte von $< 1,2 \text{ kg/dm}^3$ wurde Blähton-Leichtzuschlag F3 (Schüttdichte 300 kg/m^3) in Verbindung mit einer Leichtsandmatrix mit Blähtonsand der Fa. Liapor verwendet. Um trotz der geringen Druckfestigkeit der verwendeten leichten Gesteinskörnung die erforderlichen mechanischen Eigenschaften des Betons sicherzustellen, wurde der Zementgehalt auf 360 kg/m^3 in Verbindung mit 80 kg/m^3 Flugasche eingestellt. Der dabei gewählte Hochofenzement CEM III/A 42,5 R trug der Farbgebung des Betons sowie der Minimierung der Hydratationswärmeentwicklung im Bauteil Rechnung. Der äquivalente Wasserzementwert des Betons betrug 0,46.

Die Betonbereitung erfolgte in einer Sternanlage mittels eines Tellermischers. Leider war bei diesem Anlagentyp eine witterungsgeschützte Lagerung der Leichtzuschläge nicht möglich. Dies erforderte eine lückenlose Überwachung der Ausgangsfeuchte der leichten Gesteinskörnung.

Wie bereits oben ausgeführt wurde, erfordert die fachgerechte Verdichtung von Leichtbeton ein hohes Maß an Erfahrung. Um insbesondere Entmischungsercheinungen und Ausblutungen in Folge einer Überverdichtung zu vermeiden, wurde die Betonkonsistenz auf $48 \pm 2 \text{ cm}$ bei der Anlieferung auf der Baustelle eingestellt. Weiterhin wurde zur Gewährleistung einer ausreichenden und möglichst gleich bleibenden Betonkonsistenz ein Teil des Fließmittels mit einer mobilen Dosieranlage auf der Baustelle zugegeben. Der Einbau des Betons erfolgte mittels Betonkübel.

Abbildung 9 zeigt das von Pichler Ingenieure GmbH geplante und von der Bauunternehmung E. Heitkamp GmbH ausgeführte Bauwerk in einer Gesamtansicht sowie in verschiedenen Details.

6.2 Ökumenisches Kirchenzentrum Freiburg-Rieselfeld

Das Ökumenische Kirchenzentrum Freiburg beherbergt die evangelische Maria-Magdalena und die katholische St. Maria Magdalena Gemeinde und wurde vom Architekturbüro Kister, Scheithauer und Gross geplant sowie durch die Bauunternehmung Füssler im Jahr 2004 fertig gestellt. Ein Blick auf den in Abbildung 10 dargestellten Grundriss und verschiedene Ansichten des Bauwerks verdeutlicht die enorme Herausforderung bei der Planung und Ausführung dieses Gebäudes (siehe auch [9]). Neben einer Vielzahl von verschiedenen Fensteröffnungen und Durchgängen sind die Außen- und Innenwände des Gebäudes unterschiedlich stark geneigt. Weiterhin ist der Kirchenraum durch zwei verschiebbare Wände aus Stahlbeton teilbar, um somit auch getrennte Veranstaltungen der einzelnen Konfessionsgemeinschaften gleichzeitig zu ermöglichen.

Für die Ausführung des Bauwerks war ein Beton LC25/28 der Dichteklasse D1,6 mit spezifischen Anforderungen an bauphysikalische, ästhetische sowie anwendungstechnische Eigenschaften vorgesehen. Die aus der gefalteten Gebäudegeometrie resultierenden Bauteilabmessungen erforderten einen sehr gut verarbeitbaren und gleichzeitig sehr robusten Beton. Im Rahmen der Erstellung von Referenzflächen in Form von Musterwänden wurden weiterhin die in einem warmen Grauton angesiedelte Farbe, die Oberflächenbeschaffenheit der Bauteile sowie alle anderen für die Erstellung von Bauwerken in Sichtbeton relevanten Aspekte festgelegt.

Vor diesem Hintergrund wurde im Vorfeld der Baumaßnahme eine Betonrezeptur mit den Komponenten CEM II/A-LL 42,5 R, Flugasche, Bimssand der Korngruppe 0/2 mm, Blähton der Schüttdichte

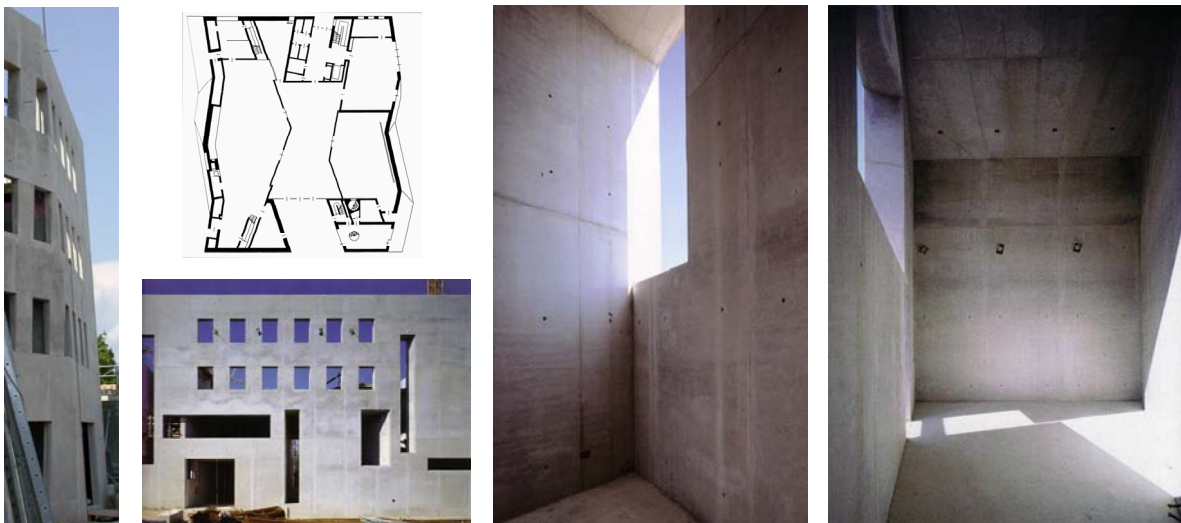


Abb. 10: Ansicht und Grundriss sowie verschiedene Details des Ökumenischen Kirchenzentrums Freiburg-Rieselfeld [Quellen: IfMB, DAM Jahrbuch 2003]

650 kg/m³ und der Korngruppe 4/8 mm und Lava-Zuschlag der Korngruppe 8/16 mm entwickelt. Der äquivalente Wasserzementwert der Mischung betrug 0,38. Neben einem Verzögerer kam als weiteres Zusatzmittel Fließmittel (Zugabe im Werk) zum Einsatz.

Alle leichten Ausgangsstoffe wurden im Herstellwerk witterungsgeschützt gelagert und vor der Verwendung auf den festgelegten Zielwert der Ausgangsfeuchte eingestellt. Nach dem zum Teil bis zu 60-minütigen Transport auf die Baustelle wurde der Beton einer Sichtprüfung und gegebenenfalls weitergehenden Prüfung unterzogen, bevor der Einbau mittels Betonkübel erfolgte. Um große Fallhöhen und damit Entmischungen zu vermeiden, wurde der Beton über Hosenrohre in die Schalung gefüllt. Die Betonverdichtung erfolgte mittels Rüttelflaschen in einem engliegenden Raster. Unter Verwendung spezieller Führungsschalen, die die Rüttelflaschen zum eingebrachten Beton führten, konnte ein Kontakt zwischen Rüttler und Bewehrung bzw. Schalhaut ausgeschlossen werden.

Die in Abbildung 10 dargestellten Ansichten und Details belegen, dass mit Leichtbeton auch unter äußerst schwierigen Bedingungen Bauwerke in Sichtbetonqualität erstellt werden können. Durch die geringe Wärmeleitfähigkeit des Betons von $\lambda_R \leq 0,56 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ist zudem keine zusätzliche Wärmedämmung des Bauwerks erforderlich.

6.3 Volkswagen Arena in Wolfsburg

Beim Bau der Volkswagen Arena in Wolfsburg kamen im Gegensatz zu den zuvor vorgestellten Bauwerken Betonfertigteile aus einem Konstruktionsleichtbeton der Festigkeitsklasse LC25/28 und der Rohdichteklasse D1,6 zum Einsatz. Ausschlaggebend für die Verwendung von Leichtbeton war hier eine Minimierung der statischen Lasten im Bereich der Tribünenträger des Stadions. Hierbei galt es, großen dynamischen Beanspruchungen, wie sie zum Beispiel bei Pop-Konzerten auftreten, die ebenfalls in der Arena veranstaltet werden, Rechnung zu tragen.

Abbildung 11 zeigt eine Ansicht des Stadions sowie zwei Details der mit Leichtbeton erstellten Bauteile. Zum einen handelt es sich dabei um h-förmige Elemente für die Stadionrundgänge, die Abmessungen von 9,5 x 2,0 x 1,5 m³ besaßen. Weiterhin bilden T-förmige Elemente mit den Abmessungen 9,0 x 4,0 x 1,0 m³ die obere Tribünenabschlusswand.

Alle grundsätzlich sehr hoch bewehrten Bauteile wurden in Sichtbetonqualität ausgeführt. Bei dem verwendeten Beton LC25/28 kam ein Zement CEM I 42,5 R in Verbindung mit Flugasche sowie Blähton-Leichtzuschlag der Firma Liapor Vintřov der Korngruppen 0-1 mm, 1-4 mm und 4-8 mm zum Einsatz. Der statische Elastizitätsmodul des Betons betrug 19500 N/mm².

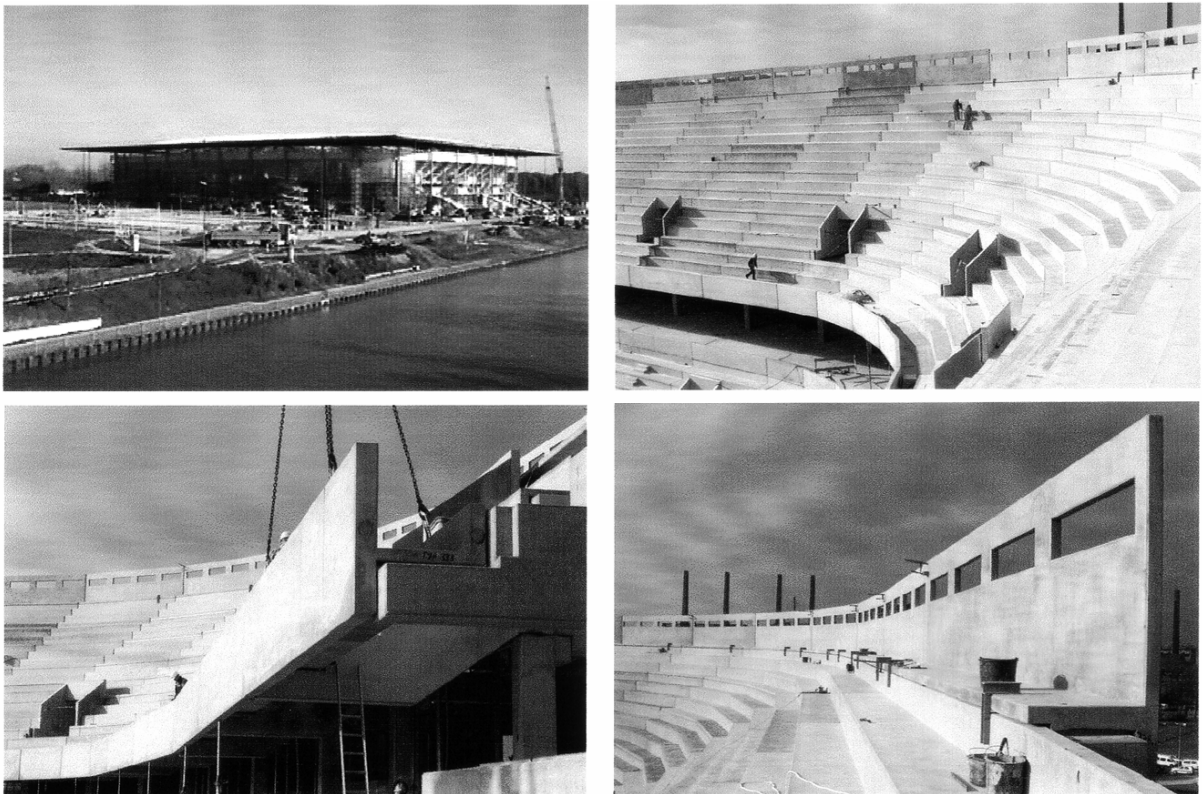


Abb. 11: Ansicht und Details der Volkswagen Arena in Wolfsburg [Quellen: VfL Wolfsburg, Liapor]

Das Beispiel Volkswagen Arena zeigt, dass die Verwendung von Betonfertigteilen aus Leichtbeton erhebliche Vorteile bietet. Hierbei stellt auch das gegenüber Bauteilen aus normalschwerem Beton geringere Transportgewicht einen nicht unbedeutenden Aspekt dar.

7 Zusammenfassung

Der vorliegende Beitrag zeigt, dass Leichtbetone eine Reihe technologischer Vorzüge aber auch Nachteile in Bezug auf die Erstellung von Bauwerken mit Sichtenanforderungen aufweisen. Dabei ermöglichen insbesondere die guten Wärmmedämmeigenschaften dieses Werkstoffes die kostengünstige Erstellung von beidseitig sichtbaren Wänden, da auf eine aufwändige Kerndämmung verzichtet werden kann.

Unterschiede zu Normalbeton im Frischbetonverhalten sowie den mechanischen Eigenschaften und dem hygrischen Verformungsverhalten sind primär auf die zur Herstellung von Sicht-Leichtbeton verwendete poröse leichte Gesteinskörnung zurückzuführen. Diese absorbiert zum Teil erhebliche Mengen an Wasser. Sofern dieser Vorgang nicht durch ein gezieltes Vornässen der Gesteinskörnung vor Mischbeginn vorweggenommen wurde, ist ein erheblicher Konsistenzverlust die Folge.

Im erhärteten Zustand wird das in der Gesteinskörnung gespeicherte Wasser über einen sehr langen Zeitraum an die Zementsteinmatrix abgegeben. Eigen- und Zwangsspannungen über den Bauteilquerschnitt sind die Folge. Vor diesem Hintergrund sollte das Vornässen der Gesteinskörnung nach dem Grundsatz „So viel wie nötig, so wenig wie möglich!“ erfolgen. Entsprechende Regeln wurden hier angegeben.

Die abschließend aufgeführten Beispiele belegen, dass es mit Leichtbeton problemlos möglich ist, Bauwerke auch mit höchsten Anforderungen an die Sichtflächen zu realisieren. Dabei können die in diesem Aufsatz ausgesprochenen Empfehlungen als Hilfestellung dienen.

8 Literatur

- [1] Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e. V.: Merkblatt Sichtbeton. Fassung August 2004
- [2] Weigler, H., Karl, S.: Beton - Arten, Herstellung, Eigenschaften. Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 1989
- [3] Thienel, K.-Ch.: Materialtechnologische Eigenschaften der Leichtbetone aus Blähton. Technologie und Anwendung der Baustoffe, Festschrift Prof. Rostásy, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 1992
- [4] Held, M.: Hochfester Konstruktions-Leichtbeton. Beton, Band 46, Heft 7, 1996
- [5] Faust, Th.: Leichtbeton im Konstruktiven Ingenieurbau. Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 2003
- [6] Müller, H. S., Haist, M.: Bauwerkertüchtigung mit pumpbarem selbstverdichtenden Leichtbeton. Abschlussbericht zum Forschungsprojekt. Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, Universität Karlsruhe (TH), 2004
- [7] Müller, H. S., Haist, M.: Selbstverdichtender Leichtbeton – Erste allgemeine bau-aufsichtliche Zulassung. In: Betonwerk + Fertigteil-Technik, 70, Heft 12, 2004, S. 8-17
- [8] Müller, H. S.; Kvitsel, V.: Kriech- und Schwindbeiwerte für normalfeste und hochfeste Konstruktionsleichtbetone. Forschungsvorhaben V 402 des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb), Veröffentlichung in der Schriftenreihe des DAfStb vorgesehen
- [9] Holl, Ch., Müller, H. S., Haist, M., Günter, M.: Schutzbau und Auffanggefäß – Doppelkirche für zwei Konfessionen in Freiburg-Rieselfeld. In: db Deutsche Bauzeitung, 138. Jhr., Heft 11, 2004, S. 36-45

Sichtbeton – Möglichkeiten der Mängelbeseitigung und Instandsetzung

Martin Günter

Zusammenfassung

Je nach Art und Ausprägung reichen die Möglichkeiten der Beseitigung von Unregelmäßigkeiten an neu erstellten und alten Sichtbetonflächen vom behutsamen Reinigen mit mechanischen und chemischen Verfahren über sog. Kratz- oder Lunkerspachtelungen bis zum Austausch unzureichend gelungener Querschnittsbereiche bzw. Bauteiloberflächen. Manche Unregelmäßigkeiten gehören zum spezifischen Erscheinungsbild des Baustoffs Beton, weshalb kein Anlass besteht, diese zu beseitigen. Andere Unregelmäßigkeiten können aus technischen Gründen nicht behoben werden. Um Verschlechterungen des Erscheinungsbildes zu vermeiden, sollten auch dort keine Beseitigungsversuche unternommen werden. Viele Unregelmäßigkeiten verschwinden oder verlieren ohnehin im Zuge der Alterung ihre Bedeutung für den Gesamteindruck der Sichtflächen. Bei alten Sichtbetonbauwerken sollten die Maßnahmen in jedem Fall auf vorhandene Schäden oder auf Stellen beschränkt werden, die in absehbarer Zeit zum Schaden führen können. Bei alten Bauwerken gehören viele bauzeitliche Mängel bereits zum akzeptierten Erscheinungsbild und sind mittlerweile Bestandteil der Patina der Bauwerksoberflächen. Bei der Mängelbeseitigung bzw. Instandsetzung müssen Materialien verwendet werden, die in ihren technologischen und in ihren das Erscheinungsbild betreffenden Eigenschaften eng auf den Bestand abgestimmt sind. Der Einsatz kommerzieller Materialien scheidet daher in vielen Fällen aus und es sind spezielle Materialien zu entwickeln. Als Grundlage hierfür sind Recherchen in den Bauunterlagen und Voruntersuchungen am Bauwerk erforderlich. Die Materialien sollten möglichst aus originalen Bestandteilen des Betons zusammengesetzt werden. Die Vorgehensweise bei der Ausführung der Arbeiten und bei der Abstimmung der erforderlichen Materialeigenschaften auf den Bestand wird aufgezeigt.

1 Allgemeines

Trotz hoher Sorgfalt gelingt es nicht immer, Sichtbetonbauteile so herzustellen, dass deren Erscheinungsbild allen Erwartungen der am Bau Beteiligten entspricht. Sofern die aufgetretenen Unregelmäßigkeiten als Mängel zu definieren sind, muss entschieden werden, ob und auf welche Art und Weise diese zu beheben sind [1].

Im Verlauf der Standzeit ist das Sichtbetonbauteil witterungs- und nutzungsbedingten Beanspruchungen ausgesetzt, die zu einer Alterung der Bauteilrandzonen führen. In diesem Fall gilt es zu bewerten, welche der im Zuge der Alterung aufgetretenen Unregelmäßigkeiten als Schäden zu definieren sind und aus welchen Unregelmäßigkeiten zukünftig Schäden und eine Reduktion der Dauerhaftigkeit, Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit des Bauteils resultieren können. Der Konzeption des Bauwerks folgend wird man i. d. R. bestrebt sein, bei den Instandsetzungen den Sichtbeton zu erhalten [2].

Im vorliegenden Beitrag sollen verschiedene Möglichkeiten der Mängelbeseitigung und Instandsetzung von jungen und alten Sichtbetonbauteilen und -bauwerken aufgezeigt werden.

2 Häufige Unregelmäßigkeiten

2.1 Das Erscheinungsbild betreffende Unregelmäßigkeiten

Eine Zusammenstellung häufiger Unregelmäßigkeiten an Sichtbetonflächen enthält Tabelle 1, Spalten 1 und 2. Je nach vereinbarter Beschaffenheit der Sichtbetonflächen stellen diese einen mehr oder weniger großen Mangel bzw. Schaden dar. Einige Unregelmäßigkeiten gehören baustoffbedingt zum Erscheinungsbild von Sichtbeton oder sind praktisch nicht vermeidbar.

2.2 Die Technik betreffende Unregelmäßigkeiten

Die Technik betreffende Unregelmäßigkeiten sind nicht immer oberflächlich erkennbar und erfordern spezifische Bauteil- oder Bauwerksuntersuchungen. Ob aus ihnen, falls sie es nicht schon sind, Schäden erwachsen können, muss aufbauend auf detaillierten Bauwerksuntersuchungen gutachterlich bewertet werden, siehe hierzu [2, 3].

3 Ablauf von Mängelbeseitigungs- und Instandsetzungsmaßnahmen

Grundvoraussetzung für den Erfolg der Maßnahmen ist eine sorgfältige Recherche der Bauwerksdaten und Bauteileigenschaften. Sind diese Informationen bei

Neubauten aus Plänen, Leistungsverzeichnissen, Bautagebüchern und Lieferscheinen noch relativ leicht zu beschaffen, so müssen sie bei älteren Bauwerken aufgrund der häufig nicht mehr vorhandenen Bauunterlagen und wegen der eingetretenen Alterung mit Hilfe

spezifischer Bauwerksuntersuchungen ermittelt werden. Hierbei müssen anhand von Erkundungen vor Ort und Untersuchungen im Labor auch die Ursachen der aufgetretenen Unregelmäßigkeiten geklärt werden.

Tab. 1: Häufige Unregelmäßigkeiten an Sichtbetonflächen

Art	Auslösende Mechanismen	Erscheinungsformen (Beispiele)	Technik der Mangelbeseitigung bzw. Instandsetzung ¹⁾
Abweichung von der Geometrie bzw. Textur	Unzulängliche Schalungskonstruktion, Frischbetondruck, Verunreinigungen der Schalhaut, Beschädigungen der Schalhaut	Wellige Oberfläche, Schalfugenversätze, lokale Vertiefungen und Erhöhungen	Steinmetztechnische Bearbeitung, Spachteln, Betonaustausch
Farbtonunterschiede	Lokal unterschiedliche Absorption / Reflexion von Licht aufgrund lokal variierender - Mischungsverhältnisse des Betons - Erhärtungsbedingungen - Mikrotextur der Oberfläche - Belagbildung - Infiltration von Flüssigkeiten	Marmorierungen, großflächige Hell- / Dunkelunterschiede	(Reinigen), steinmetztechnische Bearbeitung
Beläge	Ausscheidung aus dem Beton, Ablagerungen aus der Umwelt, Bewuchs	Aussinterungen, Ausblühungen, „Rostfahnen“, Verschmutzungen	Reinigen, steinmetztechnische Bearbeitung
Infiltrationen	Eindringen von Flüssigkeiten	Ölflecken	(Reinigen), steinmetztechnische Bearbeitung, Betonaustausch
Fehlstellen in der Oberfläche	Unzureichende Verdichtung, Einschlüsse zwischen Schalhaut und Beton (Luft, Wasser, Eiskristalle), Absonderung von Anmachwasser, Zementleimverlust, Schrumpfen des Zementsteins, schlechte Trennwirkung der Schalhaut	Isolierte Luftporen, raue Oberflächen, „Flusstäler“, „Wasserläufer“, „ausgeblutete“ Kanten, Schalhautstöße etc., fehlende Zementhaut, feine Netzrisse	Spachteln, steinmetztechnische Bearbeitung
Gefügeschäden	Unzureichende Verdichtung, starke Feinmörtelverluste, Grobzuschlagagglomerationen, Setzen des Frischbetons, Zwangsspannungen, Trocknungsschwinden, Frost, mechanische Einwirkungen, Korrosion der Bewehrung	Hohlräume, Kiesnester, Randzonen- und Querschnittsrisse, Abwitterungen, Abplatzungen, Schürfungen, Kantenabbrüche	Betonaustausch, Risse- bzw. Hohlraumfüllung
Eingeschränkte Tragfähigkeit, Dauerhaftigkeit	Zu geringe Festigkeit, zu geringe Betondeckung, zu hohe Permeabilität	Absandungen, Abwitterungen, Bewehrungskorrosion, Abplatzungen	Spezifische Bauwerksuntersuchungen, gutachterliche Bewertungen, Prognose, „behutsame“ Maßnahmen

¹⁾ Maßnahmen sollten nur ergriffen werden, wenn sie zielführend sind und wenn die Unregelmäßigkeit als Mangel zu bewerten ist. Dies erfordert entsprechende Voruntersuchungen und Bewertungen. Die Aufstellung gibt Hinweise auf mögliche, i. d. R. zielführende Maßnahmen.

Aufbauend auf den Ergebnissen der Voruntersuchungen sind die Möglichkeiten der Mängelbeseitigung bzw. Instandsetzung darzulegen und zu diskutieren. Die vielversprechendsten Möglichkeiten sind am Bauwerk zu erproben und zu optimieren, bevor entschieden wird, welche Maßnahmen letztendlich umgesetzt werden. Die gewählte Vorgehensweise ist in Arbeitsanweisungen bzw. Leistungsverzeichnissen detailliert zu beschreiben. Die Umsetzung der Maßnahmen muss intensiv betreut, überwacht und schließlich abgeschlossen werden.

Die Systematik des Vorgehens bei der Durchführung von Mängelbeseitigungs- bzw. Ausbesserungsmaßnahmen an Neubauten ist in [1] dokumentiert. Detaillierte Angaben zur Vorgehensweise bei der Instandsetzung von architektonisch bedeutsamen Sichtbetonbauteilen enthalten [4, 5, 6, 7].

4 Techniken der Mängelbeseitigung und Instandsetzung

Aufgrund ihrer Entstehungsmechanismen können einige der in Tabelle 1 genannten Unregelmäßigkeiten nicht oder nicht vollständig behoben werden. Dies gilt insbesondere für Farbtonunterschiede und Infiltrationen.

Vor Sicherheit über den Erfolg sollten jegliche Beseitigungsversuche unterbleiben, da oft erst durch die hierbei verursachten Erscheinungsbilder das Auge des Betrachters auf die Unregelmäßigkeit bzw. den Mangel gelenkt wird. Dies gilt um so mehr, als damit gerechnet werden kann, dass viele Farbtonunterschiede im Laufe der Zeit verschwinden oder doch zumindest reduziert werden oder ein „Selbstreinigungs- und Heilungsprozess“ der Sichtbetonoberfläche stattfindet. Warten oder nichts tun kann daher oft besser sein, als voreiliges Handeln.

Bei Vorliegen eingeschränkter Tragfähigkeit oder Dauerhaftigkeit sind spezifische Bauwerksuntersuchungen und Analysen erforderlich, um angemessene und mit der Sichtbetonkonzeption verträgliche Maßnahmen festzulegen; siehe z. B. [3].

Sind Maßnahmen erfolgversprechend, was mit Hilfe einer Ursachenanalyse der Unregelmäßigkeiten geklärt werden kann, so können die nachfolgend beschriebenen Techniken angewendet werden.

In Tabelle 1 wurden die Techniken den einzelnen, häufig vorliegenden Unregelmäßigkeiten zugeordnet. Diese Zuordnung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit und kann nur als erster Hinweis auf mögliche zielführende Maßnahmen gewertet werden. Aus der Zusammenstellung darf nicht abgeleitet werden, dass es nicht auch andere oder modifizierte Möglichkeiten der Mängelbeseitigung gibt. Gerade der Ideenreichtum und das Geschick des Handwerkers vor Ort sind oft für den Erfolg von Mängelbeseitigungen bestimmend. Die vor Beginn der eigentlichen Arbeiten in weniger bedeutenden bzw. wenig augenfälligen Bauwerks- oder Bauteilbereichen durchzuführenden Erprobungen dienen der Findung der geeignetsten Maßnahmen oder Maßnahmenkombinationen.

4.1 Reinigen

Reinigungsmaßnahmen dienen dazu, Beläge und Infiltrationen, die in unterschiedlicher Zusammensetzung und Ausbildung sowie in mehr oder weniger großer Dicke auf den Sichtbetonflächen vorliegen können, zu entfernen.

Die diesbezüglich wirksamen Techniken lassen sich in mechanische und chemische Verfahren gliedern.

Mechanische Verfahren:

- Wischen,
- Bürsten,
- Schleifen,
- Strahlen.

Chemische Verfahren:

- Auftrag von ausschließlich den Belag bzw. die infiltrierte Substanz lösenden Agenzien,
- Auftrag von den Zementstein im Beton lösenden Agenzien.

Welche Methode die geeignetste ist, hängt von der chemischen Zusammensetzung, der Festigkeit und der Härte des Belages sowie dessen Haftung an der Betonoberfläche ab. Ferner ist die Eindringtiefe der infiltrierte Flüssigkeit bzw. der den Belag verursachenden Substanz in das Porensystem der Betonrandzone von großer Bedeutung.

Mechanische Verfahren

Wenig feste bzw. wenig fest haftende Beläge können oft bereits durch Wischen mit einem Tuch beseitigt werden. Bei etwas festeren Eigenschaften des Belages bietet sich Kunststoffgaze als geeignetes Hilfsmittel an. Auch Bürsten mit einer Wurzelbürste kann zum Erfolg führen.

Eine ähnliche aber bereits stärkere Wirkung kann durch Schleifen erzielt werden. In Abhängigkeit von der verwendeten Körnung des Schleifmittels kann sich allerdings bereits ein mehr oder weniger starker Abtrag der Zementhaut ergeben.

Den stärksten Reinigungseffekt haben Strahlverfahren unter Verwendung von Hochdruckwasser oder trockenem Strahlgut oder auch deren Kombination. Besonders bewährt hat sich das Niederdruck-Wirbelstrahlverfahren, da es den unerwünschten Abtrag von Teilen der Betonrandzone minimiert.

Trotz aller Behutsamkeit wird jedoch bei allen Verfahren die Zementhaut bzw. die Feinmörtelschicht der Bauteiloberfläche mehr oder weniger stark abgetragen, was i. d. R. unerwünscht ist. Insbesondere bei Belägen, für deren Abtrag relativ scharfe Verfahren benötigt werden (starkes Schleifen oder Strahlen), ist daher große Vorsicht geboten, um Verschlechterungen gegenüber dem ursprünglichen Erscheinungsbild zu vermeiden. Dies gilt um so mehr, weil es mit diesen Verfahren schwierig ist, flächig gleichmäßige Materialabträge zu erzielen.

Bei Verfahren, die auf Schleifen oder auch auf Bürsten beruhen, ist ferner darauf zu achten, dass kein Poliereffekt eintritt, d. h. die Oberfläche einen untypischen Glanz erhält.

Chemische Verfahren

Zur Reinigung können alle im Hinblick auf die Entfernung der Ablagerung wirksamen Reinigungsmittel (Seifen, Laugen, Säuren, Alkohol, Lösemittel, Agenzien, die mit der Ablagerung zu einer leicht löslichen Verbindung reagieren etc.) verwendet werden, sofern sie den Beton und die in ihm enthaltene Bewehrung nicht angreifen oder negativ beeinflussen bzw. der Angriff durch praktikable Maßnahmen auf ein unschädliches Maß reduziert werden kann.

Häufig praktizierte Reinigungsverfahren unter Verwendung von Säuren beruhen darauf, einen möglichst geringen Teil der Betonrandzone zu lösen und diesen mitsamt dem daran anhaftenden Belag durch anschließendes Abwaschen zu entfernen. Lediglich bei selbst säurelöslichen, relativ dickschichtigen Belägen (z. B. Kalkausblühungen oder Kalkaussinterungen) ist es möglich, zumindest einen Teil des Belages ohne Angriff des Betons auf chemischem Wege zu entfernen.

Die manchmal vorzufindenden Infiltrationen von Öl o. Ä. können u. U. durch organische Lösemittel entfernt werden. Allerdings ist die Wirkung begrenzt. Grund hierfür ist, dass die verunreinigenden Flüssigkeiten i. d. R. tief in das Porensystem eingedrungen sind. Sie sind für das Lösemittel zwar zugänglich, können aber auch im gelösten Zustand nicht oder nur sehr begrenzt aus dem Porensystem extrahiert werden. Oft führen derartige Reinigungsversuche daher lediglich zu einer Vergrößerung des Flecks aber nicht zu einer Verbesserung des Erscheinungsbildes.

Zu den chemischen Reinigungstechniken können im weitesten Sinne auch das Waschen der Betonoberflächen mittels Kalt- oder Warmwasser bzw. Wasserdampf, jeweils eventuell unter Zugabe von Reinigungsmitteln (Tensiden), gezählt werden.

Die für eine chemische Behandlung erforderlichen Substanzen sind kommerziell verfügbar, können aber auch für den jeweiligen Anwendungsfall spezifisch zusammengesetzt werden. Wichtig ist bei allen chemischen Verfahren, dass die angewendeten Substanzen nicht im Beton verbleiben. Beeinträchtigungen des Korrosionsschutzes der Bewehrung, unerwünschte Salzauskrystallisationen, Verfärbungen oder speckig wirkende Oberflächen könnten ansonsten die Folge sein. Ein ausreichend langes und intensives Vornässen der Betonrandzone bei Anwendung von Säuren und anderen beton- und stahlaggressiven Substanzen, ein behutsamer Umgang mit diesen Mitteln und ein sorgfältiges Abwaschen der Flächen als Abschluss der Maßnahme sind daher allein schon aus technischen Gründen unbedingt erforderlich. Nicht zuletzt sind auch umwelt- und personenschutzrelevante Bedingungen bei chemischen Verfahren ganz besonders zu beachten.

4.2 Steinmetztechnische Bearbeitung

In manchen Fällen kann es zweckmäßig sein, Ablagerungen oder sonstige unerwünschte Unregelmäßigkeiten auf oder in der unmittelbaren Bauteilrandzone durch Steinmetztechniken (z. B. Stocken, Stemmen, Schleifen, Strahlen) zu entfernen.

Aufgrund der mechanischen Einwirkung und des dabei stattfindenden Abtrags der Betonrandzone im Bereich bis zu mehreren Millimetern dürfen solche Maßnahmen allerdings nur dort eingesetzt werden, wo ausreichend feste und hohe Betondeckungsschichten der Bewehrung vorliegen.

In Absprache mit dem Architekten kann den so bearbeiteten Bereichen durch bestimmte Formgebung und Oberflächengestaltung – auch über den mangelhaften Bereich hinaus – eine architektonische Wirkung zugewiesen werden. Erfahrungen an alten bedeutsamen Sichtbetonbauwerken zeigen, dass derartige Maßnahmen in der Vergangenheit zum Teil praktiziert wurden.

4.3 Spachteln

Spachteltechniken dürfen nur angewendet werden, wenn entsprechende Voruntersuchungen gezeigt haben, dass sich die Fehlstellen lediglich auf die unmittelbare Randzone des Bauteils beschränken (z. B. große Luftporen, Lunker, Vertiefungen als Folge sog. „Wasserläufer“, „Schleppwasser“, Zementleimverlusten an undichten Schalhautfugen etc.) bzw. keine Beeinträchtigung der Dauerhaftigkeit darstellen. Die Arbeiten werden dabei in Form einer „Retusche“ durchgeführt. Dies bedeutet, dass bei den Arbeiten lediglich lose oder niederfeste, den Verbund störende Teile aus den Fehlstellen entfernt werden und die Spachtelmasse durch kreuzweises Kratzen mit einer Spatel in die Fehlstellen eingebracht wird (sog. Kratz- oder Lunkerspachtelung). Zur Sicherstellung einer guten Haftung müssen die Untergrundvorbereitungsmaßnahmen sorgfältig durchgeführt werden.

Als Schlussmaßnahme erfolgt ein Feinschliff der ausreichend erhärteten Spachtelung, falls eine glatte geschlossene Oberfläche erzielt werden soll.

Schlussmaßnahmen können aber auch die Überarbeitung der Stellen mit einem feuchten Schwamm oder mechanische Verfahren sein, um verschmutzte Zuschläge wieder sichtbar zu machen oder um ein zu perfektes Erscheinungsbild bewusst zu vermeiden. Dies kann zweckmäßig sein, wenn die Umgebung durch gewisse, aber nicht behebbar oder zu tolerierende Unregelmäßigkeiten gekennzeichnet ist.

Ganzflächige Spachtelungen sind i. d. R. nur in Verbindung mit Betonaustauscharbeiten zweckdienlich bzw. angemessen.

4.4 Betonaustausch

Bei Neubauten mit tiefergehenden Fehlstellen (Hohlstellen, Kiesnestern, unsauberen Arbeitsfugen etc.) u. U. aber auch bei starken Verunreinigungen (z. B. Öldurchtränkungen), müssen am Bauteil zur Herstellung des Korrosionsschutzes der Bewehrung bzw. zur

Sicherung der Dauerhaftigkeit und zur Schaffung des planmäßig lastabtragenden Bauteilquerschnittes Maßnahmen in Form eines Betonaustausches vorgenommen werden.

Im Fall gealterter Sichtbetonbauteile gilt dies in jedem Fall für Schadstellen, die als Folge von Bewehrungskorrosion, Frosteinwirkung und anderen Beanspruchungen entstanden sind.

Bei Betonaustauscharbeiten handelt es sich um Maßnahmen, die eine besondere Sachkunde erfordern und sorgfältig geplant werden müssen. Die Forderungen in [3] müssen beachtet werden.

Die Maßnahmen sind so durchzuführen, dass das gewünschte Gesamterscheinungsbild der Sichtflächen nicht gestört wird. Ferner muss unbedingt, da in tragende Querschnittsteile eingegriffen wird, der aktuelle Wissensstand zur Korrosion von Bewehrung in Beton, zur Dauerhaftigkeit von Beton und zur Dauerhaftigkeit lokaler Reparaturstellen in Beton Beachtung finden. Die gleichzeitige Erfüllung architektonischer und technischer Forderungen gelingt in vielen Fällen dann, wenn die Arbeiten durch Bauwerksuntersuchungen gut vorbereitet und unter spezifischen Randbedingungen durchgeführt werden, siehe hierzu [4,5, 6, 7].

Die Arbeitsschritte beim Betonaustausch sind bei Neubauten und gealterten Sichtbetonflächen vom Grundsatz her gleich:

- Festlegung der Grenzen der zu bearbeitenden Bereiche. Um die Bereiche optisch aber auch technologisch gut in die Sichtbetonfläche einzupassen, erfolgt die Begrenzung i. d. R. durch gerade, sich an der Oberflächentextur der Sichtbetonfläche orientierende Linien, z. B. an Schalhautstößen oder Schalbrettstößen;
- Schutz der umgebenden Bereiche vor Beschädigung und Verschmutzung;
- Einschneiden des Betons entlang der gewählten Grenzlinien bis in eine Tiefe von ca. 5 mm;
- Ausstemmen des Betons zwischen den Einschnitten und Freilegen der Bewehrung bis in den nicht mehr korrosionsgefährdeten Bereich;
- Säubern, ggf. Entrosten der Bewehrung sowie Entfernen von losen und niederfesten Teilen aus der Ausbruchstelle;
- Aufbringen eines Korrosionsschutzsystems auf den Bewehrungsstahl, sofern erforderlich;
- Vornässen der Betonausbruchstelle;
- Auftragen und Einbürsten einer zementgebundenen Haftbrücke auf die Oberfläche der Ausbruchstelle;
- Einbringen des gemäß Kapitel 5 entwickelten Betons bzw. Mörtels in die Ausbruchstelle (Reprofilieren) frisch in frisch mit der Haftbrücke. Falls erforderlich Nachbearbeiten der Reprofilierungsstelle;
- Schützen (mehrtägig) der Reprofilierungsstelle vor schnellem Feuchtigkeitsverlust, starken Temperaturschwankungen und mechanischen Einwirkungen (Nachbehandlung).

Das Einbringen und Verdichten des Betons bzw. Mörtels kann im Handauftrag durch Spachteltechniken, durch Spritzen oder durch Gießen des selbstverdichtend eingestellten Materials in eine zweckmäßig angebrachte Schalung erfolgen.

Die Nachbearbeitung der Stellen erfolgt in Abhängigkeit von der in der nicht bearbeiteten Umgebung vorliegenden Oberflächentextur der Sichtbetonfläche. Dort u. U. vorliegende Unregelmäßigkeiten sollten auch in der Reparaturstelle fortgeführt bzw. nachgebildet werden. Als Nachbearbeitungsverfahren bieten sich an:

- Feinspachtelungen mit Feinschliff;
- Modellierung von Schalbrettandrücken oder Schalhautfugen im noch frischen Mörtel bzw. Spachtel;
- Abreiben der Flächen mit einem feuchten Schwamm;
- steinmetztechnische Nachbearbeitung der Flächen.

Die bei den Arbeiten einzusetzenden Materialien müssen sowohl technologischen Anforderungen genügen als auch Eigenschaften aufweisen, die zu einem weitestgehend gleichen Erscheinungsbild von Reprofilierungsstelle und umgebender, nicht bearbeiteter Sichtbetonfläche führen.

Nicht zuletzt wegen der zu erzielenden Dauerhaftigkeit müssen die Arbeiten durch spezifische Qualitätssicherungsmaßnahmen begleitet werden.

4.5 Risse- und Hohlraumverfüllungen

Risse gehören zur Stahlbetonbauweise und stellen nur ab einer bestimmten Breite und Ausprägung einen Mangel dar. Über die Notwendigkeit und Zweckmäßigkeit einer Risseverfüllung entscheiden weitere Faktoren wie z. B. die Beanspruchung des Bauwerks. Risse können durch Spachteln, Tränken oder Verpressen unter mehr oder weniger hohem Druck verschlossen oder gefüllt werden. Ob eine kraftschlüssige oder nicht kraftschlüssige Verbindung der Rissflanken zweckmäßig oder notwendig ist, müssen die in jedem Fall durchzuführenden gutachterlichen Bewertungen zeigen.

Bei ausreichender Kontinuität der Hohlräume können auch Kiesnester und andere fehlerstellenbehaftete Bereiche und Hohlräume innerhalb des Betongefüges mit geeigneten Materialien, i. d. R. Zementleim oder Zementsuspension, gefüllt werden.

Zur Füllung der Risse und hohlraumreichen Bereiche stehen mehrere Materialien zur Verfügung. Die Vorgehensweise bei den Arbeiten und die Anforderungen an die Materialien sind in [3] dokumentiert. Soweit sinnvoll, kann eine Farbanpassung des Füllgutes durch Pigmente vorgenommen werden. Um dem Sichtbeton gerecht zu werden, sollte des Weiteren die u. U. erforderliche Verdämmung der Risse bzw. hohlraumreichen Bereiche in Form einer Kratzspachtelung gemäß Abschnitt 4.3 erfolgen. Verschmutzungen müssen durch Schutzmaßnahmen vermieden werden. Durch die Füllmaßnahmen verursachte Beeinträchtigungen des Erscheinungsbildes müssen mit den in

den anderen Kapiteln dieses Beitrags beschriebenen Techniken ggf. wieder beseitigt werden.

5 Materialien zur Durchführung von Reprofilierungsarbeiten

5.1 Allgemeines

Alle im Zuge von Mängelbeseitigungs- und Instandsetzungsarbeiten verwendeten Materialien (Abschnitte 4.3 und 4.4) müssen in ihren technologischen und das Erscheinungsbild prägenden Eigenschaften auf den Bauteilbeton abgestimmt werden, um die erforderliche Dauerhaftigkeit der Maßnahme und die Erzielung eines angemessenen Gesamteindrucks des Sichtbetonbauteils sicherzustellen.

Dies bedeutet, dass in vielen Fällen keine kommerziell verfügbaren Standardmaterialien eingesetzt werden können, sondern Materialien entwickelt werden müssen, die unter Beachtung der technischen Anforderungen in Farbigkeit des Feinmörtels und Art und Sieblinie der Grobzuschläge auf den Bauwerksbeton abgestimmt sind.

Lediglich im Falle von Kratz- oder Lunkerspachtelungen an neuen Sichtflächen ist der alleinige Einsatz kommerzieller Materialien denkbar, sofern eine farbliche Anpassung gelingt, die Materialien die bauphysikalischen Gegebenheiten nicht nachteilig verändern und Dauerhaftigkeitskriterien erfüllt werden. Bei Betonaustauscharbeiten an Neubauten ist auch denkbar, die für Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit des Bauteils relevanten Querschnittsbereiche bzw. die nach Kapitel 4.4 vorbereiteten Ausbruchstellen bis in die Nähe des Querschnittsrandes des Bauteils mit kommerziellem, zur Betonfestigkeitsklasse und Expositionsklasse des Bauteils passendem Beton bzw. Mörtel zu füllen und die für das Erscheinungsbild maßgebende, unmittelbare Bauteilrandzone mit einem speziell auf das Bauwerk abgestimmten Mörtel zu schließen.

5.2 Technologische und das Erscheinungsbild prägende Eigenschaften des Bauwerksbetons

Bei Neubauten sind die technologischen Eigenschaften des Bauteilbetons in Unterlagen des Betonherstellers bzw. in Lieferscheinen und Prüfberichten zu Eigen- und Fremdüberwachungsprüfungen dokumentiert. Ferner sind Art, Herkunft und Mengen der Betonausgangsstoffe sowie die Bedingungen bei der Herstellung der Bauteile bekannt. Dies hilft, die das Erscheinungsbild prägenden Eigenschaften abzuschätzen. Im Endergebnis zeigt sich das Erscheinungsbild aber auch in solchen Fällen erst nach dem Entschalen des Bauteils und einer gewissen Zeit der Trocknung und Alterung.

Bei alten Sichtbetonbauwerken liegen häufig keine Unterlagen aus der Bauzeit mehr vor. Die technischen und die das Erscheinungsbild prägenden Eigenschaften des Bauwerksbetons können nur mit Hilfe spezifischer Bauwerksuntersuchungen erkundet werden.

Im Hinblick auf den Einsatz bei Reprofilierungsarbeiten zur Mängelbeseitigung und Instandsetzung sind folgende Eigenschaften des Bauwerksbetons von besonderer Bedeutung:

Technische Eigenschaften:

- Druck- und Zugfestigkeit,
- Verformungsverhalten (Elastizitätsmodul),
- Oberflächenzugfestigkeit.

Eigenschaften, die das Erscheinungsbild prägen:

- Färbung der Feinmörtelmatrix,
- Oberflächentextur und Abwitterungszustand,
- Art, Farbe und Sieblinie der Gesteinskörnungen,
- Bindemittelart und Mischungsverhältnis.

5.3 Spezifische Voruntersuchungen an der Sichtbetonfläche

Die Methoden zur Ermittlung der *technischen Eigenschaften des Bauwerksbetons* sind allgemein bekannt. Nachfolgend werden daher lediglich jene Voruntersuchungen am Sichtbeton beschrieben, die im Hinblick auf das Erscheinungsbild des bei den Betonaustauscharbeiten einzusetzenden Spachtels, Mörtels oder Betons von besonderer Bedeutung sind.

Die *das Erscheinungsbild der Sichtbetonfläche prägenden Eigenschaften*, wie die Oberflächentextur bei Neubauten oder der Abwitterungszustand bei gealterten Sichtbetonbauwerken, können anhand der Technik zur Gestaltung der Betonoberflächen (Schalhautabdrücke) bzw. einer messtechnischen Erfassung der Rauheit der Abwitterungstiefen oder der Größe der freigelegten Zuschläge beschrieben werden.

Schwieriger gestaltet sich die Erfassung der Farbigkeit und Helligkeit der Betonoberfläche. Um hier zu objektiven Bewertungen zu gelangen, wurde eine Methode entwickelt, mit der man – unter Verwendung der Regeln und Gesetze der Farbmeterik – zu Maßzahlen gelangt, die die Farbigkeit und Helligkeit der Betonoberfläche objektiv beschreiben und eine schnellere Reproduktion dieser Farbigkeit im Spachtel, Mörtel oder Beton für die Betonaustauscharbeiten erlauben.

Bei dieser Methode wird das Erscheinungsbild repräsentativer Bereiche der Sichtbetonoberfläche digital erfasst. Dies kann mit Hilfe eines Flachbettscanners an entnommenen Proben oder einer digitalen Kamera vor Ort geschehen.

Auf dem digitalisierten Bild werden repräsentative Bereiche der Betonmatrix (Betonbestandteile bis ca. 2 mm Größtkorn) ausgewählt und deren durchschnittlicher Farbwert mit einer geeigneten Computer-Software ermittelt und im sog. CIELAB-System dargestellt. Die Beschreibung der Farbe erfolgt hierbei über einen

- rot-grün Wert a^* , einen
- gelb-blau Wert b^* und einen
- Helligkeitswert L^* .

Steigende a^* -Werte kennzeichnen steigende Rotanteile und abnehmende Grünanteile der Farbe. Steigende b^* -Werte kennzeichnen steigende Gelbanteile und abnehmende Blauanteile der Farbe.

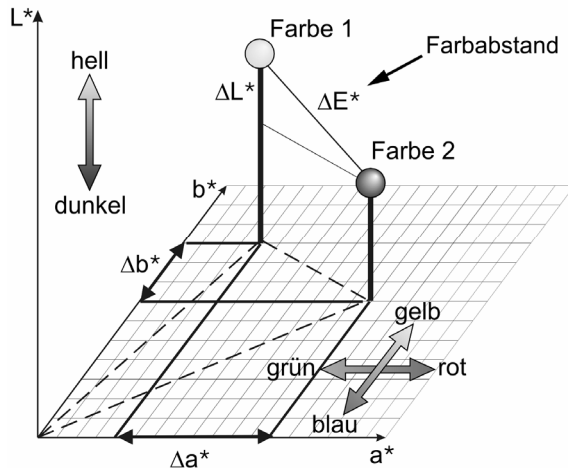


Abb. 1: Darstellung von Farbwerten im CIELAB-Farbraum nach DIN 6174

Eine anschauliche Darstellung der Farbwerte bzw. des Farbabstandes verschiedener Betone kann mit Hilfe eines dreidimensionalen, rechtwinkligen Koordinatensystems erfolgen, das aus einer rot-grün Achse (sog. a^* -Achse) und einer gelb-blau Achse (sog. b^* -Achse) besteht.

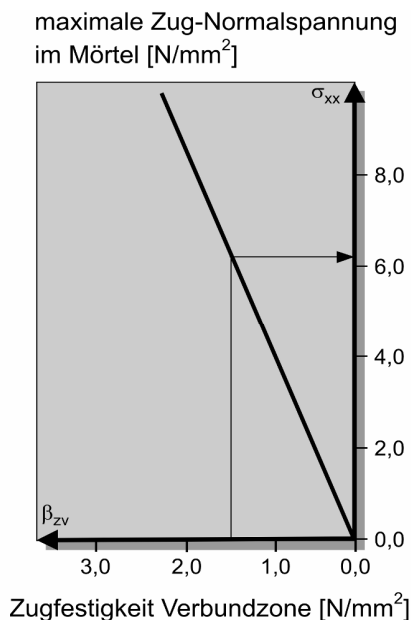


Abb. 2: Ansatz zur „Bemessung“ von Reprofilierungsmörteln hinsichtlich der Zugfestigkeit.
 Links: Bei gegebener Zugfestigkeit der Verbundzone maximal mögliche Zug-Normalspannung im Reprofilierungsmörtel, wenn Hohllagen des Mörtels vermieden werden sollen; nach [8].
 Rechts: Ergebnisse experimenteller Untersuchungen am Institut für Massivbau und Baustofftechnologie der Universität Karlsruhe (TH) zur Steuerung der Zugfestigkeit von Instandsetzungsmörteln.

Die Helligkeit der Farbe (L^* -Wert) wird in der dritten Dimension dargestellt; siehe hierzu Abbildung 1. Um die Darstellung zu vereinfachen, kann man sich – bei gleichzeitiger Nutzung von Erfahrungswerten – auf ein zweidimensionales Koordinatensystem in der sog. Farbartebene beschränken, die aus den Achsen a^* und b^* gebildet wird.

Die Erfassung der Farbigkeit der Zuschläge von etwa 2 mm Durchmesser und darüber erfolgt getrennt. Falls zweckmäßig, kann auch hierzu die beschriebene Methodik verwendet werden.

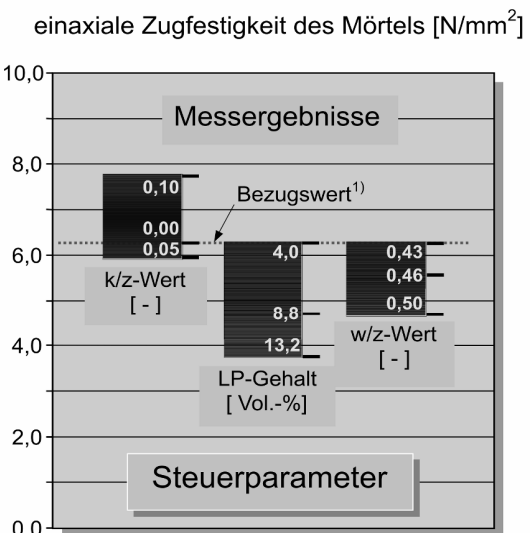
5.4 Abstimmung der technologischen Eigenschaften des Materials auf den Bestand

An wichtigen technologischen Anforderungen an das in jedem Fall zementgebunden herzustellende Material sind zu nennen:

- eine gute Verarbeitbarkeit und Modellierbarkeit im frischen Zustand,
- eine an den Bauwerksbeton angepasste Festigkeit, Verformbarkeit und Dauerhaftigkeit,
- ein guter und dauerhafter Verbund mit dem vorhandenen Beton und
- ein sicherer Korrosionsschutz der Bewehrung.

Der Korrosionsschutz der Bewehrung lässt sich unter Verwendung einer kommerziellen zementgebundenen Korrosionsschutzbeschichtung für den Bewehrungsstahl sicherstellen.

Die Erzielung einer hohen Verbundfestigkeit mit der Unterlage gelingt durch Einsatz einer Zementleimhaftbrücke mit geringem Wasserzementwert.



¹⁾ Zugfestigkeit eines zementgebundenen Mörtels mit $k/z = 0$, LP-Gehalt = 4,0 Vol.-%, $w/z = 0,43$

Bei der Abstimmung der technologischen Eigenschaften müssen die besonderen Beanspruchungen, die lokale Reparaturstellen erfahren und die z. B. zur sog. Plombenbildung führen können, siehe [4, 8], besonders berücksichtigt werden.

Zur Erzielung der erforderlichen technologischen Eigenschaften des Materials selbst steht eine Reihe von Maßnahmen zur Verfügung.

Untersuchungen am Institut für Massivbau und Baustofftechnologie der Universität Karlsruhe (TH) zeigen, dass neben der Zugabe von Polymerdispersionen oder Reaktionskunststoffen (wodurch die sog. PCCs entstehen), auch die Zugabe luftporenbildender Zusatzmittel oder sogenannter Mikrohohlkugeln, die Variation des Wasserzementwertes, die Wahl der Zuschlagstoffe und die Verwendung spezieller anorganischer Zusatzstoffe geeignete betontechnologische Maßnahmen sind, um die Eigenschaften der Materialien so zu beeinflussen, dass sie für den Einsatz an Beton- und Stahlbetonbauteilen mit den unterschiedlichsten Eigenschaften verwendet werden können. Aus technologischer Sicht kann ein Verzicht auf polymermodifizierte Werkstoffe von Vorteil sein, wenn eine hohe Wasserdampfdurchlässigkeit des Materials erforderlich ist oder wenn das Material in häufig durchfeuchteten Bauteilbereichen oder zur Wiederherstellung und Erhöhung der Tragfähigkeit und des Brandschutzes eingesetzt werden muss.

Der rechte Teil von Abbildung 2 zeigt einaxiale Zugfestigkeiten verschiedener Mörtel. Bei den entsprechenden Untersuchungen wurde, ausgehend von einem Referenzmörtel mit einem Kunststoff/Zement-Verhältnis von $k/z = 0$, einem Luftgehalt von $LP = 4,0$ Vol.-% und einem Wasserzementwert $w/z = 0,43$ (punktierte Linie) jeweils einer dieser Parameter variiert und die dadurch erzielte Biegezugfestigkeit des Mörtels ermittelt. Diese wurde anschließend in die einaxiale Zugfestigkeit umgerechnet.

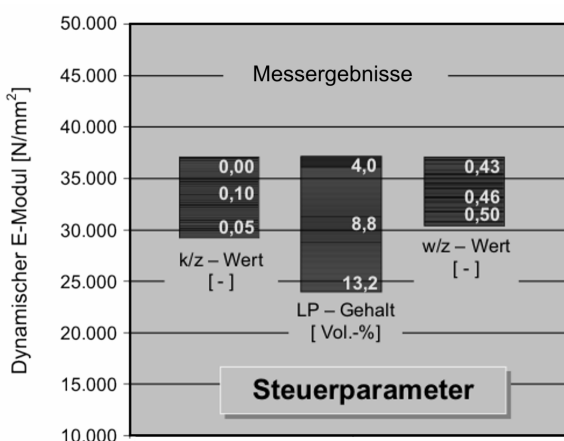


Abb. 3: Ergebnisse experimenteller Untersuchungen am Institut für Massivbau und Baustofftechnologie der Universität Karlsruhe (TH) zur Steuerung des Elastizitätsmoduls von zementgebundenen Reprofilierungsmörteln

In entsprechender Weise wurden auch Möglichkeiten entwickelt, den E-Modul, die kapillare Wasseraufnahme und den Diffusionswiderstand der Mörtel gegenüber Wasserdampf und Kohlendioxid gezielt zu beeinflussen. Abbildung 3 zeigt exemplarisch den Einfluss der o. g. Parameter auf den Elastizitätsmodul von Mörteln.

Um die sog. Plombenbildung der reprofilierten Stelle zu vermeiden, müssen u. a. Forderungen an die maximale Zugfestigkeit des Reprofilierungsmaterials gestellt werden. Wie die maximal zulässige Zugfestigkeit ermittelt wird, soll nachfolgend exemplarisch aufgezeigt werden.

Ist die zwischen Reprofilierungsmaterial und Beton maximal erreichbare Verbundfestigkeit bekannt – diese entspricht der Oberflächenzugfestigkeit des Betons, die im Zuge von Voruntersuchungen zu ermitteln ist – so kann anhand von Abbildung 2, linker Teil, angegeben werden, wie hoch die einaxiale Zugfestigkeit des Materials – diese entspricht der maximal möglichen Zug-Normalspannung im Material – maximal sein darf, wenn Hohllagen des Materials vermieden werden sollen. Auf die hierbei relevanten bruchmechanischen Zusammenhänge wird an anderer Stelle eingegangen, siehe z. B. [8]. Bei einer Verbundfestigkeit zwischen Reprofilierungsmaterial und Beton bzw. einer Oberflächenzugfestigkeit des Bauwerksbetons von ca. 1,5 N/mm² sollte die einaxiale Zugfestigkeit des Reprofilierungsmaterials demnach nicht mehr als etwa 6,1 N/mm² betragen.

Die untere Grenze der Zugfestigkeit wird durch die Forderung nach einer an den Bauwerksbeton angepassten Dauerhaftigkeit des Materials bestimmt.

5.5 Abstimmung der das Erscheinungsbild prägenden Eigenschaften des Materials auf den Bestand

Wichtige, das Erscheinungsbild der Reprofilierungsstelle beeinflussende Faktoren sind

- die Farbe und Helligkeit des Feinmörtels im Mörtel bzw. im Beton sowie der Spachtelmasse,
- die mechanische, u. U. steinmetztechnische Bearbeitbarkeit der Oberfläche der Reprofilierungsstelle,
- das Erscheinungsbild der Reprofilierungsstelle nach der steinmetztechnischen Bearbeitung bzw. Art, Farbe und Sieblinie der größeren Zuschläge des Reprofilierungsmaterials,
- die Alterung und Veränderung der Oberfläche durch Bewitterung, die wiederum von der Oberflächentextur sowie von der Porenstruktur und der Dauerhaftigkeit des Reprofilierungsmaterials abhängt.

Entscheidend für das farbliche Erscheinungsbild einer glatten Oberfläche des Reprofilierungsmörtels/-betons bzw. -spachtels ist die Farbigkeit des Zementsteins in Verbindung mit eventuell zugegebenen Zusatzstoffen. Mit zunehmender Intensität der zum Angleich der Textur der Reparaturstelle an die umgebenden Beton-

oberflächen ggf. durchgeführten steinmetztechnischen Bearbeitung bzw. mit zunehmender Abwitterung der Zementhaut auf der Reprofilierungsstelle, erlangen Art, Farbe und Kornanteil der Zuschlagstoffe des Reprofilierungsmaterials mehr und mehr an Bedeutung für das Erscheinungsbild der Oberfläche. Bei vorgegebener Abtragtiefe hängt der Einfluss des Anteils des freigelegten Zuschlags und dessen Farbigkeit auf den Gesamteindruck der Reprofilierungsstelle auch von der Entfernung des Betrachters von der Betonoberfläche ab.

Die Beeinflussung der Oberflächentextur – und damit bedingt auch der Helligkeit und Färbung der Oberfläche – erfolgt durch die Herstellung von Schalungsabdrücken oder durch andere Techniken im noch frischen Mörtel oder durch eine nachträgliche steinmetztechnische Bearbeitung der erhärteten Oberfläche.

Bei der Reproduktion der Farbigkeit der Betonoberfläche in einem Reprofilierungsmaterial hat es sich als zweckmäßig erwiesen, zunächst die Mörtelmatrix des Betons zu betrachten bzw. beim Reprofilierungsmaterial nachzustellen und erst in einem zweiten Schritt die Farbigkeit auch der größeren Zuschläge auf den Bestand abzustimmen. Die Größe der im Reprofilierungsmaterial einzusetzenden Zuschläge hängt von der Dicke der Reprofilierungsschicht ab, wobei allerdings – sofern die Dauerhaftigkeit sichergestellt werden kann – auch größere Zuschläge als etwa 1/2 bis 1/3 der Schichtdicke verwendet werden können.

Die Reproduktion des Farbtons der Mörtelmatrix des Betons erfolgt zweckmäßigerweise mit den originalen Betonausgangsstoffen, die im Falle von Neubauten noch bekannt und leicht verfügbar sind.

Im Falle von Instandsetzungsarbeiten an alten Sichtbetonbauwerken sind die originalen Betonausgangsstoffe nicht mehr verfügbar. Selbst bei noch bekannten Produktions- und Gewinnungsstätten des Zementes bzw. Sandes liegen diese den Farbton entscheidend beeinflussenden Betonausgangsstoffe nicht mehr im originalen Farbton vor. In diesem Fall müssen dem Original möglichst ähnliche Ausgangsstoffe für das Reprofilierungsmaterial verwendet werden.

Im Falle von nicht mehr bekannten bzw. verfügbaren originalen Betonausgangsstoffen kann die Reproduktion des Farbtons des Sichtbetons auch durch Verwendung eines Weißzementes, geeigneter Zusatzstoffe, einer abgestimmten Mischung aus Eisenoxidpigmenten und eines farblich und mineralogisch passenden Zuschlags erfolgen.

Die Gesamtpigmentierung liegt bei der Reproduktion nicht künstlich eingefärbter Betone i. d. R. deutlich unter 1,0 M.-% der Zementmasse, so dass bei der Pigmentzugabe eher von einer gezielten „Verunreinigung“ des Weißzementes mit Eisenoxiden, die andere Zemente in natürlicher Form enthalten, als von einer Einfärbung des Reprofilierungsmaterials gesprochen werden kann. Selbstverständlich lassen sich, durch Erhöhung der Pigmentierung, auch „farbige“ Betone nachstellen.

Um die Reproduktion der Farbe und Helligkeit des Betons in einem Reprofilierungsmaterial zu erleichtern, wurden in experimentellen Untersuchungen – unter systematischer Variation des Mischungsverhältnisses dreier Eisenoxidpigmente bei ansonsten gleichbleibender Mischungszusammensetzung – Mörtel hergestellt und farblich auf die in Abschnitt 5.3 beschriebene Art und Weise erfasst.

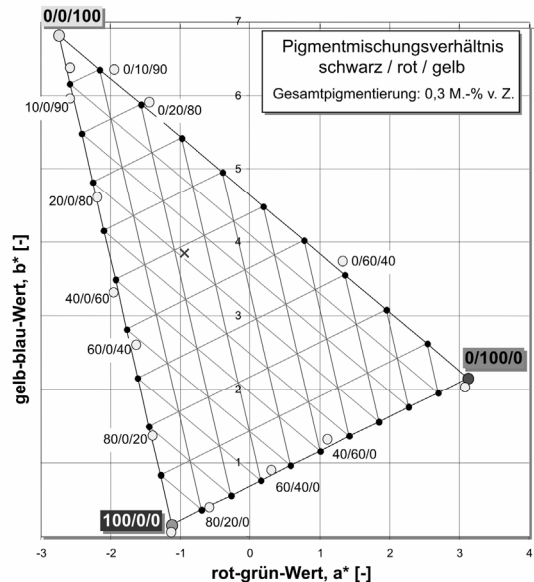


Abb. 4: Mischungsverhältnisse dreier Eisenoxidpigmente zur Erzielung bestimmter Oberflächenfärbungen bei definierter Zusammensetzung und Oberflächenbearbeitung des Reprofilierungsmaterials. Darstellung der sich ergebenden Farben in der Farbartebene (CIELAB-System)

Bei der Darstellung der Ergebnisse in der Farbartebene, die durch einen konstanten L^* -Wert gekennzeichnet ist, ergibt sich in erster Näherung ein sog. Farbartdreieck, dessen Eckpunkte den Pigmentmischungsverhältnissen 100/0/0, 0/100/0 bzw. 0/0/100 der drei Pigmente entsprechen und dessen Lage und Größe im Farbraum von weiteren Parametern der Mörtelzusammensetzung (wie z. B. dem w/z -Wert, dem Gehalt an weiteren Mörtelzusatzstoffen) sowie von der Art und Intensität der Oberflächenbearbeitung abhängt und für jeden dieser Parameter getrennt bestimmt werden muss.

Die in Abbildung 4 eingetragenen Datenpunkte (Kreisseymbole), welche bestimmten experimentell eingestellten Pigmentmischungsverhältnissen entsprechen, liegen nicht in allen Fällen an den Stellen des Gitternetzes, das sich bei Aufteilung des Farbartdreiecks nach den Schwerpunktregeln für additive Farbmischungen ergibt (durchgezogene Linien in 10 % Schritten). Die experimentellen Datenpunkte liegen i. d. R. zu nahe am „schwarzen Eckpunkt“ des Farbartdreiecks. Die genauen Verhältnisse lassen sich durch eine Erhöhung der Anzahl an Proben mit unterschiedlichen

Pigmentmischungen bzw. deren Farbanalyse darstellen.

Sind die Farbwertzahlen des Bauwerksbetons aus entsprechenden Voruntersuchungen bekannt (z. B. der Datenpunkt mit x-Symbol in Abb. 4), siehe Abschnitt 5.3, so kann jedoch auch mit Hilfe des linear aufgeteilten Gitternetzes jenes Pigmentmischungsverhältnis angegeben werden, das mit sehr guter Näherung die gewünschte Farbe des Reprofilierungsmaterials liefert. Erforderlichenfalls können ausgehend von diesem Mischungsverhältnis weitere Feinabstimmungen der Farbe vorgenommen werden.

Die Auswahl der Zuschlagstoffe für das Reprofilierungsmaterial und die Festlegung der Korngrößenverteilung erfolgt auf der Grundlage der Recherche zum verwendeten Beton bzw. bei alten Bauwerken auf der Basis der Auswertung der materialtechnologischen Voruntersuchungen am Bauwerksbeton und unter Beachtung der aus technologischen Forderungen resultierenden Randbedingungen.

5.6 Grundprüfungen

Sowohl die entwickelten Mörtel und Betone als auch die Haftbrücken müssen allen erforderlichen technologischen und optischen Anforderungen genügen. Dies ist vor dem Einsatz am Bauwerk nachzuweisen.

Diese Prüfungen sind in Anlehnung an die einschlägigen Prüfvorschriften, siehe [3], durchzuführen, können und müssen in ihrem Umfang und den zu erfüllenden Anforderungen aber auf das jeweils vorliegende Bauwerk abgestimmt werden. Im Gegensatz zu den kommerziellen „grundgeprüften“ Materialien im Sinne der Richtlinien [3], die für die Instandsetzung von Sichtbetonflächen und dabei insbesondere auch jenen von alten Bauwerken aufgrund ihrer technologischen und das Erscheinungsbild prägenden Eigenschaften häufig nicht geeignet sind, gelten die hier angesprochenen Grundprüfungen zwangsläufig nur für das untersuchte Bauwerk.

6 Literatur

- [1] Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V., Bundesverband der Deutschen Zementindustrie e.V. (2004) Merkblatt Sichtbeton. Eigenverlag
- [2] Müller, H. S., Günter, M., Hilsdorf, H. K. (2000) Instandsetzung historisch bedeutender Beton- und Stahlbetonbauwerke. Beton- und Stahlbetonbau 95, Heft 6, Seiten 360-364
- [3] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (2001) Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen (Instandsetzungsrichtlinie), Teile 1 bis 4. Beuth Verlag GmbH, Berlin und Köln
- [4] Müller, H. S. (2004) Denkmalgerechte Betoninstandsetzung – Überblick und technisch-wissenschaftliche Grundlagen. Berichtsband zum technisch-wissenschaftlichen Symposium „Instandsetzung bedeutsamer Betonbauten der Moderne in Deutschland“ am 30.03.2004 in Karlsruhe sowie Tagung „Beton in der Denkmalpflege“ am 28.10.2004 in Leipzig, Bericht

Nr. 17-2004, 2. erweiterte Auflage, Institut für Steinkonservierung e.V.

[5] Günter, M. (2004) Durchführung, Kosten und Dauerhaftigkeit behutsamer Betoninstandsetzungen. Berichtsband zum technisch-wissenschaftlichen Symposium „Instandsetzung bedeutsamer Betonbauten der Moderne in Deutschland“ am 30.03.2004 in Karlsruhe sowie Tagung „Beton in der Denkmalpflege“ am 28.10.2004 in Leipzig, Bericht Nr. 17-2004, 2. erweiterte Auflage, Institut für Steinkonservierung e.V.

[6] Pörtner, R. (2004) Statisch-konstruktive Maßnahmen. Berichtsband zum technisch-wissenschaftlichen Symposium „Instandsetzung bedeutsamer Betonbauten der Moderne in Deutschland“ am 30.03.2004 in Karlsruhe

[7] Baumstark, H. (2004) Umsetzung gestalterischer Aspekte bei der Instandsetzung. Berichtsband zum technisch-wissenschaftlichen Symposium „Instandsetzung bedeutsamer Betonbauten der Moderne in Deutschland“ am 30.03.2004 in Karlsruhe

[8] Haardt, P. (1991) Zementgebundene und kunststoffvergütete Beschichtungen auf Beton. Schriftenreihe des Instituts für Massivbau und Baustofftechnologie der Universität Karlsruhe, Heft 13

Technische Kriterien für die Beurteilung und Abnahme von Sichtbeton

Rolf-Dieter Schulz

Zusammenfassung

Die objektive Beurteilung eines Sichtbetonbauwerks erweist sich im Allgemeinen als schwierig. Im Merkblatt "Sichtbeton", Fassung August 2004, vom Deutschen Beton- und Bautechnik-Verein E.V. und dem Bundesverband der Deutschen Zementindustrie wird dem Bedarf von Auftraggeber und Auftragnehmer nach einer Beurteilungsgrundlage nachgegangen. Außerdem kann bei Beachtung der dort gegebenen Hinweise mit sehr großer Wahrscheinlichkeit die vereinbarte hochwertige und dauerhafte Sichtbetonqualität erreicht werden, wenn ein Zusammenwirken von fachgerechter Gestaltung, Planung, Baustofftechnik und Baubetrieb erfolgt. Erfahrungen aus der Praxis zeigen, dass selbst bei größtmöglicher Sorgfalt ein Ergebnis auftreten kann, das den Erwartungen, die dem Bauvertrag zugrunde liegen, nicht gerecht wird. Materialbedingte Unregelmäßigkeiten in den Ansichtsflächen lassen sich zudem auch bei höherem Aufwand sowie bei Anwendung hochtechnischer Systeme (z. B. für die Schalung) nicht vollständig ausschließen. Im Nachfolgenden werden technische Kriterien für die Beurteilung und Abnahme dargestellt.

1 Allgemeines

Begriffe, Regelwerke und vertragliche Einbindung des Merkblatts, die Sichtbetonklassen, Angaben zur Planung und Ausschreibung und die Anforderungen an die Ausführung wurden unter Bezug auf das Merkblatt "Sichtbeton" in den Vorträgen Peck und Schießl, Lohaus, Hillemeier bereits erwähnt. Die Möglichkeiten der Betonkosmetik sind von Herrn Günter behandelt worden.

Diese Hinweise und Wechselwirkungen zwischen Ausführbarkeit, bautechnischen Grundsätzen, Gestaltung der Schalung - einer Vielzahl von Einflussparametern für die Planung und Bauausführung - berücksichtigt das Merkblatt. Es müssen aber gleichzeitig die Zusammenhänge so dargestellt werden, dass sie einer ernsthaften Prüfung standhalten. D. h. es bleibt ein Beurteilungsbereich für den Sachverständigen.

2 Beurteilung

2.1 Grundlagen

Der Gesamteindruck einer Ansichtsfläche aus dem üblichen Betrachtungsabstand ist das grundlegende Abnahmekriterium für die vereinbarte Sichtbetonklasse. Zu beachten ist, dass jedes Bauteil als Unikat (Wetter, Transportsituation etc.) zu beurteilen ist. Geringe Unregelmäßigkeiten, wie z. B. in der Textur und im Farbton, treten in allen Sichtbetonklassen auf.

Referenzflächen (siehe Abschnitte 2 und 5.2.4 des Merkblattes) sind, wenn sie vertraglich vereinbart wurden, in die Beurteilung mit einzubeziehen.

Hierbei ist zu beachten, dass die Oberflächenbeschaffenheit von Ansichtsflächen nicht toleranzfrei reproduzierbar ist, weil die Schwankungen der natürlichen Ausgangsstoffe, die zulässigen Abweichungen in der Betonzusammensetzung und die Wechselwirkungen zwischen Schalung, Trennmittel und Witterungsbedingungen keine vollkommen gleichmäßige Oberfläche entstehen lassen.

Einzelkriterien werden nur geprüft, wenn der Gesamteindruck der Ansichtsflächen den vereinbarten Anforderungen nicht entspricht.

2.2 Gesamteindruck

Der Gesamteindruck von Ansichtsflächen wird aus angemessenem Betrachtungsabstand und unter üblichen Lichtverhältnissen beurteilt.

Folgende Betrachtungsabstände haben sich in der Praxis bewährt:

Bauwerk: Die angemessene Entfernung entspricht dem Abstand, der erlaubt, das Bauwerk in seinen wesentlichen Teilen optisch zu erfassen. Dabei müssen die maßgebenden Gestaltungsmerkmale erkennbar sein.

Bauteile: Der angemessene Betrachtungsabstand ist derjenige, der bei üblicher Nutzung vom Betrachter eingenommen wird.

2.3 Einzelkriterien

Die Beurteilung von Einzelkriterien soll bauteilbezogen erfolgen. In begründeten Fällen können die beteiligten Parteien auch eine andere Einteilung der Beurteilungsbereiche vereinbaren (z. B. geschossweise zwischen einzelnen Fugenabschnitten, elementbezogen bei Fertigteilen).

2.4 Technische Kriterien für die Beurteilung

Grundsätze:

- Es gilt das Merkblatt (z. B. Gesamteindruck und Einzelkriterien), gefiltert durch den Bauvertrag.
- Festgestellte Auffälligkeiten werden in die Ansichtspläne eingetragen, wobei bereits hierbei eine Bewertung nach den nachfolgenden Kriterien unter Punkt 2.4.1, 2.4.2 und 2.4.3 erfolgen sollte.

2.4.1 Gemäß Vertrag mangelfrei erbrachte Leistungen

Hierher gehören die herstellungstechnisch nicht zielsicher erfüllbaren Forderungen an die Ansichtsfläche, z. B.:

- gleichmäßiger Farbton aller Ansichtsflächen im Bauwerk
- porenfreie Ansichtsflächen
- gleichmäßige Porenstruktur (Porengröße und –verteilung) in einer Einzelfläche sowie in allen Ansichtsflächen im Bauwerk
- ausblühungsfreie Ansichtsflächen von Ortbetonbauteilen
- ungefaste scharfe Kanten ohne kleinere Abbrüche und Ausblutungen
- Farbton- und Texturgleichheit im Bereich von Schalungsstößen.

Beschreibungen der geforderten Beschaffenheit von Ansichtsflächen, welche als bauvertragliche Forde-

rungen, die die Merkmale der vereinbarten Betonklasse gemäß Tab. 1 ergänzen, müssen den technischen Möglichkeiten der Bauweise angepasst und mit einem für die vereinbarte Sichtbetonklasse vertretbaren Aufwand hergestellt sein.

Folgende Abweichungen können nur **eingeschränkt** vermieden werden:

- leichte Farbunterschiede zwischen aufeinander folgenden Schüttilagen
- Porenanhäufung im oberen Teil vertikaler Bauteile
- Abzeichnung der Bewehrung oder des Größtkorns
- geringfügige Ausblutungen an Stößen zwischen Schalbrettern bzw. –elementen, Ankerlöchern u. ä.
- Schleppwassereffekte in geringer Anzahl und Ausdehnung
- Wolkenbildungen und Marmorierungen
- einzelne Kalk- und Rostfahnen an den vertikalen Bauteilen
- Rostspuren an den Untersichten von horizontalen Bauteilen.

Die Definitionen aus dem Merkblatt sind in den nachfolgenden Tabellen 2 und 4 aus dem Merkblatt "Sichtbeton" zusammengefasst.

Tabelle 1: Sichtbetonklassen und deren Verknüpfung mit Anforderungen

Zeile	Spalte		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
	Sichtbetonklasse ¹		Beispiel	Anforderung an geschalte Sichtbetonflächen ^{2,3} nach Klassen bezüglich						Weitere Anforderungen		Kosten		
				Textur	Porigkeit ⁴		Farbtongleichmäßigkeit ⁵		Ebenheit	Arbeits- und Schalhautfugen	Erprobungsfläche ⁶		Schalhautklasse ⁷	
s			ns	s	ns									
1	Sichtbeton mit	geringen Anforderungen	SB 1	Betonflächen mit geringen gestalterischen Anforderungen, z. B.: Kellerwände oder Bereiche mit vorwiegend gewerblicher Nutzung	T1	P1		FT1	FT1	E1	AF1	freigestellt	SHK1	niedrig
2		normalen Anforderungen	SB 2	Betonflächen mit normalen gestalterischen Anforderungen, z. B.: Treppenhäuseräume, Stützwände	T2	P2	P1	FT2	FT2	E1	AF2	empfohlen	SHK2	mittel
3		besonderen Anforderungen	SB 3	Betonflächen mit hohen gestalterischen Anforderungen, z. B.: Fassaden im Hochbau	T2	P3	P2	FT2	FT2	E2	AF3	dringend empfohlen	SHK2	hoch
4			SB 4	Betonflächen mit besonders hoher gestalterischer Bedeutung, repräsentative Bauteile im Hochbau	T3	P4	P3	FT2	FT3	E3	AF4	erforderlich	SHK3	sehr hoch

¹ Zur Erfüllung der Anforderungen an die Sichtbetonklassen sind die Hinweise dieses Merkblatts zu beachten.
² Die gestalterische Wirkung der Ansichtsfläche einer Sichtbetonklasse ist grundsätzlich nur in ihrer Gesamtwirkung angemessen beurteilbar, d. h. nicht nach Maßgabe absolut erklärter Einzelmerkmale. Die Verfehlung von vertraglich vereinbarten Einzelmerkmalen im Sinne dieses Merkblatts soll daher nicht zu einer Pflicht zur Mängelbeseitigung führen, wenn der Gesamteindruck des betroffenen Bauteils oder Bauwerks in seiner positiven Gestaltungswirkung nicht gestört ist.
³ Diese Anforderungen/Eigenschaften werden in **Tabelle 2** näher beschrieben.
⁴ Siehe **Tabelle 4**; Erläuterung: s = saugende bzw. ns = nichtsaugende Schalhaut
⁵ Der Gesamteindruck bei vorhandenen oder nicht vorhandenen Farbtonunterschieden ist i.d.R. erst nach längerer Standzeit (u.U. nach mehreren Wochen) beurteilbar. Die Farbtongleichmäßigkeit ist aus dem üblichen Betrachtungsabstand gemäß Abschnitt 7 zu beurteilen.
⁶ Gegebenenfalls sollten mehrere Erprobungsflächen angefertigt werden.
⁷ Siehe **Tabelle 3**

Abb. 1: Tabelle 1 aus dem Merkblatt "Sichtbeton"

Tabelle 2: Anforderungen an geschalte Sichtbetonflächen

Zeile	Spalte	1		2	
		Kriterium	Kurzbezeichnung	Anforderung/Eigenschaft ²	
1	Textur, Schalelementstoß	T1		- weitgehend geschlossene Zementleim- bzw. Mörteloberfläche - in den Schalelementstoßen ausgetretener Zementleim/Feinmörtel bis ca. 20 mm Breite und ca. 10 mm Tiefe zulässig - Rahmenabdruck des Schalelements zugelassen	
		T2		- geschlossene und weitgehend einheitliche Betonfläche - in den Schalelementstoßen ausgetretener Zementleim/Feinmörtel bis ca. 10 mm Breite und ca. 5 mm Tiefe zulässig - Versatz der Elementstöße bis ca. 5 mm zulässig - Höhe verbleibender Grate bis ca. 5 mm zulässig - Rahmenabdruck des Schalelements zugelassen	
		T3		- glatte, geschlossene und weitgehend einheitliche Betonfläche - in den Schalelementstoßen ausgetretener Zementleim/Feinmörtel bis ca. 3 mm Breite zulässig - feine, technisch unvermeidbare Grate bis ca. 3 mm zulässig - weitere Anforderungen (z.B. an Schalungsstöße, Rahmenabdruck) sind detailliert festzulegen.	
2	Porigkeit	P1-P4		- siehe Tabelle 4	
3	Farbtongleichmäßigkeit	FT1		- Hell- / Dunkelverfärbungen sind zulässig. - Rost- und Schmutzflecken sind unzulässig	
		FT2		- Gleichmäßige, großflächige Hell-/Dunkelverfärbungen zulässig - Unterschiedliche Arten und Vorbehandlung der Schalhaut sowie Ausgangsstoffe verschiedener Art und Herkunft unzulässig	
		FT3		- Großflächige Verfärbungen, verursacht durch Ausgangsstoffe verschiedener Art und Herkunft, unterschiedliche Art und Vorbehandlung der Schalhaut, ungeeignete Nachbehandlung des Betons sind unzulässig. - Zulässig sind geringe Hell- / Dunkelverfärbungen (z. B. leichte Wolkenbildung, geringe Farbtonabweichungen). - Unzulässig sind Rost- und Schmutzflecken, deutlich sichtbare Schüttlagen sowie Verfärbungen, verursacht durch Nichteinhaltung der Vorgaben aus Anhang A, Tabelle A.3. - Auswahl eines besonderen und geeigneten Trennmittels notwendig Hinweis: Farbtonunterschiede und Verfärbungen sind auch bei größter handwerklicher Sorgfalt und bei Einhaltung der Vorgaben aus Anhang A, Tabelle A.3 nicht gänzlich auszuschließen.	
4	Ebenheit ¹	E1		- Ebenheitsanforderungen nach DIN 18202, Tabelle 3, Zeile 5 [R12]	
		E2		- Ebenheitsanforderungen nach DIN 18202, Tabelle 3, Zeile 6 [R12]	
		E3		- Ebenheitsanforderungen nach DIN 18202, Tabelle 3, Zeile 6 [R 12] - Höhere Ebenheitsanforderungen sind gesondert zu vereinbaren. Dafür erforderliche Aufwendungen und Maßnahmen sind vom Auftraggeber detailliert festzulegen. Hinweis: Höhere Ebenheitsanforderungen, z.B. nach DIN 18202, Tabelle 3, Zeile 7, sind technisch nicht zielsicher erfüllbar.	
5	Arbeits- und Schalhautfugen ³	AF1		- Versatz der Flächen zwischen zwei Betonierabschnitten bis ca. 10 mm zulässig	
		AF2		- Versatz der Flächen zwischen zwei Betonierabschnitten bis ca. 10 mm zulässig - Feinmörtelaustritt auf dem vorhergehenden Betonierabschnitt muss rechtzeitig entfernt werden. - Trapezleiste o.ä. empfohlen	
		AF3		- Versatz der Flächen zwischen zwei Betonierabschnitten bis ca. 5 mm zulässig - Feinmörtelaustritt auf dem vorhergehenden Betonierabschnitt muss rechtzeitig entfernt werden. - Trapezleiste o.ä. empfohlen	
		AF4		- Planung der Detailausführung erforderlich - Versatz der Flächen zwischen zwei Betonierabschnitten bis ca. 5 mm zulässig - Feinmörtelaustritt auf dem vorhergehenden Betonierabschnitt muss rechtzeitig entfernt werden. - Weitere Anforderungen (z.B. Ausbildung von Arbeits- und Schalhautfugen) sind detailliert festzulegen.	

¹ Ebenheitsforderungen gelten nicht bei bearbeiteten oder strukturierten Flächen. ² Zu beachten sind auch die Abschnitte 5.1.2 und 7. ³ Arbeitsfugen bleiben sichtbar.

Abb. 2: Tabelle 2 aus dem Merkblatt "Sichtbeton"

Tabelle 4: Porigkeitsklassen

Zeile	Spalte	1	2	3	4
1	Porigkeitsklasse	P1	P2	P3	P4
2	maximaler Porenanteil ¹ in mm ²	ca. 3000	ca. 2250	ca. 1500	ca. 750 ²

¹ Porenanteil in mm² der Poren mit Durchmesser d in den Grenzen $2 \text{ mm} < d < 15 \text{ mm}$ (je Prüffläche 500 mm x 500 mm)
² 750 mm² entsprechen 0,30 % der Prüffläche (500 mm x 500 mm)

Abb. 3: Tabelle 4 aus dem Merkblatt "Sichtbeton2"

2.4.2 Mit optischen Mängeln behaftete Leistungen, die nachzubessern sind

Die folgenden Abweichungen sind bei fachgerechter Ausführung und angemessener Sorgfalt im Allgemeinen vermeidbar:

- Fehler beim Einbringen und Verdichten des Beton ("Kiesnester", stark sichtbare Schüttlagen u. ä.)
- Häufung von Rostfahnen an vertikalen Bauteilen sowie Rostspuren durch zurückgelassene Bewehrungsreste und Flechtdraht an den Untersichten horizontaler Bauteile
- heruntergelaufene Mörtelreste ("Nasen") durch undichte Arbeitsfugen an vertikalen Bauteilen
- willkürliche, ungeordnete Anordnung von Schalungsankern
- unsaubere Kantenausbildung durch beschädigte, verrutschte oder ungeeignete Dreikant- bzw. Trapezleisten
- Versätze über 10 mm zwischen Schalelementstößen und an Bauteilanschlüssen

- starke Ausblutung an Schalbrett- und Schalelementstößen sowie an Bauteilanschlüssen und Ankerlöchern (z. B. freiliegende Kornstruktur nach Austreten von Zementleim)
- stark ausgeprägte Schleppwassereffekte
- unterschiedliche Oberflächenqualitäten (Farbton/Textur) durch unsachgemäß gelagerte Schalung
- Verwendung von ungeeigneten Abstandhaltern und Mauerstärken
- unsauberer oder uneinheitlicher Verschluss von Ankerlöchern (falls gefordert).

2.4.3 Mit Mängeln behaftete Leistungen ohne Aussicht auf Mängelbeseitigung

Mit optischen Mängeln behaftete Leistungen, die mit vertretbarem Aufwand bzw. Aussicht auf Erfolg nicht nachgebessert werden können, so dass hier z. B. wegen Alternativmaßnahmen am Bauteil (Betonkosmetik, Anstrich, Verputz etc.) eine Wertminderung anzusetzen ist.

Bedingt vermeidbare Abweichungen im Erscheinungsbild der Ansichtsfläche sind solche, denen

zwar durch bestimmte Maßnahmen tendenziell entgegengewirkt werden kann, bei denen jedoch ein

Erfolg der Maßnahme wegen der vorhandenen Wechselwirkungen (Einflussfaktoren) nicht immer eintritt, z. B.:

- Wolkenbildungen und Marmorierungen
- Farbtonunterschiede zwischen aufeinander folgenden Schüttlagen
- Porenanhäufung im oberen Teil von vertikalen Bauteilen
- sich abzeichnende Bewehrung oder sich abzeichnenden Größtkorn infolge Berührung der
- sich abzeichnende Bewehrung wegen intensiver Berührung der Bewehrung beim Verdichten mit Innenrüttlern
- mehr als um 0,02 schwankende Wasserzementwerte
- geringe Ausblutungen an Schalbrett- und Schalenelementstößen sowie an Ankerlöchern
- Schleppwassereffekte in geringer Anzahl und Ausdehnung
- einzelne Kalk- und Rostfahnen an vertikalen Bauteilen
- Verfärbung an Untersichten von horizontalen Bauteilen durch Rostablagerung auf der Schalhaut
- kleine Kantenabbrüche bei der Ausführung scharfer Kanten.

Die Angaben zu den notwendigen Nacharbeiten (Reinigung der Flächen, Betonkosmetik o. ä.) sind für die einzelnen Elemente bzw. Bauwerksabschnitte sinnvollerweise in einer Arbeitsanweisung (Arbeitsanweisung Betonkosmetik) zusammenzustellen, wobei hier gleichzeitig weitergehende Auswertungen, wie z. B. Ermittlung von Wertminderungen, aufgenommen werden können.

2.5 Kriterien für die Abnahme

Grundsatz:

Es gilt der Bauvertrag unter Berücksichtigung:

- des Gesamteindrucks
- der Bezug auf die Referenzflächen.

Individuelle, unikatsbezogene Entscheidungen durch den Sachverständigen können hier nicht erwähnt werden, weil sowohl die Bauvertragsgestaltung als auch die Erfahrungen hinsichtlich der Referenzflächen sehr unterschiedlich sind.

Ggf. Wertminderung, z. B. durch modifizierte Nutzwertanalyseverfahren von:

- Aurnhammer [13]
- Oswald [14]
- Kamphausen.

Beispiel von Kamphausen: Nach Vorschlag der Beurteilung der Ausführungsqualität von Ruhnau.

Zur Bestimmung der Wertminderung von nicht mit vertretbarem Aufwand nachzubessernden Mängeln empfiehlt Ruhnau:

Eine optische Beeinträchtigung des Gesamteindrucks von Sichtbetonflächen (Ansichtsflächen) aufgrund der Abweichungen des "Soll" vom "Ist".

Der erste Schritt des Bewertungsverfahrens ist der, den Ist-Zustand des Bauwerkes/der Bauteile zu ermitteln und den Soll-Zustand zu bestimmen. Ein in der Praxis bewährtes und weithin anerkanntes Verfahren besteht darin, den "Soll-Wert" durch einzelne Kriterien zu beschreiben (Verfahren nach Aurnhammer). Dies sind elementare Merkmale und Funktionen, die die Ansichtsflächen erfüllen sollten und die unmittelbar auf diese Erfüllung hin geprüft werden können. Jedes dieser Kriterien hiervon gibt die Gewichtung (g) an.

Mit der Gewichtung geht eine gewisse Subjektivität des Sachverständigen einher. Diese Subjektivität ist bei Sachkenntnis nicht willkürlich, sondern beruht auf langjähriger Erfahrung und damit gewonnener Kompetenz und sie ist damit gegenüber der Öffentlichkeit und der Rechtsprechung zu verantworten.

Das in Kriterien aufgesplittete "Soll" bildet zusammen mit der vorgenommenen Gewichtung das Wertsystem, das der Bestimmung eines Minderwertes zugrunde liegt.

Die Beschreibung des "Ist"-Zustandes nimmt man zweckmäßigerweise in Form einer Kardinalskala mit einem Wertebereich von 0 bis 10 vor, das heißt, das zu bewertende Bauwerk/Bauteil wird benotet. Auf diese Weise lassen sich verschiedene Zustände, die den Grad einer Abweichung beschreiben, durch eine Abweichungszahl messbar machen.

Die Gesamtwertminderung wird aus den einzelnen Wertminderungszahlen zusammengefügt. Dieser Vorgang heißt Wertsynthese. Dazu werden alle Wertminderungszahlen m_i , von m_1 bis m_n aufaddiert. Alle Anteile zusammen ergeben den gesamten Minderwert m

Definition der optischen Beeinträchtigungen:

Grundlage der Bewertung ist die Definition von bedingt vermeidbaren Abweichungen gemäß Merkblatt "Sichtbeton" und ggf. weiteren vereinbarten Kriterien.

Der Minderungsbetrag für das Bauwerk/Bauteil ergibt sich aus dem ermittelten prozentualen Minderwert bezogen auf den Herstellungswert des betrachteten Bauwerkes/Bauteils.

2.6 Vorgehensweise bei Abweichungen

2.6.1 Allgemeines

Bei der Herstellung von Ansichtsflächen aus Beton können trotz größter Sorgfalt Abweichungen von der vertraglich vereinbarten Beschaffenheit entstehen.

Eine Abweichung kann sein:

- die bei einer Beurteilung gemäß Abschnitt 7.2 des Merkblattes festgestellte Beeinträchtigung des Gesamteindrucks einer Ansichtsfläche,
- die festgestellte Überschreitung eines durch die geforderte Sichtbetonklasse begrenzten Einzelkriteriums bei einer Beurteilung gemäß Abschnitt 7.3 des Merkblattes,
- die festgestellte Beeinträchtigung der Ansichtsfläche durch andere Einwirkungen (z. B. durch Witterung, Ausbau oder technische Gebäudeausrüstung).

Zur Feststellung einer Abweichung ist eine Beurteilung des IST-Zustandes des Bauwerkes bzw. der Bauteile vorzunehmen und mit dem SOLL-Zustand zu vergleichen. Hierzu ist eine genaue Beschreibung von Ursache, Art und Ausprägung der Abweichung erforderlich. Die Beurteilung von Abweichungen sollte von Fachleuten vorgenommen werden, die Erfahrungen im Betonbau und im Bauvertragsrecht besitzen.

2.6.2 Mängelbeseitigung und Beurteilung nach der Betonkosmetik

Bei der Mängelbeseitigung einer Ansichtsfläche soll eine möglichst große Übereinstimmung des Gesamteindrucks mit der vertraglich vereinbarten Beschaffenheit oder mit dem Aussehen benachbarter Ansichtsflächen erreicht werden. Mängelbeseitigungen erfordern große Sorgfalt und bleiben in der Regel auch bei Ausführung mit größtem handwerklichen Geschick als solche erkennbar. Aus diesem Grunde ist im Einzelfall zu prüfen, ob der Aufwand gerechtfertigt ist. Die Mängelbeseitigung ist unter Beachtung der örtlichen Bedingungen (Witterungseinflüsse, Bauteilgeometrien, Bauvolumen, Bauabläufe etc.) festzulegen. Hierbei hat sich das folgende Vorgehen bewährt:

- Die beteiligten Parteien legen die Technik zur Mängelbeseitigung nach der Herstellung und Beurteilung von Erprobungsflächen für die einzelnen Ansichtsflächen fest.
- Es soll eine Arbeitsanweisung erstellt werden.
- Es ist zu prüfen, ob Fertigprodukte, z. B. vorkonfektionierter Mörtel oder Spachtel, verwendet werden können oder ob die Reparaturmörtel oder spachtel aus den Ausgangsstoffen des Betons des zu bearbeitenden Bauteils hergestellt werden sollten.

In Abbildung 4 wird ein systematisches Vorgehen zur Durchführung von Mängelbeseitigungen/Ausbesserungen an Ansichtsflächen aus Beton dargestellt. Tabelle 1 enthält ein Beispiel für die praktische Anwendung.

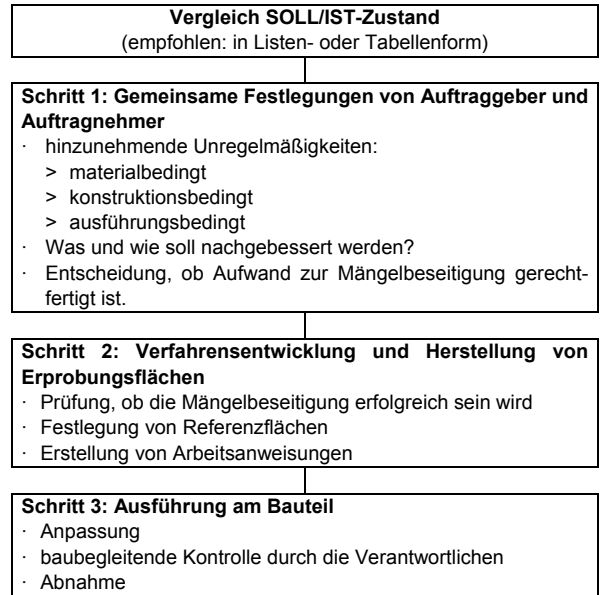


Abb. 4: Systematisches Vorgehen zur Durchführung von Mängelbeseitigungen an Ansichtsflächen aus Beton

Tab. 1: Beispiele für häufige Abweichungen und Mängelbeseitigungs- bzw. Ausbesserungsmethoden

Zeile	1 Abweichung	2 Mängelbeseitigungs- bzw. Ausbesserungsmethode
1	Arbeitsfugen ausgelaufen und ausgesandet	1. reinigen (Entsanden der Fugen) 2. abkleben 3. spachteln 4. aushärten 5. nachbehandeln 6. schleifen 7. spachteln 8. Feinschliff
2	Kanten beschädigt (ausgebrochen, nicht scharfkantig)	1. reinigen 2. spachteln 3. nachbehandeln 4. schleifen
3	Ebenflächigkeitsausgleich von weniger als 10 mm	1. spachteln 2. nachbehandeln 3. schleifen
4	Flächenreinigung (Rost, Kalk etc.)	1. reinigen mit Rostentfernern / Betonreinigungsmitteln
5	starke Schüttlagenabzeichnung	1. Feinschliff 2. Feinspachtel 3. Feinschliff

2.6.3 Beurteilungsverfahren

Wenn die Mängelbeseitigung eher eine Verschlechterung des optischen Eindrucks der Sichtbetonfläche zur Folge hat, ist die verbleibende Abweichung zu bewerten.

Zur Beurteilung und zur Bewertung von Ansichtsflächen, die dem Soll nicht entsprechen, durch den Sachverständigen haben sich in der Praxis die bereits o. g. Verfahren von Aurnhammer, Oswald und Kamphausen für die Sichtbetonansichtsflächen bewährt.

Diese Verfahren setzen Erfahrungen bei der Beurteilung von Sichtbetonflächen voraus.

Weitere Einzelheiten zur Bewertung von Ansichtsflächen enthält das Merkblatt an anderen Stellen, insbesondere in den Tabellen im Anhang. (siehe Tabellen A1-A6)

3 Ausblick

Zur **möglichst objektiven Beurteilung von Sichtbetonflächen** fördern der DBV und die GFAL in Verbindung mit dem Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit innerhalb der industriellen Gemeinschaftsforschung und –entwicklung eine Initiativprogramm. Dies erfolgt im Rahmen eines Programms "Zukunftstechnologien für kleine und mittlere Unternehmen" (ZUTECH), Projektlaufzeit 01.11.2003 bis 31.01.2006. Dieses bildgestützte Bewertungsverfahren für Sichtbetonoberflächen für Porenauszählung und Farbtonunterschiede wurde in den Vorträgen von Prof. Schießl und Prof. Hillemeier bereits erwähnt. An diesem ZUTECH-Projekt beteiligen sich:

- Gesellschaft zur Förderung angewandter Informatik, Dr. Tiedtke und Prof. Stanke

- TU Berlin, Institut für Bauingenieurwesen Prof. Hillemeier
- TU Dresden, Institut für Fördertechnik, Baumaschinen und Logistik, Prof. Kunze, Frau Hoske.

Als vorläufiges Resultat liegt den Beteiligten vor:

- Luftporenbewertung mit Bildern und standardisierter Beschreibung, die wiederholend durchgeführt werden kann
- Graukeile für Farbklassifikationen
- Versuch einer Ästhetikbewertung
- Erkennung technologischer Elemente.

Das Projekt ist noch nicht abgeschlossen. Die Ergebnisse werden für den Fachmann, der eine Bewertung vornimmt, hilfreich sein.

Tabelle A.1: Anforderungen an die Ausführung in Abhängigkeit von Textur und Stoß der Schalelemente

Anforderung bezüglich Eigenschaft	Texturklasse		
	T1	T2	T3
Textur	- Aufwand wie bei DIN 1045 [R1] üblich	wie Klasse T1, zusätzlich: - gleiche Art und Vorbehandlung der Schalhaut sicherstellen - Sauberkeit der Schalung und dünnen, gleichmäßigen Trennmittelauftrag sicherstellen - Wechsel der Betonzusammensetzung bzw. der Betonausgangsstoffe ausschließen - Schalungssystem mit geringen Fertigungstoleranzen wählen - bei Trägerschalung ggf. Befestigung der Platten von Rückseite vereinbaren - Abdichtung der Schalhautstöße vereinbaren - Schalungseinlagen vereinbaren - Schalungsanker möglichst gleichmäßig fest anziehen - fachgerechte Lagerung der Schalung vorsehen - möglichst gleichalte Schalhautplatten verwenden - Erprobungsfläche empfohlen	wie Klasse T2, zusätzlich: - Anforderungen bezüglich Schalungsstöße und Rahmenabdruck sind detailliert festzulegen - Detailplanung der Schalung (Abdichtungen, Stöße, Fußpunkt) notwendig - Schalung bei Lagerung vor Witterungseinflüssen schützen - Schalungssystem mit sehr kleinen Fertigungstoleranzen wählen (mögliche Einschränkungen bei der Wahl beachten) - Versiegelung/Abdichtung der Schnittkanten vereinbaren - Kantenschutz der Schalelemente vorsehen - Entwurfsplanung vereinbaren - kurze Zeitspanne zwischen Aufstellen der Schalung und dem Betoneinbau vereinbaren - Erstellung von Arbeitsanweisungen vorsehen - Vorgaben für die Ausbildung von Arbeitsfugen definieren (Trapezleiste, flächenbündige Fugen u.ä.) - Fußpunkt: Aufstellen der Schalung auf nichtsaugende Schaumstoffstreifen oder Abdichten der Schalung am Wandfuß - Kantenschutz der ausgeschalteten Bauteile vorsehen - mindestens 2 Erprobungsflächen vorsehen

Tabelle A.2: Anforderungen an die Ausführung in Abhängigkeit von der Porigkeitsklasse

Anforderung bez. Eigenschaft	Leistungsumfang bei Porigkeitsklasse			
	P1	P2	P3	P4
Porigkeit	- Aufwand wie bei DIN 1045 [R1] üblich	wie Klasse P1, zusätzlich: - Betonsorte, Trennmittel und Schalhaut aufeinander abstimmen - gleiche Art und Vorbehandlung der Schalhaut sicherstellen - Sauberkeit der Schalung und dünnen, gleichmäßigen Trennmittelauftrag sicherstellen - Erprobungsfläche empfohlen	wie Klasse P2, zusätzlich: - besondere Sorgfalt beim Betonieren im Bereich von unterschrittenen Schalungen, Deckelschalungen, horizontalen Kanten von Leisten und Einbauteilen erforderlich - Wechsel der Betonzusammensetzung bzw. der Betonausgangsstoffe ausschließen - Verwendung von Restwasser und Restbeton ausschließen - Nachverdichtung der obersten Betonierlage - mindestens 2 Erprobungsflächen vorsehen	wie Klasse P3, zusätzlich: - besondere Sorgfalt beim Betonieren im Bereich von horizontalen Kanten von Leisten und Einbauteilen erforderlich - keine unterschrittenen Schalungen, Deckelschalungen vorsehen - mindestens 3 Erprobungsflächen vorsehen

Tabelle A.3: Anforderungen an die Ausführung in Abhängigkeit von der Farbtongleichmäßigkeits-Klasse

Anforderung bez.	Farbtongleichmäßigkeits-Klasse		
Eigenschaft	FT1	FT2	FT3
Farbtongleichmäßigkeit	<ul style="list-style-type: none"> - Aufwand wie bei DIN 1045 [R1] üblich 	wie Klasse FT1, zusätzlich: <ul style="list-style-type: none"> - Betonsorte, Trennmittel und Schalhaut aufeinander abstimmen - gleiche Art und Vorbehandlung der Schalhaut sicherstellen - Sauberkeit der Schalung und dünnen, gleichmäßigen Trennmittelauftrag sicherstellen - Wechsel der Betonzusammensetzung bzw. der Betonausgangsstoffe ausschließen - Verwendung von Restwasser und Restbeton ausschließen - Mischdauer je Charge mindestens 60 Sekunden - Lieferung für zusammenhängende Bauteile jeweils nur aus einer Produktionsstätte (Lieferwerk) - ggf. mehrere Erprobungsflächen vorsehen 	wie Klasse FT2, zusätzlich: <ul style="list-style-type: none"> - Bauzeitplanung muss witterungsbedingte Einschränkungen/Verzögerungen berücksichtigen - Bauteilgeometrie und Bewehrungsführung müssen so geplant sein, dass eine einfache und zügige Betonage möglich ist. Schütt- und Rüttelöffnungen in gleichmäßigen Abständen sind vom Planer vorzusehen. - Bewehrungsführung, Schütt- und Rüttelöffnungen sind so zu planen, dass das Berühren von Schalung und Bewehrung mit dem Innenrüttler weitgehend vermieden werden kann. - Schalungsstöße, Durchbindungen und Aufstandsflächen sind gegen das Auslaufen von Zementleim abzudichten. Die Art der Abdichtung ist vom Planer festzulegen. - Betondeckung c_{nom} von mindestens 30 mm vorsehen - komplizierte Bauteilgeometrien vermeiden, Schalungsanker müssen gleichmäßig angezogen werden können. - Aufstellen eines Qualitätssicherungsplans mit Einzelheiten zu Material, Ausführung und Überwachung - kein Betonieren bei starken Regenfällen - Spülwasserkontrolle vor der Beladung eines jeden Fahrmschers durchführen - mehrere Erprobungsflächen vorsehen - Einhaltung des Wasserzementwerts auf $\pm 0,02$ genau, bzw. Einhaltung der Ausgangskonsistenz a_{10} auf ± 20 mm genau - Einhausung des Bauteils als Nachbehandlungsmaßnahme und zum Schutz vor Witterungseinflüssen vorsehen.

Tabelle A.4: Anforderungen an die Ausführung in Abhängigkeit von den Ebenheitsklassen

Anforderung bez.	Ebenheitsklasse		
Eigenschaft	E1	E2	E3
Ebenheit der Sichtbetonflächen	<ul style="list-style-type: none"> - Ebenheitsanforderungen nach DIN 18 202, Tab. 3, Zeile 5, vereinbaren - Einmessen der Schalung erforderlich - zusätzliche Toleranzen aus anderen Normen berücksichtigen - Maßkoordination bei Verwendung von Schalungen von verschiedenen Herstellern vornehmen - auf steifes Bewehrungsgeflecht achten: ausreichende Anzahl von Abstandhaltern berücksichtigen - Schalungsanker möglichst gleichmäßig anziehen - Sicherung von Einbauteilen gegen Verschiebung berücksichtigen - ausreichende Abstützung des Schalungssystems berücksichtigen 	wie Klasse E1, jedoch zusätzlich: <ul style="list-style-type: none"> - Ebenheitsanforderungen nach DIN 18 202, Tab. 3, Zeile 6, vereinbaren - höhere Anforderungen an die Ebenflächigkeit sind im Vertrag als Leistungsposition zu berücksichtigen - sorgfältige Lagerung der Schalhaut erforderlich - besondere Regelungen für gekrümmte Schalungen und Sonderausführungen treffen - u.U. begrenzte Einsatzzahl der Schalung berücksichtigen - sorgfältige Reinigung der Schalung erforderlich - Fertigungstoleranzen des zum Einsatz kommenden Schalungssystems berücksichtigen 	wie Klasse E2, jedoch zusätzlich: <ul style="list-style-type: none"> - ggf. über Zeile 6 von Tab. 3 in DIN 18 202 hinausgehende Ebenheitsanforderungen vertraglich vereinbaren - Planung und Festlegung der zum Erreichen von über Zeile 6 von Tab. 3 in DIN 18 202 hinausgehende Ebenheitsanforderungen durch den Auftraggeber - geodätisches Einmessen der Schalung erforderlich - Prüfung der Maßtoleranzen und der Ebenflächigkeit von Schalhaut und Befestigung vor Ort - ggf. Detailplanung notwendig - Herstellung von Erprobungsflächen vertraglich vereinbaren

Tabelle A.5: Anforderungen an die Ausführung in Abhängigkeit von Arbeits- und Schalhaftugen-Klassen

Anforderung bez.	Arbeits- und Schalhaftugen-Klasse			
Eigenschaft	AF1	AF2	AF3	AF4
Arbeits-, Schalhaftuge	<ul style="list-style-type: none"> - Aufwand wie bei DIN 1045 [R1] üblich 	wie Klasse AF1, zusätzlich: <ul style="list-style-type: none"> - Feinmörtelaustritt aus dem vorgehenden Betonierabschnitt entfernen 	wie Klasse AF2, zusätzlich: <ul style="list-style-type: none"> - Schalungssystem mit geringen Fertigungstoleranzen wählen - mindestens 2 Erprobungsflächen vorsehen 	wie Klasse AF3, zusätzlich: <ul style="list-style-type: none"> - detaillierte Festlegung aller Maßnahmen durch den Planer - Festlegung der Anzahl der Erprobungsflächen durch den Planer

Tabelle A.6: Anforderungen an die Ausführung in Abhängigkeit von Erprobungsflächen und der Schalhautklasse

Anforderung bez.	Sichtbetonklasse			
Eigenschaft	SB 1	SB 2	SB 3	SB 4
Erprobungsfläche	in der Regel nicht erforderlich	Herstellung von Erprobungsflächen freigestellt	Herstellung von Erprobungsflächen wird empfohlen	Herstellung von Erprobungsflächen ist erforderlich
Eigenschaften der Schalhaut	nach den Tabellen 1 und 3			

4 Literatur:

4.1 Normen und Regelwerke:

- [R1] DIN 1045: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton. Ausgabe 07.2001.
Teil 1: Bemessung und Konstruktion
Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1
Teil 3: Bauausführung
Teil 4: Ergänzende Regeln für die Herstellung und die Konformität von Fertigteilen
- [R2] DIN EN 206-1: Beton
Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität. Ausgabe 07.2001
- [R3] Fachvereinigung Deutscher Betonfertigteilebau e.V.: Merkblatt über Sichtbetonflächen von Fertigteilen aus Beton und Stahlbeton. Fassung 02.99
- [R4] DIN 18217: Betonflächen und Schalungshaut. Ausgabe 12.81
- [R5] DIN 18500: Betonwerkstein. Begriffe, Anforderungen, Prüfung, Überwachung. Ausgabe 04.91
- [R6] Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen (VOB). Teile A und B. Ausgabe 2002
- [R7] DIN 18331: VOB Verdingungsordnung für Bauleistungen – Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV); Beton- und Stahlbetonarbeiten. Ausgabe 12.2002
- [R8] Bundesanstalt für Straßenwesen: ZTV-ING – Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten. Dortmund: Verkehrsblatt-Verlag 2003
- [R9] Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V.: Merkblatt Betonierbarkeit von Bauteilen aus Beton und Stahlbeton. Fassung 2004
- [R10] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb): Richtlinie Selbstverdichtender Beton. Ausgabe 11.2003
- [R11] Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V.: Merkblatt Selbstverdichtender Beton (in Vorbereitung)
- [R12] DIN 18202: Toleranzen im Hochbau. Bauwerke. Ausgabe 04.97
- [R13] Deutscher Beton-Verein E.V.: Merkblatt Trennmittel für Beton – Teil A: Hinweise zur Auswahl und Anwendung. Fassung 03.97
- [R14] Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V.: Merkblatt Abstandhalter. Fassung 07.2002
- [R15] DIN 18216: Schalungsanker für Betonschalungen; Anforderungen, Prüfung, Verwendung. Ausgabe 12.86

4.2 Weitere Literatur:

- [1] Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V.: Sichtbeton. Vorträge der DBV-Arbeitstagung am 19. September 2000 in München. Heft 1 er DBV-Schriftenreihe. Berlin: Selbstverlag 2000
- [2] Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V.: Sichtbeton. Vorträge der DBV-Arbeitstagung am 13. März 2002 in Duisburg. Heft 5 der DBV-Schriftenreihe. Berlin: Selbstverlag 2002
- [3] Bayer AG: Einfärbung von Beton – Verarbeitungstechnische Hinweise. Leverkusen: Selbstverlag 1980
- [4] Kind-Barkauskas, F. (Hrsg.): Beton und Farbe – Farbsysteme, Ausführung, Instandsetzung. Stuttgart/München: Deutsche Verlags-Anstalt 2003
- [5] Stroteich, H.-H.: Geschliffene Architektur-Bauteile. Betonwerk + Fertigteil-Technik 61 (1995), Heft 5, S. 66 – 72
- [6] Heufers, H., Schulz, W.: Neuartige Oberflächengestaltung mit farbigen Zuschlägen. Betonwerk + Fertigteil-Technik 46 (1980), Heft 9, S. 531 – 539
- [7] Huberty, J. M.: Fassaden in der Witterung. Düsseldorf: Beton-Verlag 1983
- [8] Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V. (Hrsg.): Empfehlung des Arbeitskreises Prüfverfahren zur Beurteilung des Wasserabsonderns ("Eimertest"). In Vorbereitung
- [9] Ebeling, K.: Sichtbeton – Planungs- und Ausführungshinweise – Der Aufgabenbereich des Bauingenieurs. beton 48 /1998), Heft 4, S. 208 – 213
- [10] Goldammer, K.-R.: Qualitätssicherung von Sichtbetonarbeiten als Aufgabe der Bauleistung. Beton- und Stahlbetonbau 96 (2001), Heft 11, S. 725 – 731
- [11] Kling, B., Peck, M.: Sichtbeton im Kontext der neuen Betonnormen. beton 53 (2003), Heft 4, S. 170 – 176
- [12] Schulz R.-D.: Kosmetik von Sichtbeton. Beton- und Stahlbetonbau 97 (2002=, Heft 12, S. 635 – 643
- [13] Aurnhammer, H. E.: Verfahren zur Bestimmung von Wertminderungen bei Mängeln und Schäden. Aachener Bausachverständigentage. Stuttgart: Forum Verlag 1978
- [14] Oswald, R., Abel, R.: Hinzunehmende Unregelmäßigkeiten bei Gebäuden. Wiesbaden/Berlin: Bauverlag GmbH 1998
- [15] ALSEN AG et al. (Hrsg.): Blauverfärbung von Betonoberflächen – Nur temporär! – Faltblatt der BetonMarketing Nord GmbH, Fassung November 2002
- [16] Fiala H., Raddatz, J.: Braune Verfärbungen auf Sichtbetonflächen. Beton-Information 43 (2003), Heft 2, S. 27 – 33
- [17] Zillner, J.: Einfluss von Schalung, Schalungshaut, Trennmittel und Umwelt auf die Sichtbetonoberfläche. In: Vorträge zu den Regionaltagungen 2004. Schriftenreihe des Deutschen

Beton- und Bautechnik-Verein E.V., Heft 8. August 2004

[18] Heinecke, W.: Schalungssysteme nach den Vorgaben des Architekten und des neuen Merkblatts "Sichtbeton". In: Vorträge zu den Regionaltagungen 2004. Schriftenreihe des Deutschen Beton- und Bautechnik-Verein E.V., Heft 8. August 2004

[19] Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik: Geschalte Betonflächen ("Sichtbeton"). Ausgabe Juni 2002

Sichtbetonflächen aus vertragsrechtlicher Sicht

Gerd Motzke

Zusammenfassung

Die rechtliche Beurteilung von Sichtbetonflächen nimmt ihren Ausgangspunkt am Recht. Das kann Gesetzesrecht oder Vertragsrecht sein. Bei dem gesetzten Recht handelt es sich um das Werkvertragsrecht des BGB, an dem auch ein individuell ausgehandelter Vertrag anbindet. Im Vertrag besteht die Möglichkeit, ausgehandelt oder vorformuliert besondere Anforderungen an die Qualität einer Leistung unter Funktionstauglichkeitsgesichtspunkten oder unter ästhetischen Aspekten zu stellen. Vertragsrecht kommt auch zum Tragen, wenn die Vertragspartner die VOB/B in den Vertrag einbeziehen. Hierdurch allein wird die rechtliche Beurteilung bei Streitigkeiten zum Sichtbeton nicht wesentlich beeinflusst, wenn auch die VOB/B in § 13 Nr. 2 in der alten wie auch in der Fassung von 2002 einen interessanten, eventuell erweiterungsfähigen Aspekt enthält.

Die Schuldrechtsreform in der Bundesrepublik hat mit Wirkung ab 1.1. 2002 den Mangelbegriff des Werkvertragsrechts und damit auch den des Bauvertrags geändert. Das ist in Anlehnung an das Kaufrecht geschehen, wobei die subjektive Komponente des Fehlerbegriffs stark betont wird. Das darf jedoch gerade mit Blick auf den Sichtbeton nicht dahin verstanden werden, dass damit das subjektive ästhetische Empfinden zum Beurteilungsmasstab wird. Entscheidend sind die im Vertrag und seinen Bestandteilen formulierten Anforderungsparameter. Nach der Neufassung des § 633 Abs. 2 BGB ist das Werk frei von Sachmängeln, wenn es die vereinbarte Beschaffenheit hat. Das macht den Anforderungsparameter Beschaffenheitsvereinbarung aus. Soweit die Beschaffenheit nicht vereinbart ist, ist das Werk frei von Sachmängeln, wenn es sich für die nach dem Vertrag vorausgesetzte, sonst für die gewöhnliche Verwendung eignet und eine Beschaffenheit aufweist, die bei Werken der gleichen Art üblich ist und die der Besteller nach der Art des Werks erwarten kann. Das kennzeichnet den Anforderungsparameter Verwendungseignung. Die bisher vertrauten Begriffe der zugesicherten Eigenschaft, der gewöhnlichen und der vertraglich vorausgesetzten Gebrauchstauglichkeit wie auch des Werts sind gestrichen. Sie werden durch die neuen Formeln ersetzt. Dabei entspricht die Verwendungseignung der Gebrauchstauglichkeit und dem Wert. Die Beschaffenheitsvereinbarung tritt an die Stelle der zugesicherten Eigenschaft.

Die VOB/B wird in der Überarbeitung 2002 daran anknüpfen und diese neue Terminologie übernehmen. Allerdings wird der Verstoß gegen die anerkannten Regeln der Technik als eigener Sachmangeltatbestand in § 13 Nr. 1 VOB/B erhalten bleiben. Für BGB und VOB/B ist signifikant, dass beide Ordnungen die Sachmangelfreiheit beschreiben und dazu schweigen, unter welchen Voraussetzungen ein Sachmangel vorliegt. Insoweit gilt jedoch selbstverständlich die Regel, dass den Sachmangel das „Zurückbleiben“ des Istzustandes hinter dem durch die Sachmangelfreiheitskriterien markierten Sollzustand (Erfolgssoll) ausmacht.

Diese Einordnungsaspekte bilden maßgebliche Kriterien für die Beurteilung von Sichtbetonmängeln.

1 Beton - Sichtbeton - vertragsrechtlicher Ansatz

Der Beton erweist sich im Rahmen einer Vertragsbeziehung als Baustoff, und damit als Mittel für die Herstellung des Bauwerks, das unter Erfolgsgesichtspunkten Gegenstand der Beurteilung auf seine Sachmangelfreiheit ist. Eigenschaften des Betons, seine Zusammensetzung, seine Kenndaten, die Verfehlung dieser Merkmale und Qualitäten sind nicht an sich von Bedeutung, sondern beeinflussen das Endprodukt. Zu dessen Herstellung kann Frischbeton, Transportbeton oder Beton mit besonderen Eigenschaften eingesetzt werden. Diese Betone lassen sich jedoch nicht mit dem Sichtbeton vergleiche-

chen. Sichtbeton ist das Endprodukt des erhärteten Betons, der mittels Frischbeton, Transportbeton oder Betonen mit besonderen Eigenschaften hergestellt sein kann. Mit Sichtbeton werden Anforderungen an den fertigen, ausgehärteten und ausgeschalteten Beton gestellt. Die Beurteilungskriterien werden an die gestaltete Außenfläche herangetragen, wenn auch die Zusammensetzung des Baustoffs Beton das Erscheinungsbild in Verbindung mit der Schalung maßgeblich beeinflussen kann. Auf welche Weise diese Qualitäten der Ansichtsfläche hergestellt werden, welche Betone und Schalungen hierfür eingesetzt werden, mag technisch das Entscheidende sein, ist rechtlich jedoch prinzipiell von untergeordneter Bedeutung. Denn rechtlich zählt auf der Grundla-

ge des Bauvertrages als einem erfolgsverpflichteten Werkvertrag das Ergebnis und nicht die Tätigkeit. Den Werkvertrag kennzeichnet die Subsidiarität der Tätigkeitspflicht gegenüber der Erfolgsverpflichtung. Der vom Unternehmer zu entfaltenden Tätigkeit kommt gegenüber dem geschuldeten Erfolg nur eine untergeordnete Bedeutung zu. Wenn allerdings Tätigkeitsvorgaben im Leistungsverzeichnis der Art nach das Endprodukt und damit die Ansichtsfläche beeinflussen, erhalten die Verwirklichungsvoraussetzungen durchaus rechtliche Bedeutung. Der Tätigkeitsbeschrieb kann durch Stoff- und Mittelvorgabe das Ergebnis einer gestalteten Oberfläche beeinflussen und damit den geschuldeten Erfolg bestimmen aber auch konterkarieren.

Beispiel: Im LV ist als Schalung vorgesehen eine nichtsaugende Schalung aus Stahl/Blech oder aus kunststoffbeschichteten Tafeln, gleichzeitig wird aber die Forderung nach Porenfreiheit und einheitlicher Farbtonausbildung gestellt. Dann heben sich diese Anforderungskriterien aus technischer Sicht mehr oder minder auf. Denn technische Erkenntnisse belegen, dass eine - wie hier vorliegend - nichtsaugende Schalung das Entstehen von Poren fördert und Wolkenbildungen und Farbtonunterschiede begünstigt.

Konsequenz: Der Unternehmer wird zwar den Vertrag abschließen, wird aber vor Ausführung Bedenken nach § 4 Nr. 3 VOB/B oder bei einem BGB-Bauvertrag nach Treu und Glauben deshalb anmelden, weil er Schäden von seinem Auftraggeber abwenden sollte. In einem solchen Fall sichert nämlich das „Bausoll“ im Sinne des § 2 Nr. 1 VOB/B nicht das „Erfolgssoll“ im Sinne der Sachmangelfreiheit.

Rechtlich ist die Festlegung des „Bausoll“, also die vertragsrechtliche Bestimmung der vom Unternehmer zu erbringenden Leistungen bedeutsam. Das Bausoll in diesem Sinne ist jedoch vom Erfolgssoll im Sinne der Sachmangelfreiheit zu unterscheiden. Das Bausoll hat mit der Vergütungsfrage, das Erfolgssoll hat mit der Sachmangelhaftung zu tun. Die Beschaffenheitsvereinbarung und die Verwendungseignung des neuen Rechts sind mit dem Erfolgssoll zu verknüpfen. Eine Leistungsbeschreibung enthält grundsätzlich das Bausoll i.S.d. § 2 Nr. 1 VOB/B und verfolgt regelmäßig den Zweck, damit den werkvertraglich geschuldeten Erfolg zu erreichen. Aus der Leistungsbeschreibung kann sich eine Beschaffenheitsvereinbarung oder eine Verwendungseignungsangabe (Erfolgssoll) ableiten lassen. Die technischen Abhängigkeiten und Bedingtheiten sowie die Erkenntnisse hierüber müssen Anlass sein, das Bausoll dementsprechend zu formulieren oder gegenüber derartigen Anforderungen nach Vertragsschluss Bedenken anzumelden, wenn LV-Vorgaben und geforderte, der Sachmangelfreiheit dienende Qualitäten (Erfolgssoll) nicht aufeinander abgestimmt sind.

Dem besseren Verständnis hinsichtlich der Unterscheidung zwischen Bausoll und Erfolgssoll dient

folgendes Beispiel: Der Teil III einer Ausschreibung befasst sich mit dem Sichtbeton. In einer Vorbemerkung heißt es die Ansichtsfläche müsse frei von Poren, Graten, Schüttlinien und Wolkenbildung sein. Teilleistungspositionen beschreiben dann Näheres hinsichtlich Schalung und Beton. Der Inhalt der Vorbemerkung macht das Erfolgssoll aus, die Teilleistungspositionen bilden das Bausoll.

1.1 Aspekt der Erfüllbarkeit / bedingten Erfüllbarkeit

Der Techniker neigt dazu, dem, was technisch nicht oder nur schlecht erfüllbar ist, rechtlich/vertragsrechtlich keinen Stellenwert beizumessen. Etwa mit der Argumentation, dass Unmögliches vom Recht nicht verlangt werden könne. Das ist ein Irrtum: Wer viel verspricht, hat auch für vieles einzustehen. Wenn die Verwirklichung einer versprochenen Leistung an den technischen Möglichkeiten scheitert, es besser als abgeliefert nicht gemacht werden kann, dann entfällt die Sachmangelhaftung nicht. Der Vertrag ist nicht wegen Unmöglichkeit unwirksam. Das Sachmangelrecht greift ein¹. Der Vertrag ist nach § 275, § 311 a BGB nicht unwirksam, wenn ein Unternehmer Porenfreiheit und vollkommen einheitliche Farbtonung frei von jeglicher Wolkenbildung verspricht, was technisch unmöglich hergestellt werden kann. Wird dieses Versprechen als Beschaffenheitsvereinbarung verstanden, ordnen sowohl § 633 Abs. 2 Satz BGB als auch § 13 Nr. 1 VOB/B jegliche Abweichung als Sachmangel ein; die Frage der Möglichkeit oder Unmöglichkeit, des Aufwands und Ähnliches ist dem Wortlaut beider Ordnungen nach bedeutungslos. Dieses Versprechen wird zum Parameter für die Beurteilung der Mangelfreiheit der zur Ausführung gekommenen Leistung. Gerade wer als technischer Kundiger derartige Verträge abschließt, und die technischen Zusammenhänge und Bedingtheiten kennt, verdient wohl auch nach allgemeiner Betrachtungsweise nur in eingeschränkter Weise Schutz durch das Recht. Dieser Schutz kann, das deutet § 13 Nr. 2 VOB/B an, darin liegen, dass Abweichungsgrade festgestellt werden und innerhalb einer Skalierung die Feststellung getroffen wird, dass die vorhandene Abweichung nach der Verkehrssitte bedeutungslos ist.

Das ist die Gefahr: Die Beschreibung von Qualitätsmerkmalen und deren vertragsrechtliche Absicherung in einem Bauvertrag kann nach neuem Recht (gültig ab 1.1.2002) dazu führen, dass Beschaffenheitsvereinbarungen vorliegen. Verfehlt der Unternehmer die versprochenen Merkmale, liegt unabhängig vom Verschulden und unabhängig davon, ob das Versprochene überhaupt geleistet werden kann, ein Sachmangel vor. Auf die Verwendungseignung des Bauteils einschließlich der optischen Qualitäten kommt es nach der Formulierung des § 633 Abs. 2 Satz 1 BGB nicht an. Der Sach-

¹ BGHZ 54,238; Palandt/Heinrichs, BGB, 61. Aufl., § 306 Rdn. 14

mangel hängt nicht davon ab, ob infolge der Qualitätsverfehlung die Verwendungseignung in irgendeiner Weise eine Einschränkung oder gar eine Aufhebung erfährt.

1.2 Bedeutungslosigkeit des Verschuldensmoments

Soweit das Betonhandbuch² Forderungen als nur bedingt oder nicht erfüllbar bezeichnet, hat diese Feststellung einen technischen, nicht aber auch gleichzeitig einen rechtlichen Stellenwert. Wer nur bedingt Erfüllbares unbedingt verspricht, geht rechtlich verbindliche Versprechen ein. Er steht für das Scheitern ein, weil der Vertrag an der Stelle nicht unwirksam ist und das Sachmängelrecht des Werkvertrages nicht am Verschulden und Machbaren anknüpft, soweit die Mängelbeseitigung und die Minderung betroffen sind. Der Auftragnehmer hat für die Mangelfreiheit gleichsam garantiemäßig einzustehen. Der Aspekt der Machbarkeit erfährt allerdings im Rahmen der Schuldrechtsreform eine gewisse Anerkennung, soweit die gewöhnliche Verwendungseignung betroffen ist. Denn die gewöhnliche Verwendungseignung wird in § 633 Abs. 2 Nr. 2 mit einer Beschaffenheit verknüpft, die bei Werken der gleichen Art üblich ist und die der Besteller nach der Art des Werks erwarten kann. Diese artgleiche Üblichkeit in Verbindung mit der berechtigten Bestellererwartung kann durchaus insofern mit der Machbarkeit verknüpft werden, als das Erfolgssoll bei einem Sichtbeton danach bestimmt wird, was bei ordnungsgemäßer und handwerklich sorgfältiger Leistung mit den ausgeschriebenen Stoffen erreichbar ist.

1.3 Baupraktisches Fazit

Rechtlich/Vertragsrechtlich steht deshalb das im Leistungsverzeichnis enthaltene Versprechen im Mittelpunkt. Dieses Versprechen, das Näheres zum Bausoll und zum Erfolgssoll besagt, kann eine Beschaffenheitsvereinbarung beinhalten oder eine vertragliche bzw. gewöhnliche Verwendungseignung wiedergeben. Auf die Formulierung des Erfolgssolls hat der Auftragnehmer Einfluss zu nehmen, will er die Einstandspflicht beeinflussen. Benennt das Leistungsverzeichnis einzelne Qualitätsmerkmale liegt eine – für den Unternehmer gefährliche – Beschaffenheitsvereinbarung nahe. Diese Merkmale können jedoch auch im Dienste der Sicherung einer bestimmten Verwendungseignung stehen und deshalb als eine unselbständige Beschaffenheitsvereinbarung einzustufen sein. Dann hängt die Sachmängelhaftung davon ab, ob die Verwendungseignung tatsächlich eingeschränkt ist. Insofern ist der Unternehmer gehalten, sorgfältig auf die textliche Abfassung des Leistungsverzeichnisses als Ausdruck des vertraglich verfolgten Erfolgssolls zu achten. Die dazu gehörige Beschreibung der vertraglichen Leistung (Bausoll = Leistungssoll) im Sinne des § 2 Nr. 1

VOB/B ist bezüglich der Deckungsgleichheit mit den Erfolgssollvorgaben daraufhin zu vergleichen, ob mit dem Leistungssoll das Erfolgssoll überhaupt erreichbar ist. Ist dies dem Unternehmer aus verschiedenen Gründen eine Einflussnahme verwehrt, z.B. weil die Vorgaben so lauten oder der Auftragnehmer im Wettbewerb um den Auftrag kämpft, dann ist nach Vertragsschluss auf Bedenken aufmerksam zu machen, Vorbehalte sind anzumelden. Das trifft dann zu, wenn die im Leistungsverzeichnis näher beschriebenen Arbeitsschritte und Materialien zur Erzielung des ebenfalls beschriebenen Bausolls ungeeignet oder nur eingeschränkt tauglich sind.

2 Ausgangspunkte Begriffsbestimmung

Sichtbeton ist nicht ein Beton mit besonderen Eigenschaften im fachtechnischen Sinn. Dazu gehört z.B. ein wasserundurchlässiger Beton, ein Beton mit besonders hohem Verschleißwiderstand usw. Diese Betone mit besonderen Eigenschaften haben bereits aus technischer Sicht ihre besonderen Qualitätsanforderungen. Das einschlägige technische Regelwerk gibt dazu definitiv und klare Antworten. Diese Kriterien werden in das Recht übernommen, wenn der Vertrag die Ausführung derartiger Betone verlangt und ein entsprechendes Versprechen abgegeben wird.

Für Sichtbeton fehlt es in technischen Regelwerken an vorweg aufgestellten, eindeutig messbaren Anforderungen an das Bausoll, auf die einfach zurückgegriffen werden kann.

KONSEQUENZ: Die Vertragspartner sind aufgerufen, Qualitätsparameter zu benennen. Die Vertragspartner sind gehalten, die Vorgaben für die Erfüllung dieser Parameter zu bestimmen. Weil der Sichtbeton mit Gestaltung zu tun hat, ist der planende Architekt gefordert, das Leistungspaket zu schnüren, dessen Einhaltung ein bestimmtes Aussehen garantieren soll. Denn wie Sichtbeton auszusehen hat, muss festgelegt werden. Der Begriff „Sichtbeton“ ist im wesentlichen inhaltsleer, wenn auch an Randzonen durchaus eindeutig Fehler einer in Sichtbeton auszuführenden Fläche festgemacht werden können. So sind Kiesnester auch mit allgemeinen Sichtbetonanforderungen nicht vereinbar. Bei Porenausbildungen und erkennbaren Schüttlinien wird die Beurteilung schon schwieriger. Im Streit wird die technische Vorgabe rechtlich qualifiziert; das Einordnungsergebnis entfaltet streitentscheidende Wirkung.

2.1 Sichtbeton – gestaltete Betonoberfläche

Die Forderung nach Ausführung in Sichtbeton erweist sich als ein Kürzel für eine gestaltete Oberfläche des Betons. Die DIN 18217, Betonflächen und Schalungshaut, Ausgabe 1981, bezeichnet deshalb die Betonfläche als das Spiegelbild der Schalungshaut, weswegen die Schalungshaut entsprechend den Anforderungen an die Betonfläche zu wählen

² 3. Aufl. S. 195

ist.³ Dieses Kürzel ist jedoch inhaltsleer, die vertragsrechtliche Forderung und das entsprechende Einverständnis über die Ausführung in Sichtbeton besagt ohne zusätzliche Bestimmung wenig. Sichtbeton meint lediglich die Ausführung der Außenhaut in gestalteter Form, so dass jede Erscheinung, die dieser Gestaltung entgegen steht, unabhängig von den Gestaltungsanforderungen einen Sachmangel deshalb darstellt, weil sie eine qualifizierte Gestaltung von vornherein verhindert. Wird Sichtbeton gefordert, ist jeder Tatbestand an der Betonrandzone, der eine Gestaltung ausschließt, ein Sachmangel.

Beispiele: Kiesnester, unverdichtete Stellen, Mörtelreste, stark abzeichnende Schüttagungen, Austreten von Zementleim, starke Versätze an Stößen von Schalelementen.

2.1.1 Merkblattaussagen

Das Merkblatt Sichtbeton des Deutschen Beton- und Bautechnikvereins⁴ arbeitet diesbezüglich mit dem Gesichtspunkt der vermeidbaren Abweichung im Erscheinungsbild der Ansichtsfläche. Das neue Schuldrecht kann an dieser Stelle mit der Figur der gewöhnlichen Verwendungseignung nach § 633 Abs. 2 Nr. 2 BGB herangezogen werden. Danach ist das Werk frei von Sachmängeln, wenn es sich für die gewöhnliche Verwendung eignet und eine Beschaffenheit aufweist, die bei Werken der gleichen Art üblich ist und die der Besteller nach der Art des Werks erwarten kann. Das greift den Aspekt der Machbarkeit und Möglichkeit zur Herstellung durchaus auf. Der Besteller kann bei der näher nicht spezifizierten Anforderung von Sichtbeton erwarten, dass die Ansichtsfläche frei von Kiesnestern, unverdichteten Stellen, Mörtelresten, sich stark abzeichnenden Schüttagungen usw. ist. Die Freiheit von solchen Mangelerscheinungen wird bei Werken der gleichen Art auch erwartet, wobei diese Erwartung in der Anforderung an Sichtbeton liegt, dem eine Gestaltungswirkung beigemessen wird. Die Ansichtsfläche darf nicht stören, sondern soll beeindrucken und einen positiven Beitrag zum Gesamteindruck eines Werks leisten.

Werden an die Betonflächen keine besonderen Anforderungen gestellt, dann ist das Aussehen zwar nicht gleichgültig, aber es werden lediglich die gewöhnlichen Anforderungen gestellt. Wird vertragsrechtlich Sichtbetonqualität ohne weitere Konkretisierung verlangt, dann soll die Ansichtsfläche nicht nur gewöhnlichen, hinsichtlich der Ansichtsfläche indifferenten, sondern gerade besonderen Anforderungen genügen. Die Ansichtsfläche muss einen zielgerichtet gestalteten Eindruck hinterlassen; alles, was seinem Erscheinungsbild nach Ausdruck fehlender Zielgerichtetheit ist und stört, verfehlt die Qualität gewöhnlicher Verwendungseignung. Angesichts der

Offenheit dieser Beschreibung, ist Konkretisierung angezeigt, die in der Angebotsphase oder spätestens in der Ausführungsphase erreicht werden sollte. Die Sichtbetonanforderungen bedürfen der Präzisierung⁵ und im Rahmen der Ausführung einer einheitlichen gestalterischen Umsetzung. Das DVB-Merkblatt Sichtbeton enthält im Abschnitt 5 eine Vielzahl von Ausschreibungshinweisen. Diese richten sich sämtlich primär an den ausschreibenden /planenden Architekten, die sich jedoch oft der Mühe der Festlegung bewußt/unbewußt nicht unterziehen. Das Merkblatt sollte dann vom Unternehmer herangezogen werden, um wenigstens vor der Ausführung eine Klärung herbeizuführen.

2.1.2 Gefahren von Klassenbildungen

Freilich ist diesbezüglich auch Vorsicht geboten. Wer z.B. im Sinne der ÖNORM B 2211 Abschnitt 2.3.9.2 bestimmte Anforderungen an die Porigkeit stellt, etwa dahin, dass der Anteil der Poren einen bestimmten Prozentsatz einer Prüffläche nicht übersteigen darf, läuft Gefahr, im Blick auf dieses Detail die Gesamtwirkung der Fläche außer Acht zu lassen. Wird dann ein solches Merkmal zum Gegenstand einer Beschaffenheitsvereinbarung erklärt, entscheidet über die Tauglichkeit allein dieses Detail ohne Rücksicht auf den Gesamteindruck. Darin besteht die Gefahr der merkmalmäßigen Detaillierung, was z.B. auch dann gilt, wenn bestimmte Klassen gebildet werden.

Beispiel für die Gefahren einer Klassenbildung: Eine Sichtbetonfläche wird als Klasse S 1 im Sinne der ÖNORM B 2211 Abschnitt 2.3.9.2 ausgeschrieben, womit nach dem Text eine glatte, geschlossen Betonoberfläche geschuldet ist, die nach den normierten Merkmalen allenfalls eine Streifenbildung durch Zementleim von 1 cm gestattet. Wird dann eine solche Vereinbarung als Beschaffenheitsvereinbarung eingestuft, geht die Wirkung auf das Ganze, nämlich die Verwendungseignung, die Art und den Grad der Beeinträchtigung völlig verloren. Die Sachmangelfrage entscheidet sich dann allein an dem oder den Merkmalen. Ein solches Vorgehen ist vertragsrechtlich durchaus in Zweifel zu ziehen, weil der Sichtbeton angemessen wohl in seiner Gesamtwirkung zu beurteilen ist, nicht aber nach Maßgabe von absolut erklärten Einzelmerkmalen.

Diese Gefahr ist auch mit der Klassenbildung des Sichtbetonmerkblattes des Deutschen Beton- und Bautechnik-Vereins nach der Tabelle 1 verbunden, vor allem dann, wenn damit eine bestimmten Porigkeitsklasse verbunden wird. Wenn die Tabelle 4 eine solche Klasseneinteilung vorsieht und man vereinbart die Porigkeitsklasse P 3, läuft der Auftragnehmer die nicht gering zu erachtende Gefahr, dass Spitzfindigkeit daraus eine vereinbarte Beschaffen-

³ Abschnitt 2.1 dieser DIN, die den Begriff „Sichtbeton“ nicht verwendet.

⁴ S. 16

⁵ Vgl. DIN 18217 Abschnitt 2.3: Betonflächen mit Anforderungen an das Aussehen. Abschnitt 2.3.1 Allgemeines Dies sind sichtbar bleibende Betonflächen, für die eine eindeutige und praktisch ausführbare Beschreibung vorliegen muss.

heit i.S. des § 13 Nr. 1 macht. Dann beginnt auf der Baustelle im Rahmen der rechtsgeschäftlichen Abnahme das große Zählen. Stellt der sorgfältige Überprüfer einen höheren Porenanteil fest, steht der Mangel fest. Denn die vereinbarte Beschaffenheit ist verfehlt.

2.1.3 Vertragsrahmen

Ratschlag: Sorge für einen vernünftigen Vertragsrahmen.

Hier muss unbedingt die Verknüpfung mit dem Gesamteindruck nicht nur technisch durch das genannte Merkblatt des Beton-Vereins, sondern eben auch vertragsrechtlich hergestellt werden. Wenn dieses Merkblatt auf den Gesamteindruck abstellt, besagt noch lange nicht dazu, dass dies auch der einschlägige Rechts- und damit vertragsrechtliche Beurteilungsrahmen ist.

Gerade an dieser Stelle ist Sorge dafür zu tragen, dass die durch das Merkblatt vermittelten Einzelfaktoren nicht rechtlich durch ihre Qualität als vertragliche Beschaffenheitsmerkmale ein Übergewicht erhalten und die rechtliche Beurteilung bei der Abnahme wie auch bei der Sachmangelbeurteilung unabhängig vom Gesamteindruck dominieren.

Das kann nur geschehen, indem vertragsrechtlich die maßgebliche Beurteilung in Ausrichtung jenseits der Einzelkriterien am Gesamteindruck erfolgt.

Formulierungsvorschlag im Vertrag: Werden Einzelmerkmale, auch durch Klassenbildung, bestimmt, sollte eine Formulierung Eingang finden, die für die Sachmangelbeurteilung den Rückgriff auf den Gesamteindruck zulässt und diesen sogar erforderlich macht. Etwa dahin: Die Verfehlung von vertraglich vereinbarten Einzelmerkmalen führt dann nicht zu einem Sachmangel, wenn der Gesamteindruck der betroffenen Fläche in seiner positiven Gestaltungswirkung nicht gestört ist.

Nachvollziehbare Prüfungskriterien

Neben diesen abgesicherten, das Erfolgssoll prägenden Merkmalen bedarf es nachvollziehbarer Prüfungskriterien, die jedoch gerade bei Maßgeblichkeit einer Beschaffenheitsvereinbarung mit absoluter Verbindlichkeit geliefert werden. Ob die Gestaltung der Oberfläche gelungen ist, kann nah und fern, gezielt oder zufällig überprüft werden. Soll der optische Gesamteindruck überzeugen oder das Detail maßgeblich sein? Mangels genormter derartiger Prüfungskriterien muss eine Festlegung erfolgen. Ohne eine durch die Parteien getroffene Festlegung droht die Gefahr der mehr oder minder totalen Unterwerfung unter ein Sachverständigengutachten mit anschließender weiterer Fremdbestimmung durch das Gericht. Nach welchen Kriterien nämlich der Sachverständige die Begutachtung vornimmt, ist oft dessen Geheimnis. Vielleicht beachtet er dabei die technischen Kriterien der Machbarkeit und Erfüllbarkeit, was das Glück des Unternehmers wäre. Diese Unsicherheiten drohen bei der Abnahme und bei

einer späteren Beurteilung von Gewährleistungsfragen.

2.1.4 Planer und Unternehmer als die Wissenden

Bei alledem muss der Kundige, der um die Geheimnisse des Betons weiß, darauf bedacht sein, dass kein Unsinn gefordert wird. Das Machbare und einigermaßen sicher Verwirklichungsfähige muss Gegenstand des Versprechens sein. Denn umgekehrt gilt freilich: Auch wer eine Leistung verspricht, die nur schwer oder nur bei guten Randbedingungen zu erzielen ist, hat für Mängel einzustehen, da es auf Verschulden und Machbarkeit im Gewährleistungsrecht dann nicht ankommt, wenn hierauf gerade nicht abgestellt, sondern mehr versprochen wird.

Da Sichtbeton ein Gestaltungsfaktor ist, sind Mängel am Sichtbeton grundsätzlich optische Mängel. Rissebildungen im Beton haben mit Sichtbetonmängeln auch zu tun, sind jedoch um funktionale Komponenten zu erweitern.

2.1.5 Technische Bedingungen des Sichtbetons

Sichtbeton hängt von der Art der gewählten Schalung ab, der ausgewählte Zement ist von Einfluss; die Flächengliederung und die Fugenausbildung sind von Bedeutung, die Schalungsanker spielen eine Rolle.⁶ Sichtbeton stellt auf die äußerste Ansichtsfäche ab, deren Aussehen von vielerlei Komponenten abhängt, so vom Zement, von der Temperatur, von der Witterung, von der Art der Schalung, der Betonzusammensetzung der verschiedenen Schüttungen, was sich gerade bei Abschnittsbildungen oder der Beschickung aus verschiedenen Fertigbetonwerken auswirken kann. Gerade der Bautechniker, der diese verschiedensten Abhängigkeiten kennt, die keineswegs sämtlich beherrschbar sind, wird mit äußerster Vorsicht an die Formulierung von vertraglichen Anforderungen an die in Beton gestaltete Oberfläche herangehen. Er wird auch in Kenntnis dieser Umstände bei Vorgaben, die von planenden Architekten kommen, auf Bedenken hinweisen.

Diese technische Bedingtheiten und Umstände müssen bei vertragsrechtlichen Beschreibungen und bei Bedenkenmitteilungen berücksichtigt werden.

2.2 Handlungsgebote für Baubeteiligte

Daraus folgt, dass technische Kenntnisse vertragsrechtlich umgesetzt werden müssen. Wenn die Zusammensetzung, die Herstellung, die Verarbeitung und die Nachbehandlung des Betons samt Auswahl der Schalung entscheidenden Einfluss auf die Ausbildung des Sichtbetons haben⁷, muss darauf vertragsrechtlich eingegangen werden. Allerdings müssen auch die Praxis und die Tätigkeitsfelder der verschiedenen Baubeteiligten Berücksichtigung

⁶ Vgl. zu den technischen Zusammenhängen vgl. das DBV-Merkblatt Sichtbeton im Abschnitt 2; Betonhandbuch, S. 194 ff; Sichtbeton Gestaltung von Betonoberflächen, Zement - Merkblatt Hochbau der Bauberatung Zement jeweils mit weiteren Nachweisen

⁷ Betonhandbuch, 3.Aufl., S. 194

finden. Denn diese einzelnen Faktoren sind den Baubeteiligten in unterschiedlicher Weise zur eigenen Verantwortung zugewiesen. Angesichts der Komplexität des Baustoffs Beton und seiner verschiedenen Teile - Zemente, Zuschläge, Zusatzmittel und Zusatzstoffe - mit Auswirkungen auf das Aussehen der Sichtbetonflächen kommen die verschiedenen Baubeteiligten möglicherweise auch schnell wissensmäßig an ihre Kapazitätsgrenzen. Tendenziell wird dies wohl dazu führen, dass der Planer klare Vorgaben über das Aussehen machen sollte, über die betontechnologischen Verwirklichungsnotwendigkeiten durch die entsprechende Zusammensetzung des Betons sollte der Unternehmer, das liefernde Fertigbetonwerk oder ein davon völlig unterschiedlicher Betontechnologie befinden.

3 Die Baubeteiligten und ihre Tätigkeitsfelder

Bei der Ausbildung von Sichtbeton wirken verschiedene Personen mit, die unterschiedlichen Einfluss auf das Gelingen der in Beton gestalteten Oberfläche nehmen.

3.1 Sichtbeton und Zusammensetzung des Betons

Hier gilt nach DIN 18331 Abschnitt 3.2, dass grundsätzlich dem Unternehmer überlassen ist, wie er den Beton zur Erreichung der geforderten Güte zusammensetzt, mischt, verarbeitet und nachbehandelt. Insoweit ist grundsätzlich der Auftragnehmer - Rohbauunternehmer - in der Pflicht. Bestellt er den Fertigbeton, liegt es an ihm, die richtige Sorte in der richtigen Zusammensetzung zu bestellen oder sich insoweit Empfehlungen geben zu lassen. Dem Unternehmer könnte auch geraten werden, die spezifischen Fachkenntnisse des Lieferwerks in Anspruch zu nehmen, was auf die Weise geschehen könnte, dass der Unternehmer die für den Sichtbeton einschlägige Leistungsbeschreibung mit Leistungsverzeichnis dem Fertigbetonwerk zu dem Zweck überlässt, die darauf abgestimmte, richtige Mischung zu erstellen.

Selbstverständlich kann es insoweit auch zu Vorgaben von der Auftraggeberseite und damit zu Abweichungen von dieser grundsätzlichen Verantwortungszuweisung kommen.

3.2 Sichtbeton und Einfluss der Schalung

Die DIN 18331 kennt bei Schweigen im LV eine Art Auffangregelung, die im Abschnitt 3.3 zu den Betonflächen ausführt: „Die Wahl der Schalung nach Art und Stoffen bleibt dem Auftragnehmer überlassen. Geschalte Flächen des Betons sind schalungsrau, d.h. unbearbeitet nach dem Ausschalen, nicht geschalte Flächen roh abgezogen herzustellen.“ Das bedeutet, dass eine besondere Gestaltung der Oberfläche ohne nähere Vorgaben im Leistungsverzeichnis, auf welche die Schalung abgestimmt werden müsste, dann nicht geschuldet ist. Eine bestimmte

Oberfläche wird allein durch die Vorgabe in der DIN 18331 nicht gefordert und auch nicht geschuldet. Denn aus dem Abschnitt 4.2.15 der DIN 18331 kann auch entnommen werden, dass zusätzliche Maßnahmen zum Erzielen einer bestimmten Betonoberfläche Besondere Leistungen darstellen. Besondere Leistungen aber sind nur geschuldet, wenn sie im LV besonders erwähnt werden (DIN 18299 Abschnitt 4.2).

Konsequenz: Der planende Architekt muss die Anforderungen an die Schalung formulieren. Das hat sich nicht nur auf die Angabe über saugende oder nicht saugende Schalung zu beschränken. Denn dies lässt immer noch weitere Bestimmung offen. Es würde sich ohne weitere Konkretisierung um eine Teilpauschalierung handeln mit der Folge, dass für den Preis alles, was sich innerhalb dieser Kategorie bewegt, zu erbringen wäre. Bei der Bestimmung „saugende Schalung“ durch Bretter sollte auch festgelegt werden, ob nur jeweils neue Schalungen oder Schalungen wiederholt (wie oft ?) verwendet werden dürfen. Werden an die Ausführung von Schalungstößen besondere Anforderungen gestellt, sind diese im LV gleichfalls zu benennen (Abschnitt 0.2.10 der DIN 18331). Freilich bleibt es dem ausschreibenden Architekten auch überlassen, sich insoweit auf Zielvorgaben zu beschränken.

Beispiel: Die Fugen zwischen benachbarten Schalungselementen müssen so dicht sein, dass kein Zementleim und/oder Feinmörtel austreten kann. Dann obliegt dem Auftragnehmer die entsprechende Ausbildung der Schalungstöße.

Sichtbeton hat jedoch nicht nur mit Schalungstößen, sondern auch mit der Schalung selbst zu tun. Denn die Schalung bildet die Ansichtsfläche aus. Wenn der Auftraggeber Sichtbeton haben will, muss er zugleich Anforderungen an die Schalung stellen. Hat die im LV angeführte Schalung aber Einfluss auf die Oberfläche, deren Anforderungen jedoch mit der im LV getroffenen Auswahl der Schalung nicht konform ist, wird der kundige AN auf die insoweit bestehenden Bedenken aufmerksam machen.

Beispiel: Wenn bei einer ausgeschriebenen glatten Kunststoffschalung die Gefahr der Bildung von kleinen Lunkern und flächigen Verfärbungen groß ist, wird der AN auf diese Gefahr aufmerksam machen und Bedenken anmelden. Wenn bei rauer Brettschalung infolge unterschiedlicher Saugfähigkeit des Holzes helle bis dunkle Verfärbungen entstehen können, weil das Holz unterschiedlicher Qualität sein kann, wird der Unternehmer auf diese Gefahr/Bedenken hinweisen.

Sache des Unternehmers ist es, die Bausollvorgaben, also die vertraglich beschriebene Leistung auf ihre Geeignetheit bezüglich des Erfolgssolls zu prüfen und entstehende Bedenken anzumelden.

3.3 Sichtbeton und die Verarbeitung

Dass die Verarbeitung eine Sache des Auftragnehmers ist, leuchtet ein. Verarbeitungsfehler mit negativen Folgen auf den Zustand der Ansichtsfläche ge-

hen zu Lasten des AN. Das betrifft z.B. Kiesnester, unsauber ausgebildete Fugen und Schalungsanker, außerdem sämtliche Zustände, die durch eine bessere Ausführung und Organisation der Ausführung vermeidbar gewesen wären.

Beispiele⁸: Der SV stellt später fest, die störende Verschiedenfarbigkeit und die Porenbildung gingen darauf zurück, dass Trennmittel zu dünn aufgetragen worden sind. Die scharfen Kanten hätte man besser brechen sollen. Die Betonierlagen sind zu hoch gewählt, was sich auf das Aussehen negativ auswirkt. Die Nachbehandlung wurde ungleichartig und nicht gleichmäßig vorgenommen, was zu Farbunterschieden geführt hat. Es wurden Lieferungen aus verschiedenen Werken für die Bauteile verwendet, wobei auch noch der Wasserzementwert schwankte.

3.4 Sichtbeton und Nachbehandlung

Die Verantwortung des Auftragnehmers ist gleichfalls zu bejahen, denn die Nachbehandlung ist ausweislich des Abschnitts 3.2 der DIN 18331 Sache des AN.

4 Sichtbeton und Planer – Ausschreibungsgebote

Gestaltung und Gestaltungselemente, die Ausbildung einer Fassade oder von sonstigen Flächen - innen und außen - sind grundsätzlich eine Sache des Planers. Der Architekt ist gefordert, die Anforderungen an die Außenseite einer Fläche aus Beton zu formulieren und die Elemente hierfür zu bestimmen. Das ist aus Qualitäts- und Kalkulationsgründen zwingend geboten⁹. Denn ohne Vorgaben fehlt der Maßstab und es fehlt auch daran, die Angebote sinnvoll zu vergleichen. Nur ein detailliertes Bausoll sichert preislich Vergleichbarkeit. Nur eine detaillierte Erfolgssollvorgabe sichert eine einigermaßen gesicherte Beurteilung von Sachmängeltatbeständen. Ohne vertragsrechtliche Vorgaben besteht zudem die Gefahr, dass im Streitfall ein zugezogener Sachverständiger eigene Maßstabbildungen vornimmt und sich die Parteien diesen Drittvorgaben unterwerfen müssen. Maßstab ist in einem solchen Fall nach der Schuldrechtsreform die gewöhnliche Verwendungseignung und die Beschaffenheit, die bei Werken der gleichen Art üblich ist und die der Besteller nach der Art des Werks erwarten kann (§ 633 Abs. 2 Nr. 2 BGB).

4.1 Sichtbeton – Planungsaufgabe des Architekten

§ 3 Nr. 1 VOB/B gibt dem Unternehmer, der ganz allgemein mit der Forderung nach Sichtbeton konfrontiert wird, das Recht dazu, Näheres über den Anforderungskatalog zu erfahren. Die für die Ausführung nötigen Unterlagen sind dem Auftragnehmer

zur Verfügung zu stellen. Dazu gehört die Präzisierung des an die Ansichtsfläche gestellten Bauwunsches. Den Planungsbedarf und die Planungsaufgabe belegt nicht nur die DIN 18331; auf Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen kann ergänzend hingewiesen werden. Das Standardleistungsbuch 013 für Beton- und Stahlbetonarbeiten liefert ein Beispiel für Ausschreibungsmöglichkeiten und Differenzierungsaspekte. Die Literatur ist voll von entsprechenden Forderungen.

Konsequenz: Ohne nähere Vorgabe für die Sichtbetonqualität hat die Bauherrnseite ihre Bauherrnaufgabe nicht erfüllt. Der Unternehmer ist behindert. Der Unternehmer muss den Besteller vor der Ausführung zur Abklärung anhalten. Allein die Vorgabe von Sichtbeton besagt nichts. Diese Anforderung belegt lediglich, dass besondere Anforderungen an die Ansichtsfläche unter gestalterischen Gesichtspunkten gestellt werden. Ohne Konkretisierung des geforderten Aussehens ist die Festlegung von Sichtbeton ohne Aussagegehalt. Die Benennung von Sichtbeton ohne Klarstellung der qualitativen Sollvorgaben weist wenig Informationsgehalt auf. Allein die Bezeichnung „Sichtbeton“ ist nicht ein Kürzel wie das z.B. bei Verwendung der Bezeichnung C 20/25 für einen Beton der Fall ist. Das Kürzel C 20/25 steht für einen Festbeton mit einer Mindestdruckfestigkeit von Zylindern von 20 N/mm² und 25 N/mm² von Würfeln¹⁰. Der Auftraggeber bestimmt durch Vorgaben an die technische Qualität des Betons das Anforderungsprofil; dasselbe muss für die gestalterische Qualität dieses Baustoffs gelten. Wer als Planer Sichtbeton will, muss die gestalterischen Anforderung im Leistungsverzeichnis verbalisieren. Ohne entsprechende Gestaltung des LV misslingt die zu gestaltende Ansichtsfläche.

4.2 Sichtbeton – Ausschreibungsaufgabe des Architekten

4.2.1 Argumente aus DIN 18331

Aus der DIN 18331 Abschnitt 0.2.1 ist zu entnehmen, dass das LV Aussagen zu enthalten hat über die Art der Oberfläche, z.B. glatt, Brettstruktur, wenn es sich um sichtbar bleibende Betonflächen handelt. Der Abschnitt 0.2.10 befasst sich mit besonderen Anforderungen an die Ausführung von Schalungsstößen sowie Arbeits- und Scheinfugen und deren Anordnung bei sichtbar bleibenden Betonflächen. Die Fassung der DIN 18331 von 2005 berücksichtigt diese Gesichtspunkte.

Werden an die Betonflächen besondere Anforderungen gestellt, ist hinsichtlich der Schalung eine Abweichung von der in Abschnitt 3.3 getroffenen Regelung zu erwägen; darauf macht der Abschnitt 0.3 aufmerksam. Denn nach diesem Abschnitt 3.3 der DIN 18331 bleibt die Wahl der Schalung nach Art und Stoffen dem Auftragnehmer überlassen, womit letztlich der Auftragnehmer über die Gestaltung der

⁸ aus DBV-Merkblatt Sichtbeton Abschnitt 3

⁹ vgl. DBV-Merkblatt Sichtbeton Abschnitt 2.4; DIN 18217 Abschnitt 2.3.1

¹⁰ Vgl. DIN EN 206 – 1- 2000 Abschnitt 4.3.1

Ansichtsfläche entscheidet. Das ist jedoch nicht Sinn einer Ausschreibung, nach welcher gerade der Auftraggeber eine gestaltete Ansichtsfläche fordert.

Dabei fällt auf, dass die DIN 18331 den Begriff des Sichtbetons nicht verwendet, sondern von Betonflächen mit besonderen Anforderungen spricht. So verwendet die Allgemeine Technische Vertragsbedingung für Bauleistungen, Beton- und Stahlbetonarbeiten – DIN 18331 die Bezeichnung im Abschnitt 0.3.2 zu Abschnitt 3.3: „Abweichende Regelungen können insbesondere in Betracht kommen, wenn für die Schalung eine bestimmte Art oder ein bestimmter Stoff vereinbart werden soll oder wenn an die Betonflächen besondere Anforderungen gestellt werden solle, z.B. glatte Oberfläche, Waschbeton, werksteinmässige Bearbeitung, gebrochene Kanten, Entgraten, besondere Maßnahmen der Putzhaftung und Werksteinverkleidungen (Aufrauen, Einsetzen von Drahtschlaufen).“ Dann sind diese besonderen Anforderungen auch zu definieren. Diese Aufgabe hat der Architekt zu erfüllen. Diese gestalterische Planungsaufgabe kann der Architekt unterschiedlich erfüllen.

a) Erfüllung der Ausschreibungsaufgabe durch Handlungsbeschriebe (Bausollvorgabe nach § 2 Nr. 1 VOB/B)

Der Planer kann das Wie genau beschreiben (Bausoll i.S.d. § 2 Nr. 1 VOB/B: vertragliche Leistung), was letztlich dazu führt, dass das Bausoll durch diese Wegbeschreibung definiert wird (Bausoll durch Wegvorgabe/durch das Wie). Wenn die Ansichtsfläche das Spiegelbild der Schalungshaut ist¹¹, gibt der Planer über die Schalungshaut das Erscheinungsbild der Ansichtsfläche vor. Diese Vorgabe schließt damit eventuell notwendig verbundene Nachteile und Erscheinungsformen ein und verhindert, damit typisch verbundene, später als nachteilig eingestufte Ausbildungen als Sachmangel zu deklarieren. Dann wird mittels des eigentlich nur preislich relevanten Bausolls das Erfolgssoll beeinflusst.

Beispiel: Ist mit einer glatten Kunststoffschalung die Bildung von kleinen Lunkern und flächigen Verfärbungen verbunden¹², was auch bei sorgfältiger Ausführung und sachgemäßer Verdichtung nicht verhindert werden kann, gehört dieses Erscheinungsbild zum so ausgeschriebenen Sichtbeton. Diese Durchbildung ist deshalb entweder so gewollt und in Kauf genommen oder geht bei Einordnung als Mangel auf den Planer zurück und ist deshalb nicht auf eine vertragswidrige Ausführung der Leistung des Unternehmers zurückzuführen.

Werkvertraglich ist von gewissem Stellenwert, welche Qualität nach § 633 Abs. 2 BGB neue Fassung einer solchen Vorgabe zuzuweisen ist. In Betracht kann eine vereinbarte Beschaffenheit oder

eine vertraglich vorausgesetzte Verwendungseignung kommen. Eine vereinbarte Beschaffenheit kennzeichnet nach den Gesetzesmaterialien¹³ die Vereinbarung einzelner Beschaffenheitsmerkmale. Das wird durch die Beschreibung des Wie der Leistung durch Schalung, Schalungsanker, Fugenausbildung wohl nicht erreicht. Denn hierdurch werden keine Merkmale vorgegeben, sondern eher die vertraglich vorausgesetzte Verwendungseignung beschrieben. Die im LV beschriebene Art und Weise der Leistung beeinflusst nämlich das Erscheinungsbild und damit die Verwendungseignung. Was für die ausgeschriebenen Art typisch und geradezu kennzeichnend ist, prägt demnach die vertraglich vorausgesetzte Verwendungseignung.

b) Erfüllung der Ausschreibungsvorgabe durch Zielvorgabe (Merkmalbenennung) – Erfolgssoll

Eine andere Möglichkeit besteht darin, lediglich Anforderungen an die Ansichtsfläche zu stellen (Erfolgssoll durch Anforderungskriterien) und es dem Auftragnehmer zu überlassen, das Wie und damit den Weg zum Ziel, nämlich den Stoff und die Arbeitsweise, zu bestimmen.

Beispiele: Sichtbeton, gefordert wird eine glatte, geschlossene Oberfläche, frei von Graten und ausgetretenem Zementleim/Feinmörtel; Verfärbungen und Schüttlinien sind möglichst zu vermeiden.

c) Verknüpfung von Bausoll und Erfolgssoll

Der ausschreibende Architekt kann beides auch miteinander verbinden (Kombination von Ziel und Weg). Das LV enthält dann die Vorgaben des Wie (Wegvorgabe, Arbeitsbeschreibung = Bausoll) wie auch eine möglichst genaue Zielvorgabe (= Erfolgssoll). Das wird das probate Mittel sein, um eine sachgerechte Ausführung der Sichtbetonflächen zu gewährleisten. Der Planer macht bei dieser Methode detaillierte Angaben in Schalungsplänen, nämlich zum Schalungsmaterial, zum Trennmittel, zur Ausbildung der Fugen des Schalungsmaterials, zur Ausbildung von Arbeits- und Scheinfugen, von Schalungsankern usw. und verbindet damit eine näher beschriebene Zielvorgabe.

Eine solche Ziel- und Wegvorgabe versetzt den Unternehmer in den Stand, Bedenken anzumelden, wenn beides nicht vollkommen aufeinander abgestimmt ist. Eine derartige Prüfungs- und Bedenkenmitteilungspflicht muss dem Auftragnehmer dann auch aufgebürdet werden (§ 4 Nr. 3, § 13 Nr. 3 VOB/B). Diese Art der Ausschreibung sorgt deshalb für die optimalsten Ergebnisse und dafür, dass die Aufgabenverteilung sach- und rollengemäß erfolgt: Der Auftraggeber sorgt für die Planung und der Unternehmer für eine fachgerechte Ausführung.

¹¹ DIN 18217 Abschnitt 2.1

¹² Vgl. Zementmerkblatt Hochbau, Sichtbeton Gestaltung von Oberflächen, der Bauberatung Zement; Merkblatt des Beton- und Bautechnik-Vereins, Sichtbeton, Abschnitt 2.2.2

¹³ Bundestags-Drucksache 14/6040 S. 213

4.2.2 Sichtbeton als Planungsaufgabe

Sichtbeton ist planungsbedürftig; als Gestaltungsaufgabe obliegt es dem Bauherrn und damit dem von diesem eingeschalteten Planer, die Anforderungen an die Ansichtsfläche zu definieren und die Mittel hierfür festzulegen. Ohne Schalwerkpläne mit den dazu gehörigen, technisch näher zu bestimmenden Details kann eine solche Gestaltungsaufgabe nicht gelingen. Ein Auftragnehmer sollte das Fehlen derartiger Sichtbetonausführungspläne beanstanden. Er sollte dann, wenn von der Auftraggeberseite derartige Pläne nicht vorgelegt werden, vor Beginn selbst Sichtbetonausführungspläne erarbeiten und dem Auftraggeber zur Freigabe vorlegen. Preisliche Konsequenzen können aus § 2 Nr. 5 VOB/B ergeben.

Allerdings ist mit einem solchen Vorgehen eine Gefahr verbunden: Bleibt die Wegvorgabe dem Unternehmer überlassen, wird es kritisch, denn dann übernimmt der Unternehmer die Planungs- und Verwirklichungsaufgabe. Gerade im Bereich der Zusammensetzung des Betons wird es jedoch wohl in erster Linie am Unternehmer liegen, die Merkmale und Zusammensetzung des Beton zu bestimmen oder dies vom Transportbetonwerk festlegen zu lassen.

a) Planungshilfen aus ZTV-K

Die ZTV-K (Fassung 1988) formuliert im Abschnitt 6.2 Anforderungen an die Schalung und verlangt im Abschnitt 6.7.4 hinsichtlich des Betons für Sichtflächen: „Fluchtgerechte, einheitliche, geschlossene, ebene und porenarme Oberfläche, einheitliche Farbtonung aller Sichtflächen einzelner Bauwerksteile, Maßhaltigkeit und fehlerfreie Kanten der Bauwerksteile, Zweckmäßige, unauffällige Anordnung und einwandfreie Ausführung von Arbeitsfugen.“ Hinsichtlich der Schalung erwartet die ZTV-K (Fassung 1988) im Abschnitt 6.2.2 die schematische Darstellung der Anordnung und Ausbildung z.B. hinsichtlich der Richtung der Schalbrett, Stöße, Stoßdichtung, Schalungsklappen und -öffnungen in einer Zeichnung. Die Aufgabe wird dem Unternehmer zugewiesen, der die Schalpläne rechtzeitig dem Auftraggeber zur Genehmigung vorzulegen hat.

Da die Formulierung der Gestaltungsanforderungen und die Mittelbenennung hierfür jedoch eine Aufgabe des Bauherrn und damit des Planers ist, ist eine solche Überlassung zu Lasten des Unternehmers nicht korrekt. Ein derartiges Vorgehen entspricht nicht dem Verständnis der Berufsaufgabe der Architekten, zu deren Berufspflichten und Berufsaufgaben nach den einschlägigen Länderarchitektengesetzen u.a. die gestaltende, technische und wirtschaftliche Planung von Bauwerken ist.

b) Planungshilfen aus dem Standardleistungsbuch

Das Standardleistungsbuch (Fassung 1981) formulierte zur Schalung und zur Betonfläche im Abschnitt 5.2 Aufgehende Bauteile sehr eindringlich:

„..... als raue Schalung
 gespundete Schalung
 als glatte Schalung
gespundete Schalung
 als.....
 aus Brettern
 gleicher Breite
 aus Schalungspaletten,
gleicher Größe
 aus.....
 aus Strukturschalung
 als Schalung mit Strukturaufgabe aus.....
 als Wickelschalung aus gesicktem Stahlblech

 waagrecht angeordnet,
 mit unregelmäßigen Stößen
mit geordneten Stößen
 senkrecht angeordnet,
 mit unregelmäßigen Stößen
mit geordneten Stößen

 Betonfläche möglichst absatzfrei,
sichtbar bleibend, einschl. zusätzlicher
 Maßnahmen beim Herstellen und Verarbeiten des
 Betons, Betonfläche sichtbar bleibend, möglichst
 absatzfrei, einschl. zusätzlicher Maßnahmen beim
 Herstellen und Verarbeiten des Betons,
 Betonfläche sichtbar bleibend, möglichst absatzfrei,
 möglichst porenlos, einschl. zusätzlicher Maßnah-
 men beim Herstellen und Verarbeiten des Betons,
 Betonfläche sichtbar bleibend, möglichst absatzfrei,
 möglichst einheitliche Farbtonung, möglichst poren-
 los, einschl. zusätzlicher Maßnahmen beim Herstel-
 len und Verarbeiten des Betons,“

Die damit verbundene Aufgabenzuweisung zu Lasten des Auftraggeber und damit dessen Architekten deckt sich in vollem Umfang mit der DIN 18331 (Fassung 2000), die im Abschnitt 0.2.3 für die Erstellung des LV Hinweise für besondere Schalverfahren und im Abschnitt 0.2.10 besondere Anforderungen an die Ausführung von Schalungsstößen sowie Arbeits- und Scheinfugen und deren Anordnung bei sichtbar bleibenden Betonflächen fordert. Die Festlegungen im Abschnitt 0.3.2 zu Abschnitt 3.3 und im Abschnitt 4.2.15 bestärken den Eindruck, dass der planende Architekt die Aufgabe zu lösen hat, die Gestaltungsanforderungen an den Sichtbeton und die gewollten Gestaltungsmittel zu benennen.

c) Planungshilfen aus dem Merkblatt des Deutschen Beton- und Bautechnikvereins

Die umfassendsten Hinweise erhalten gegenwärtig Planer und Ausführende aus dem Merkblatt Sichtbeton des Deutschen Beton- und Bautechnik-Vereins Fassung 2004. Dessen Abschnitt 5 ist eine Fundgrube für den Planer, der Abschnitt 6 eine solche für den Ausführenden. Der Sachverständige erhält Hinweise im Abschnitt 7.

Dennoch besteht Bedarf, bereits vertragsrechtlich mit großer Akribie an die Formulierung von Sichtbe-

tonausschreibungen zu gehen und dabei über den Details als maßgeblich nicht den Gesamteindruck zu vergessen. Dieses Moment muss eindeutig abgeklärt sein.

d) Hinweise in der Literatur

Oswald/Abel¹⁴ verweisen auf die Notwendigkeit eines möglichst klaren Ausschreibungstextes und betonen die Vorteile des Verweises auf Musterflächen. Klopfer¹⁵ verlangt, dass die Beschreibung der Anforderungen neben den technischen Qualitäten das zu erwartende Erscheinungsbild charakterisieren sollte. Farbe, Glanz, Relief, das Maß der zulässigen Abweichungen, die Angabe nicht zulässiger Erscheinungen und solcher, die als nicht relevant oder unwesentlich angesehen werden, sollten benannt werden. Die Angabe der zu verwendenden Schalung sei zweckmäßig, ebenso ob eine Behandlung oder eine Bearbeitung gewollt sei.

4.3 Anforderungen an die Ausschreibung – Stellenwert

Der Stellenwert einer ordentlichen Ausschreibung ist beachtlich; damit sind mehrere Vorteile verbunden, die sich nicht nur in der Ausschreibungsphase, sondern auch in der Verwirklichungs- Abnahme- und die Gewährleistungsphase zeigen. Wer deutlich macht, was er will, hat den Vorteil für sich, einen Maßstab zu besitzen. Dieser Maßstab gibt an, was nach § 2 Nr.1 VOB/B für den Preis als Leistung zu erbringen ist (Bausoll), wie die Leistung auf ihre Erfüllungsgauglichkeit hin geprüft werden kann, unter welchen Voraussetzungen Abnahmefähigkeit besteht und ob Sachmängelansprüche geltend gemacht werden können (Erfolgssoll).

Zu erwägen ist auch, ob in die Leistungsbeschreibung mit Leistungsverzeichnis Prüfungsaspekte aufgenommen werden sollten, z.B. aus welcher Entfernung die Tauglichkeitsprüfung vorgenommen werden darf, ob der Gesamteindruck, der Eindruck je Bauteil oder ein Detaileindruck zählt.

4.3.1 Vorteile der Vergleichbarkeit der Angebote gesichert durch Bausollvorgaben

Eine klare, an § 9 VOB/A ausgerichtete Ausschreibung sorgt für die Vergleichbarkeit der Angebote.

Beispiel: Betonfläche nach Pos. 2.5 in Sichtbeton: Sichtbetonzuschlag je m² : DM

Das besagt gar nichts, denn auf welche Weise der Sichtbeton hergestellt werden soll, bleibt dunkel. Die Anforderung ist unbestimmt und die Preisangabe voller Wagnisse. Hierbei handelt es sich praktisch um eine Teilpauschalierung, weil der AG später die Sichtbetonanforderungen konkretisieren/präzisieren kann; für den AN besteht die Schwierigkeit in der Darstellung, was der von ihm angebotene Preis konkret an Leistungshandlung deckt. Eine korrekte

Wertung nach § 25 Nr. 3 Abs. 2 VOB/A ist nicht machbar.

Eine klare Bausollvorgabe sichert die Durchsetzbarkeit von Nachträgen, wenn im Verlauf der Maßnahme Anforderungen an den Sichtbeton gestellt werden, die Zusatzleistungen erforderlich machen.

4.3.2 Vorteile in der Erfolgssoll-Vorgabe

Die exakte Angabe des Erfolgssolls ermöglicht den Vergleich des Ist-Zustandes mit dem Soll. Parteien und der Sachverständige erhalten damit einigermaßen messbare Kriterien, um die Erreichung oder Verfehlung des Leistungsziels beurteilen zu können.

4.3.3 Ausführung nach Musterfläche

Hinsichtlich der Musterflächen besteht für den Unternehmer die Gefahr, dass damit ein absolutes Maß vorgegeben werden könnte und außer Acht bleibt, dass die Umwelteinflüsse, der Zement, der Zuschlag, das Trennmittel usw. durchaus zu anderen Erscheinungsbildern führen können, die gerade von der Musterfläche abweichen. Die Leistung nach Musterfläche fällt rechtlich unter § 13 Nr. 2 VOB/B, so dass die Musterqualitäten als vereinbarte Beschaffenheit gelten. Die Konsequenz einer solchen rechtlichen Einordnung besteht darin, dass die Verfehlung der die Beschaffenheitsvereinbarung konstituierenden Beschaffenheitsmerkmale unabhängig von der Verwendungseignung im Übrigen die Sachmängelhaftung begründet. Deshalb bestehen Abklärungsbedarf und die Notwendigkeit, die Einzelmerkmale der Musterfläche zu verbalisieren und/oder festzulegen, dass nicht das Einzelmerkmal, sondern der Gesamteindruck zählt. § 13 Nr. 2 VOB/B liefert hierfür eine gewisse Grundlage.

Es wird wichtig sein, bei einem Verweis auf eine Musterfläche nicht auf das Detail, sondern auf den Gesamteindruck abzuheben und zu fragen, ob dieser eingehalten wird. Formulierungsvorschlag: „Als Musterfläche dient das Objekt, wobei der Gesamteindruck der Sichtbetonfläche und nicht das Detail maßgeblich ist. Abweichungen, die auf Zemente, Zuschläge, Zusatzmittel oder Zuschlagsstoffe oder sonstige baustellenspezifische Umstände zurückzuführen und auf den Gesamteindruck von Einfluss sind, sind unbeachtlich.“ Damit ist gesichert, was vielleicht auch schon über § 13 Nr. 2 VOB/B (Leistung nach Probe) gelingt, nämlich darauf abzuheben, dass die Verfehlung der Mustervorgabe dann unbeachtlich ist, wenn die Abweichung nach der Verkehrssitte als bedeutungslos anzusehen ist. Diese Kriterien sind jedoch unsicher und sollten von den Parteien im Vertrag bestimmt werden, wenn schon die Leistung ausdrücklich nach einem Muster erfolgen soll. Zu erwägen ist auch, bei vertraglich abgesicherter Geltung einer Musterfläche die maßgeblichen Kriterien dieser Musterfläche zu benennen, etwa in dem Sinne, dass die Musterfläche gratfrei ist und keine Farbunterschiede und Fleckenbildung aufweist. Selbstverständlich besteht der Nachteil einer

¹⁴ Hinzunehmende Unregelmäßigkeiten bei Gebäuden, 2.Aufl., S. 43/44

¹⁵ Schäden an Sichtbetonflächen, S. 13/14

solchen Leistung darin, dass nichts vergessen werden darf.

4.3.4 Sonstige Beschreibungen

Der Positionsbeschreibung muss aus der Sicht des Unternehmers so ausfallen, dass technisch Machbares verlangt wird. Die in einen LV-Text gegossene Formgebungsidee muss materialgerecht sein, also die herstellungsbedingten und bauphysikalischen Umstände des Betons berücksichtigen. Störungswirkungen, die mit dem Beton naturgegeben verbunden sind, sollten als fehlerbegründend möglichst ausgeschlossen werden.

Die Beschreibung sollte so sein, dass auch eine mehr oder minder messbare Überprüfung frei von subjektiven Empfindungen ermöglicht wird. Die Störwirkung sollte objektiv erfassbar und mit Ausführungsfehlern verknüpfbar sein.

Unsinn ist folgende Formulierungen: „Frei von Lunkern, Poren und Farbunterschieden.“ Die Anforderungen an das Aussehen müssen so ausfallen, dass sie vom Unternehmer mit technischen Mitteln überhaupt machbar sind; außerdem muss der Aspekt der Wirtschaftlichkeit bedacht werden.

Konsequenz:

- Auf ein solches Angebot sollte nicht angeboten werden.
- Alternativ: Auf ein solches Angebot wird angeboten, es wird jedoch in einem Anschreiben darauf hingewiesen, die geforderte Lunker- und Porenfreiheit sowie die Vermeidung von Farbunterschieden werde in dem Sinne verstanden, dass das geschuldet sei, was sich mit wirtschaftlichen, bautechnischen und organisatorischen Mitteln bei sorgfältiger Ausführung herstellen lasse.

Andere Formulierung: Möglichst frei von Lunkern, Poren und Farbunterschieden ist ebenso vertretbar wie möglichst arm an Poren und Lunkern sowie Farbunterschieden.

a) Erfolg und Machbarkeit

Formulierungen, die z.B. die Freiheit von Poren, Lunkern oder Schüttlinien mit der Machbarkeit etwa dahin verbinden, dass Freiheit von Poren, Lunkern und Schüttlinien in dem Umfang gefordert wird, als dies machbar ist, sind gefährlich. Vorformuliert scheitern sie eventuell auch an der erforderlichen Transparenz, weil der Maßstab unsicher ist. Denn damit ist das Ergebnis abhängig von einer sorgfältigen Bearbeitungsweise. Die Machbarkeit, auf die ansonsten gerade unter Gewährleistungsgesichtspunkten nicht abgestellt werden darf, erhält entscheidendes Gewicht. Damit fließt in die Beurteilung der Abnahmefähigkeit oder des Gewährleistungsfalles das ein, was das DBV-Merkblatt Sichtbeton in Abschnitt 3 unter Herstellungstechnischen Anforderungen ausführt.

Die Gefahr besteht in folgendem: Der Schlamper gerät damit natürlich unter die Räder. Andererseits: Wer belegen kann, dass er den richtigen Stoffe gleicher Herkunft bei demselben Herstellerwerk einge-

setzt hat und die Arbeit im übrigen richtig ausgeführt hat, der kommt aus der Haftung. Freilich beurteilt sich die Richtigkeit der Handlung auch nach dem Ergebnis: Enthält die Ausschreibung zwar Angaben zur Schalung, fehlen aber Angaben zu Stoßdichtungen können dadurch auftretende Streifen von Zementleim und damit verbundene Grate zur vertraglich vorausgesetzten Gebrauchstauglichkeit gehören. Umgekehrt begründet eine ausgeschriebene Position Stoßdichtung, dass die Leistung frei von solchen Erscheinungsformen sein muss. Die entscheidende Frage ist, ob durch die Art und Weise der Ausschreibung gleichsam ein Stufensystem von Anforderungsklassen formuliert wird, das zugleich als Anforderungsparameter herangezogen werden kann. Die ÖNORM B 2211 kennzeichnet im Abschnitt 2.3.9.2 ein solches System bezüglich der Struktur der Anichtsfläche. Im Abschnitt 2.3.9.4 erfolgt Gleiches für die Farbgleichheit. Die Klassen S 1 bis S 3 für die Struktur und F 1 sowie F 2 für die Farbgleichheit werden unterschieden.

b) Sachmangelsystem und Machbarkeit

Unter dem Gesichtspunkt des Systems und der Systemaspekte kann aus der Erfolgshaftung eine Handlungshaftung werden. Wer richtig gehandelt hat - wobei die Handlungsanweisungen z.B. dem DBV-Merkblatt entnommen werden können - ist aus der Sachmangelhaftung. Der Besteller muss mit dem Handlungsergebnis zufrieden sein, das technisch einwand- und beanstandungsfreies Handeln bewirkt.

Achtung: Das führt im Ergebnis zu einem anderen Haftungssystem; für das Werkvertragsrecht zählt der Erfolg grundsätzlich unabhängig von der Handlung. Derartige LV-Formulierungen verknüpfen den geschuldeten Erfolg mit der Handlungsanstrengung, für die es in Merkblättern Handlungsanweisungen gibt. Aber gerade in Folge der Schuldrechtsreform besteht Raum, derartigen Handlungsaspekten Geltung zu verschaffen. Der in § 633 Abs. 2 Nr. 2 BGB beschriebene Tatbestand der Sachmangelfreiheit bei Eignung für die gewöhnliche Verwendungseignung sowie artgleicher Üblichkeit und Entsprechung der Bestellererwartung kann in Richtung Machbarkeit interpretiert werden.

c) Zur Messbarkeit

Damit wird auch Messbarkeit gesichert. Denn ob die Handlungsanweisungen eingehalten worden sind, kann meist kundig vom Sachverständigen festgehalten werden. Alles besteht die Gefahr, dass vielleicht alles immer noch besser machen werden kann. Diese Gefahr wird jedoch wohl gering einzuschätzen sein, denn die z.B. im DBV-Merkblatt enthaltenen Herstellungshinweise¹⁶ bieten insgesamt eine objektive Nachprüfbarkeit der Einhaltung der Handlungsanweisung mit der Möglichkeit, eine eventuelle Optimierung einschätzen zu können.

¹⁶ vgl. Abschnitt 3

5 Ausführung des Sichtbetons – Aufgabe des Unternehmers

Der Unternehmer hat im Rahmen der Ausführung die auf technischen Erkenntnissen beruhenden herstellungstechnischen Anforderungen zu beachten. Einschlägiges ist in der Technischen Literatur veröffentlicht. Hierbei handelt es sich um Handlungskataloge, die in der Absicht erstellt wurden, damit ein mangel-freies Ergebnis zu erzielen. Diese Handlungskataloge erhalten im Bereich des Sichtbetons aus rechtlicher Sicht jedoch nach Maßgabe obiger Ausführungen einen rechtlichen Stellenwert. Ist im Allgemeinen im Bereich des Werkvertrags die Handlung bedeutungslos und nur das Ergebnis entscheidend, beeinflusst die ordnungsgemäße Handlung bei Sichtbetonfragen ausnahmsweise die Beurteilung des Ist-Zustandes im Vergleich zum Soll-Zustand.

6 Abnahme und Sachmängelhaftung

Ob das Leistungsziel (Erfolgssoll) erreicht ist, wird im Streit der Sachverständige beurteilen müssen. Dabei muss vermieden werden, dass sich der Sachverständige gleichsam einen eigenen Maßstab zurecht legt. Der Maßstab sollte aus dem LV entwickelbar sein. Die Abnahme und die Gewährleistung werden vom Mangelatbestand maßgeblich beeinflusst.

6.1 Mangelbegriff

Die Bestimmung enthält des BGB in § 633 Abs. 2 neue Fassung (nach Maßgabe der Schuldrechtsreform, die zum 1.1.2002 in Kraft getreten ist) und die VOB/B in § 13 Nr. 1. Der BGH hat den Mangelbegriff wie folgt beschrieben: Ein Werk ist mangelhaft, wenn es von dem vorausgesetzten Gebrauch abweicht und dadurch der Wert oder die Gebrauchstauglichkeit beeinträchtigt wird. Ob die anerkannten Regeln der Technik eingehalten worden sind oder nicht, ist von sekundärer Bedeutung¹⁷.

6.1.1 Gewöhnliche Verwendungseignung – gewöhnliche Gebrauchstauglichkeit

Das setzt Bewertungskriterien voraus. Ohne nähere Angaben im Vertrag kam es bei - ohne nähere Aspekte - ausgeschriebenem Sichtbeton auf die gewöhnliche Gebrauchstauglichkeit an (§ 633 Abs. 1 BGB). Die gewöhnliche Gebrauchstauglichkeit konnte daran gemessen werden, was bei ordentlicher, technisch gebotener Ausführung an Störwirkung vermeidbar war. Was darunter zu verstehen ist, ist die Frage. Als Ansatz könnte dienen, alles das an negativen Erscheinungen als Mangel zu qualifizieren, was als Ausführungsfehler erscheint, also bei sorgfältiger Organisation, Abstimmung und Ausführung hätte im Sinne der Vermeidung einer Störwirkung besser gemacht werden können.

Die Schuldrechtsreform hat an die Stelle der gewöhnlichen Gebrauchstauglichkeit die gewöhnliche

Verwendungseignung und die Beschaffenheit gesetzt, die bei Werken der gleichen Art üblich ist und die der Besteller nach der Art des Werks erwarten kann (§ 633 Abs. 2 Satz 2 Nr. 2 BGB). Die VOB/B wird in der Neufassung 2002 in § 13 Nr. 1 diese Formulierung übernehmen. Was der Besteller erwarten kann und was bei Werken der gleichen Art üblich ist, wird primär der Sachverständige bestimmen. Der Sachverständige dürfte als Hilfestellung das zu Rate ziehen, was die technische Literatur und Merkblätter als vorgezogene, abstrakte Begutachtungsergebnisse auflisten.

Fälle: Bei Kiesnestern ist das eindeutig, wie auch bei Nasen an vertikalen Bauteilen an Arbeitsfugen; bei der Porenbildung wird es auf die vom Unternehmer gewählte Schalungsart ankommen. Führt die gewählte Schalungsart bei sorgfältiger Arbeit auch zu weniger Poren, liegt grundsätzlich ein Ausführungsfehler vor. Hat der Unternehmer die Schalungselemente unsystematisch angeordnet, was den Gesamteindruck wegen der Stoßfugen stört, liegt ein Ausführungsfehler vor, was auch gilt, wenn die Schalungsanker willkürlich angeordnet worden sind. Farbunterschiede, die auf den Einsatz verschiedener Lieferanten zurückgehen, beruhen gleichfalls auf einem Ausführungsfehler.

Zusammengefasst lässt sich sagen, dass vermeidbare Abweichungen im Erscheinungsbild der Ansichtsfläche, die störende Wirkungen haben, mangelbegründend sind¹⁸. Alles, was sich nur bedingt oder gar nicht vermeiden lässt, sollte dann, wenn den Maßstab die gewöhnliche Verwendungseignung bilden, nicht als Mangelatbestand gewertet werden. Was bei Werken der gleichen Art üblich und vom Besteller erwartet werden kann, bestimmt sich am Horizont technischer Erkenntnisse, die zwischen Oberflächenmängeln und Sichtbetonmängeln unterscheiden¹⁹. Oberflächenmängel sind Kiesnester, Luftblasen, Absanden der Oberfläche, Kantenabplatzungen, krumme Kanten und Flächen. Das sind Mängel, die selbstverständlich bei einem Sichtbeton nicht vorliegen dürfen. Erkennbare Schüttlinien bilden die Grenzlinie, denn Schüttlinien sind mit dem Herstellungsprozess notwendig verbunden und kaum zu vermeiden.

6.1.2 Vertraglich vorausgesetzte Verwendungseignung – vertraglich vorausgesetzte Gebrauchstauglichkeit

Sind die Anforderungen im LV präzise beschrieben, wird der Anforderungsparameter (Erfolgssoll) hierdurch vorgegeben. Mit Wirkung ab 1.1. 2002 gilt für die ab diesem Zeitpunkt geschlossenen Verträge anstelle der bisherigen Bezeichnung „vertraglich vorausgesetzte Gebrauchstauglichkeit“ die neue Bezeichnung „nach dem Vertrag vorausgesetzte

¹⁷ BGH BauR 1972,162

¹⁸ vgl. die Liste unter Abschnitt 4.3 des DBV-Merkblatts Sichtbeton

¹⁹ Vgl. Betonlexikon unter Stichwort „Sichtbetonoberflächen“

Verwendungseignung“. Der Sache nach hat sich hierdurch nichts geändert.

Das Leistungsverzeichnis kann diese vertraglich vorausgesetzte Verwendungseignung insofern beschreiben, als sämtliche die Ansichtsfläche beeinflussenden Bauteile und Maßnahmen akribisch von der Schalung (Bretterschalung einschließlich Bretterbreite, gehobelt, ungehobelt, Richtung der Schalbretter, Tafelschalung) über Stöße, Stoßdichtung, Schalungsanker, Fugenausbildung, Trennmittel, usw. angeführt werden. Hierdurch wird die vertraglich vorausgesetzte Verwendungseignung insofern geprägt, als damit ein bestimmtes Ergebnis vorgegeben wird. Das Fehlen von einzelnen, das qualitative Aussehen beeinflussenden Faktoren führt bei dieser Betrachtungsweise zu einer Reduktion der vertraglich vorausgesetzten Verwendungseignung. Das wird regelmäßig dazu führen, dass die Anforderungen im Vergleich zur gewöhnlichen Verwendungseignung angehoben werden.

Beispiel: Fehlt eine Stoßdichtung, wird in gewissem Umfang Wasseraustritt und damit Streifenbildung in Kauf genommen. Ist eine Stoßdichtung beschrieben, muss eine Streifenbildung vermieden werden. Eine solche Erscheinung stellt dann eine Beeinträchtigung der Verwendungseignung dar.

Ob ein derartiges Ergebnis, nämlich eine bestimmte, qualitativ geprägte Klasseneinteilung, aus dem LV abgeleitet werden kann, ist jedoch sehr die Frage. Es ist durchaus möglich, dass das Leistungsverzeichnis insoweit eine Lücke enthält und qualitativ trotz des Fehlens keine Absenkung gewollt ist. Denn eines gilt auch: Aus einer fehlerhaften, unvollkommenen Leistungsbeschreibung mit Leistungsverzeichnis darf ein Anforderungsprofil zur Entlastung des Auftragnehmers nicht abgeleitet werden.

Ratschlag: Dem fachkundigen Auftragnehmer ist dann, wenn das Leistungsverzeichnis für ein anspruchsvolles Objekt im Übrigen den Eindruck sorgfältiger Erstellung vermittelt, dringend anzuraten, einen solchen „Störfall“ zum Anlass für einen Hinweis zu nehmen. Das ist z.B. zu empfehlen, wenn es um fehlende Angaben zu Trapezleisten, Dreikantleisten oder Stoßdichtungen geht.

Solange nicht fachtechnisch gesichert Qualitätsklassen ausgebildet vorliegen, wird es im Streitfall schwer sein, einem Leistungsverzeichnis im Hinblick auf die dort gewählten Formulierungen derartige Klassenbildungen zu unterschieben. Das ist anders bei Verwendung der ÖNORM B 2211, wenn dort nach Abschnitt 2.3.9.3 mit der Klasse S 1 der Beschreibung nach verbunden ist eine glatte, geschlossene Betonoberfläche, die jedoch an den benachbarten Schalungselementen einen 1 cm breiten Streifen aus Zementleim oder Feinmörtel und eine damit verbundene Gratbildung zulässt. Bei Klasse S 2 sind derartige Ausbildungen nicht zulässig.

6.1.3 Beschaffenheitsvereinbarung

An die Stelle der zugesicherten Eigenschaft ist infolge der Schuldrechtsreform mit Wirkung für die ab

1.1. 2002 geschlossenen Verträge die vertragliche Beschaffenheit getreten. Wie schon bei der zugesicherten Eigenschaft besteht die Gefahr einer solchen Beschaffenheitsvereinbarung darin, dass allein auf das Vorliegen des vereinbarten Merkmals abgestellt und damit ein qualifiziertes Erfolgssoll beschrieben wird. Auf die Beeinträchtigung der Verwendungseignung darf dann nämlich nicht abgehoben werden. Eine solche Beschaffenheitsvereinbarung liegt vor, wenn sich die Parteien auf bestimmte Merkmale eines Bauwerks oder Bauteils einigen. Das neue Recht reduziert im Vergleich zur bisherigen, durch die zugesicherte Eigenschaft geprägten Rechtslage, die Hemmschwelle für die Annahme einer derartigen Beschaffenheitsvereinbarung. Die Benennung von Leistungskriterien im Leistungsverzeichnis kann schnell bei unkritischer Übernahme zu einer – gefährlichen – Beschaffenheitsvereinbarung führen.

Beispiel: Die Sichtbetonfläche darf keine Grate, Marmorierungen und Wolken- und Schüttlinienausbildung aufweisen.

Wird eine solche Formulierung als Beschaffenheitsvereinbarung eingestuft, kommt es bei Auftreten der an sich zu vermeidenden Grate, Marmorierung und Wolkenbildung nicht auf die Wirkung im Gesamten an. Die Verwendungseignung muss auch unter ästhetischen Gesichtspunkten nicht gestört sein. Auf eine solche Störungswirkung kommt es bei Vorliegen einer Beschaffenheitsvereinbarung nicht an.

Ratschlag: Man sollte bei einem Fremd-LV als Bieter im Anschreiben zum Ausdruck bringen, dass die im LV angeführten Merkmale als im Dienste der Verwendungseignung stehend angesehen werden. Denn es muss den Parteien auch möglich sein, Beschaffenheitsmerkmale nicht in dem Sinne zu vereinbaren, dass ihr Vorliegen absolut im Sinne eines qualifizierten Erfolgssolls gefordert wird, sondern dass damit die vertraglich vorausgesetzte Verwendungseignung näher beschrieben wird. Das eröffnet die Möglichkeit, bei Verfehlung auf die Beeinträchtigung und deren Grad abzustellen.

6.2 Mängelbeseitigung – Minderung

Aus technischer Sicht ist material- und fachgerechte Ausbesserung zulässig²⁰. Aus rechtlicher Sicht ist entscheidend, ob die Nachbesserung, die nunmehr seit 1.1.2002 Nacherfüllung heißt (§ 635 BGB), zu einer Mängelbeseitigung führt, also die Störwirkung beseitigt ist. Ist eine Verschlechterung deshalb verbunden, weil der Gesamteindruck nicht verbessert wird, ist wegen Unmöglichkeit der Nachbesserung eine Minderung vorzunehmen. Die in Betracht kommenden Maßnahmen orientieren sich an den Beanstandungen.

Die Bemessung der Minderung kann nicht allein darin bestehen, dem Unternehmer z.B. den Sichtbetonzuschlag zu streichen. Der Minderwert der Leis-

²⁰ DIN 18217 Abschnitt 2.3.1

tung kommt nämlich nicht allein im Zuschlag zum Ausdruck.

In dem Zusammenhang kann auch die Frage eine Rolle spielen, unter welchen Voraussetzungen ein Unternehmer eine an sich mögliche Nachbesserung wegen Unverhältnismäßigkeit des Aufwandes ablehnen kann. Der BGH²¹ hat dazu ausgeführt, Unverhältnismäßigkeit liege dann vor, wenn der mit der Nachbesserung in Richtung auf Beseitigung des Mangels erzielbare Erfolg bei Abwägung aller Umstände des Einzelfalles in keinem vernünftigen Verhältnis zur Höhe des dafür erforderlichen Aufwandes steht. Unverhältnismäßigkeit ist danach in aller Regel nur anzunehmen, wenn einem objektiv geringen Interesse des Besteller an einer völlig ordnungsgemäßen vertraglichen Leistung ein ganz erheblicher und deshalb vergleichsweise unangemessener Aufwand gegenübersteht. Hat der Besteller hingegen objektiv ein berechtigtes Interesse an einer ordnungsgemäßen Erfüllung, kann ihm regelmäßig wegen hoher Kosten die Nachbesserung nicht verweigert werden.“

Diese Würdigung gilt auch für die Neuregelung nach § 635 Abs. 3 BGB. Bei Beeinträchtigungen in der Funktion wird der Unverhältnismäßigkeitseinwand kaum greifen²²; bei geringfügigen Schönheitsfehlern kann es anders sein. Das ist eine Frage des Einzelfalles und auch des Stellenwerts der Sichtbetonfläche.

6.3 Beurteilungsaspekte

Für die Mangel- wie auch die Mängelbeseitigungsfrage ist der Beurteilungsaspekt von entscheidender Bedeutung. Untersuchungsmethoden sind nicht normiert, soweit es sich nicht um Abweichungen in der Ebenheit handelt. Da es bei der Beurteilung der Tauglichkeit oder bei Beanstandungen von Sichtbeton um optische Beeinträchtigungen geht, ist die Frage, nach welchen Kriterien die Störwirkungen auf einen Betrachter zu beurteilen sind. Das fängt bereits bei dem Betrachter an, setzt sich bei der Einnahme des Entfernungsstandortes fort und führt schließlich zu den Einwirkungsumständen und eventuell einzuschaltenden Gerätschaften.

Oswald/Abel²³ haben sich damit näher befasst. Deren Standpunkt ist folgender: Der Betrachter ist ein gewöhnlicher Betrachter. Beide Autoren stellen an den Betrachter keine besonderen positiven oder negativen Anforderungen. Es wird also nicht darauf abgestellt, wie ein täglicher Nutzer die Leistung empfindet und sieht, dessen Störungsempfindlichkeit wohl höher liegen dürfte als die des gewöhnlichen Betrachters. Die Frage ist, ob dieser gewöhnliche Betrachtungsstandpunkt dann richtig ist, wenn es um die Einhaltung einer Beschaffenheitsvereinbarung geht. Der gewöhnliche Betrachter dürfte dann ein-

schlägig sein, wenn es um die gewöhnliche Verwendungseignung geht. Der spezifische Betrachter dürfte in Betracht kommen, wenn die Einhaltung der Beschaffenheitsvereinbarung zu prüfen ist. Wer Besonderes will, darf für sich vielleicht auch einen besonderen Betrachtungsstandpunkt einnehmen.

Der Standort dieses Betrachters ist einer, der sich aus den gebrauchstüblichen Bedingungen ergibt. Ein gewisser Betrachtungsabstand ist einzuhalten, auch die Beleuchtungsverhältnisse sind diejenigen, die sich bei der Nutzung einstellen. Das DBV-Merkblatt formuliert, für das Bauwerk sei die Entfernung angemessen, die es erlaubt, das Bauwerk in seinen wesentlichen Elementen zu erfassen. Für Bauteile sei die Entfernung angemessen, die dem üblichen Betrachter entspreche. Das bedeutet z.B. für den Sichtbeton in einer Tiefgarage, dass die Störwirkung auf den Nutzer bei üblichen Nutzungsbedingungen unter den dort herrschenden Beleuchtungsverhältnissen zu beurteilen ist. Auch hier ist die Frage, ob der Betrachtungsstandort nicht auch mit Rücksicht auf das Anforderungsprofil festzulegen ist.

Konsequenz: Wenn bei der Beurteilung der gewöhnlichen Anforderungen an einen Sichtbeton auf den handwerklichen Machbarkeitsmaßstab abgestellt worden ist, erfährt die Fehlerbeurteilung durch die weiteren Gegebenheiten der Prüfung durchaus eine Einschränkung. Handwerklicher Machbarkeitsmaßstab und Bestimmung der Störwirkung müssen gemeinsam berücksichtigt werden. Der handwerkliche Machbarkeitsmaßstab darf also nicht verabsolutiert werden. Das gilt in gleicher Weise für sonstige im LV enthaltene Vorgaben. Die von einem IST-Zustand ausgehende Störwirkung ist eigenständig zu beurteilen. Fehlt diese, fehlt die Beeinträchtigung. Allerdings stellt sich - das schneiden Oswald/Abel nicht an - wohl auch davon unabhängig die Wertfrage. Die Wertfrage ist wohl objektiv und nicht aus der Sicht eines bestimmten Betrachters in einer bestimmten Nutzungssituation zu beurteilen. Man könnte allerdings auch das genaue Gegenteil vertreten, da die wertbildenden Faktoren aus der Sicht eines bestimmten Betrachters einzuschätzen sind. Wenn auch das neue Recht (Folge der Schuldrechtsreform) in § 633 Abs. 2 BGB den Wertaspekt nicht mehr bemüht, sondern - abgesehen von der Beschaffenheitsvereinbarung - allein auf die Verwendungseignung abstellt, dürfte dieser Begriff auch die Wertfrage einschließen.

7 Zusammenfassung

- 1) Sichtbeton hat mit Gestaltung zu tun. Gestalterische Anforderungen und die Mittel für die Gestaltung hat grundsätzlich der Auftraggeber und damit der Architekt zu formulieren.
- 2) Die Formulierung der Anforderungen erfolgt in der Leistungsbeschreibung mit Leistungsverzeichnis, spätestens im Zusammenhang mit der

²¹ NJW-RR 1997,1106 = BauR 1997,638

²² BGH NJW 1996,3269 = BauR 1996,858

²³ Hinzunehmende Unregelmäßigkeiten bei Gebäuden, 2.Aufl. S. 17 ff

- Ausführungsplanung (Schalungspläne und sonstige Vorgaben).
- 3) Der Unternehmer hat darauf zu achten, ob dann, wenn die Anforderungen an den Sichtbeton erst nach Vertragsschluss formuliert werden, Raum für eine Nachtragsvergütung nach § 2 Nr. 5 VOB/B ist. Das Bausoll des Vertrags ist mit den Leistungen nach neu formulierten Anforderungsprofilen zu vergleichen.
 - 4) Der Unternehmer hat bei Formulierung der Anforderungen bereits im Vertrag darauf zu achten, ob nach neuem Recht (für Verträge, die ab 1.1.2002 geschlossen werden) eine Beschaffensvereinbarung oder eine vertraglich vorausgesetzte Verwendungseignung vorliegt. Das macht einen erheblichen Unterschied.
 - 5) Bei einer Leistungsbeschreibung mit Ziel- und Wegvorgaben (Erfolgssoll und Bausoll) hat der Unternehmer seiner Prüfungs- und Bedenkenhinweispflicht zu genügen (Sichert das Bausoll das Erfolgssoll, ist der Weg auch zielführend ?)
 - 6) Bei einer Leistungsbeschreibung lediglich mit Wegvorgaben (Bausollvorgaben i.s.d. § 2 Nr. 1 VOB/B) sollte sich der Unternehmer vor einer vorschnellen Qualitätsklasseneinteilung hüten und prüfen, ob das LV eventuelle Fehler enthält, auf die dann hinzuweisen ist.
 - 7) Bei einem LV lediglich mit Zielvorgaben (Erfolgssoll) trifft den Unternehmer auch die Planungsaufgabe. Damit ist eine große Verantwortung verbunden, wenn später von Seiten des Auftraggebers nicht Ausführungspläne beigelegt werden.
 - 8) Merkblättern und sonstigen technischen Regeln kommt bei der Beurteilung von Sichtbetonmängeln ein hoher Stellenwert zu. Ihnen kann die Qualität eines vorgezogenen, abstrakten Sachverständigengutachtens beigelegt werden, womit den konkret eingeschalteten Sachverständigen die Umsetzung der Merkblatt- und Regelkenntnisse auf den konkreten Fall obliegt.
 - 9) Im Streitfall ist es günstig, wenn dem Vertrag Qualitätsmerkmale entnommen werden können, die auch für den Sachverständigen verbindlicher Parameter sind.
 - 10) Die gewöhnliche Verwendungseignung (§ 633 Abs. 2 Satz 2 Nr. 2 BGB neue Fassung) wird insbesondere dadurch geprägt, was bei sorgfältiger Ausführung machbar hergestellt werden kann (Vermeidung von Ausführungsmängeln).

Programm der Tagung

17. März 2005, „Johann-Gottfried-Tulla-Hörsaal, Universität Karlsruhe (TH)

9.15 Uhr	Anmeldung/Kaffee	14.00 Uhr	Sichtbeton – Betonzusammensetzung, Einbau, Qualitätssicherung Prof. Dr.-Ing. Ludger Lohaus Dipl.-Ing. Karen Fischer Institut für Baustoffe, Universität Hannover
10.00 Uhr	Begrüßung/Grußworte Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Franz Nestmann Dekan der Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften Universität Karlsruhe (TH) Ulrich Nolting, Geschäftsführer Süd Zement Marketing GmbH, Ostfildern	14.30 Uhr	Sichtbeton – Schalungshaut und Trennmittel Prof. Dr.-Ing. Bernd Hillemeier Dr.-Ing. Roland Herr Dr. rer. nat. Karsten Schubert Technische Universität Berlin
	Planen und Bauen	15.00 Uhr	Sichtbetone aus Leichtbeton Prof. Dr.-Ing. Harald S. Müller Dipl.-Ing. Michael Haist Universität Karlsruhe (TH)
10.30 Uhr	Bauen mit Sichtbeton – eine große unglückliche Liebe Dipl.-Ing. Stephan Braunfels, Architekt, Stephan Braunfels Architekten BDA Berlin	15.30 Uhr	Kaffeepause
11.00 Uhr	Sichtbeton im Deutschen Historischen Museum in Berlin Dipl.-Ing. Arch., M.Sc. Christiane Flasche I.M.Pei Architect, Berlin		Beurteilen, Instandsetzen, Merkblätter und Verträge
11.30 Uhr	Qualität von Alltagsarchitektur – Das Haus aus Sichtbeton Prof. Bernd Sammann, Architekt BDA, Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst – FB Architektur, Hildesheim	16.00 Uhr	Sichtbeton – Möglichkeiten der Mängelbeseitigung und Instandsetzung Dr.-Ing. Martin Günter Ingenieurgesellschaft Bauwerke GmbH, Karlsruhe
12.00 Uhr	Hinweise zur Planung und Ausführung von Sichtbeton- bauwerken Dipl.-Ing. Martin Peck Leiter Marketing und Technik Bayern. Süd Zement Marketing GmbH, München	16.30 Uhr	Technische Kriterien für die Beurteilung und Abnahme von Sichtbeton Dipl.-Ing. Rolf-Dieter Schulz Deutscher Beton- und Bautechnik- Verein e.V. Bauberatung Süd, Feldkirchen
12.30 Uhr	Mittagspause	17.00 Uhr	Vertragsrechtliche Gesichtspunkte Prof. Dr. jur. Gerd Motzke Vorsitzender Richter am OLG, Augsburg
	Forschungsergebnisse, neue Technologien	17.30 Uhr	Schlusswort Prof. Dr.-Ing. Harald S. Müller Universität Karlsruhe (TH) Ulrich Nolting Geschäftsführer Süd Zement Marketing GmbH, Ostfildern
13.30 Uhr	Untersuchungen zu Farberscheinungen an Sichtbetonoberflächen Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Peter Schießl Technische Universität München		Imbiss

Referenten- / Autorenverzeichnis

Dipl.-Ing. Stephan Braunfels

Stephan Braunfels Architekten BDA, Schackstr. 3, 80539 München

Dipl.-Ing. Karen Fischer

Institut für Baustoffe, Appelstraße 9A, 30167 Hannover

Dipl.-Ing., MsC Christiane Flasche

I.M.Pei Architekt, Senefelder Straße 31, 10437 Berlin

Dr.-Ing. Martin Günter

Ingenieurgesellschaft Bauwerke GmbH, Tullastraße 74, 76131 Karlsruhe

Dipl.-Ing. Michael Haist

Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, Kaiserstr. 12, 76128 Karlsruhe

Dr.-Ing. Roland Herr

Institut für Bauingenieurwesen, Gustav-Meyer-Allee 25, 13355 Berlin

Prof. Dr.-Ing. Bernd Hillemeier

Institut für Bauingenieurwesen, Gustav-Meyer-Allee 25, 13355 Berlin

cand.-Ing. Matthias Kannenberg

Institut für Bauingenieurwesen, Gustav-Meyer-Allee 25, 13355 Berlin

Prof. Dr.-Ing. Ludger Lohaus

Institut für Baustoffe, Appelstraße 9A, 30167 Hannover

Prof. Dr.jur. Gerd Motzke

Hermann-Löns-Str. 39, 86415 Mering

Prof. Dr.-Ing. Harald S. Müller

Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, Kaiserstr. 12, 76128 Karlsruhe

Dipl.-Ing. Martin Peck

Süd Zement Marketing GmbH, Rosenheimer Straße 145g, 81671 München

Prof. Dipl.-Ing. Bernd Sammann

HAWK - Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst - FB Architektur, Hildesheim, Arch.-Büro: Im Bergwinkel 6, 30952 Ronnenberg

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.H. Peter Schießl

Centrum für Baustoffe und Materialprüfung, Baumbachstraße 7, 81245 München

Dr. rer. nat. Karsten Schubert

Institut für Bauingenieurwesen, Gustav-Meyer-Allee 25, 13355 Berlin

Dipl.-Ing. Rolf-Dieter Schulz

Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V., Bauberatung Süd, Hohenlindner Straße 6a, 85622 Feldkirchen

Dipl.-Ing. Doris Strehlein

Centrum für Baustoffe und Materialprüfung, Baumbachstraße 7, 81245 München