

# Dunkelverfärbungen an Sichtbetonflächen

Wissenschaftlicher Kurzbericht Nr. 10 (2007)

Dipl.-Ing. Doris Strehlein, Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Peter Schießl

Arbeitsgruppe 2: Beton

Förderer: Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ (AiF)

## 1 Problemstellung und Zielsetzung

Trotz fachgerechter Planung und mangelfreier Ausführung kommt es bei der Herstellung von Sichtbetonflächen unter winterlichen Bedingungen immer wieder zu fleckigen Hell-Dunkel-Verfärbungen. Derartige Verfärbungen nach Winterbetonagen waren bislang weder vorhersagbar noch mit dem jetzigen Wissensstand in der Betontechnologie, der Schalungs- und Ausführungstechnik zielsicher vermeidbar.

Da nur bei Kenntnis der für die Entstehung fleckiger Verfärbungen an Sichtbetonflächen ursächlichen Mechanismen gezielte Maßnahmen zur Vermeidung von Farbtonunterscheiden getroffen werden können, wurden am Centrum Baustoffe und Materialprüfung (cbm) der TU München umfangreiche Forschungsarbeiten zu dieser Thematik durchgeführt.

## 2 Strukturelle und mineralogische Charakteristika der hellen bzw. dunklen Bereiche

Anhand von Untersuchungen an Bauwerksproben konnten die in der Baupraxis aufgetretenen Farberscheinungen an der Oberfläche (unverfärbt, dunkel verfärbt) charakteristischen Kennwerten des oberflächennahen Gefüges, der Oberflächenstruktur und der Mineralogie an der Oberfläche zugeordnet werden. So zeigte sich im Bereich der Dunkelverfärbungen ein deutlich dichteres und kompakteres oberflächennahes Gefüge der Zementsteinmatrix. Auch an der Oberfläche selbst wurde in den dunkel verfärbten Bereichen bei allen untersuchten Bauwerksproben eine im Vergleich zu den unverfärbten Bereichen dichtere und ebenere Struktur beobachtet (Abbildung 1). Die mineralogische Zusammensetzung der Bereiche unterschiedlicher Farbwirkung unterschied sich ebenfalls signifikant. Bei allen Untersuchungen lag das Ca/Si-Verhältnis in den verfärbten Bereichen deutlich über dem in den unverfärbten Bereichen.

Aus der Optik ist bekannt, dass bei gleicher Gesamtmenge des reflektierten Lichts der Anteil der diffusen Reflexion umso kleiner ist, je glatter

und ebener die Oberflächenstruktur ist. Oberflächen mit geringer diffuser Reflektivität und damit ebenere Oberflächen wirken auf den Betrachter dunkler [1]. Bei hohen Umgebungsfeuchten wird diese Dunkelverfärbung durch das Auftreten lokal höherer Sorptionswassergehalte in Bereichen einer dichteren Zementsteinmatrix mit einem feineren Porengefüge unter Berücksichtigung der Gesetzmäßigkeiten der Totalreflexion bei nassen Oberflächen zusätzlich verstärkt [2].

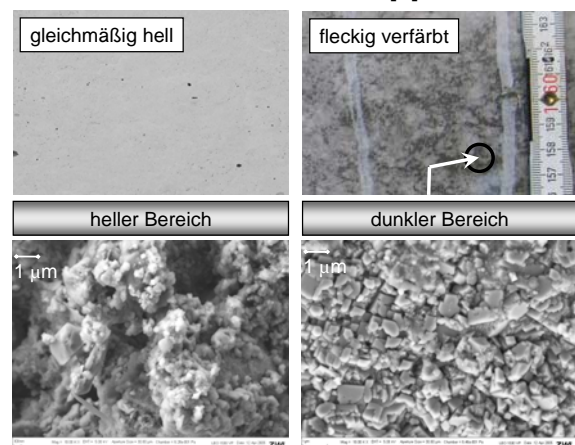


Abbildung 1: Fotos bzw. REM-Aufnahmen der hellen bzw. dunkel verfärbten Bereiche

## 3 Einflussgrößen auf die Entstehung von Dunkelverfärbungen

Die in der Baupraxis aufgetretenen fleckigen Verfärbungen konnten an zwei Laborbetonen durch Variation der Herstell-, Erhärtungs- und Austrocknungsbedingungen nachgestellt werden. Die Zusammensetzung der Laborbetone entsprach dabei den Empfehlungen des DBV-Merkblatts Sichtbeton (Ausgabe 2004) [3]. Die Ergebnisse der Forschungsarbeiten zeigen, dass die klimatischen Bedingungen während der Austrocknung einen entscheidenden Einfluss auf das optische Erscheinungsbild von Sichtbetonoberflächen haben. Bei Winterbetonagen ist eine hohe relative Feuchte während der Austrocknung des Betons von entscheidender Bedeutung für das spätere optische Erscheinungsbild der Sichtbetonflächen. Die Betone wiesen bei niedrigen Umgebungstemperaturen unabhängig von

den Herstell- und Erhärtingsbedingungen ab einer Austrocknungsfeuchte von 95 % r.F. deutliche fleckige Verfärbungen auf. Obwohl die Entstehung der Verfärbungen maßgeblich von den jeweiligen Herstell-, Erhärtings- und Lagerungsbedingungen beeinflusst wird, reagierte jeder Beton unterschiedlich robust bezüglich seines optischen Erscheinungsbildes auf die Veränderung dieser Bedingungen (Abbildung 2).

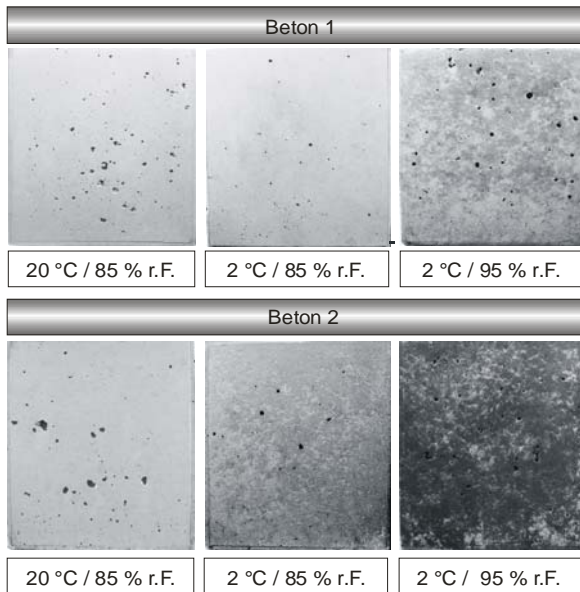


Abbildung 2: optisches Erscheinungsbild der untersuchten Betone bei unterschiedlichen klimatischen Bedingungen nach dem Ausschalen

#### 4 Transport- und Kristallisationsvorgänge während der Austrocknung

Nach dem Ausschalen ist die Verdunstungsrate an der Oberfläche des Betons umso größer, je höher die Lagerungstemperatur und je geringer die relative Feuchte der Umgebungsluft ist. Bei hohen Verdunstungsraten verlagert sich die Trocknungsfront ins Betoninnere, während sie bei geringen Verdunstungsraten an der Betonoberfläche verbleibt. Aufgrund der Verdunstung kommt es an der Trocknungsfront zu einer Calciumübersättigung in der Porenlösung, wodurch Calciumhydroxid ausfällt. Durch die Ausbildung eines Feuchtgradienten von Innen nach Außen entsteht ein Feuchtetransport, welcher wiederum einen Transport der in der Porenlösung gelösten Calciumionen an die Trocknungsfront bedingt. Mit fortschreitender Hydratation des Betons und abnehmender Menge an Überschusswasser verlangsamt sich dieser Transport, bis sich letztlich der Übergang des Wassers vom flüssigen in den gasförmigen Zustand immer weiter ins Innere des Betons verlagert. Bei tiefen Temperaturen verzögert sich dieser Prozess, wodurch die Ausscheidung von  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  direkt an der Betonober-

fläche zusätzlich begünstigt wird. Bei Ablagerung des Calciumhydroxids an oberflächennahen Kapillarporenausgängen stellt sich die Oberflächenstruktur dieser Bereiche im Rasterelektronenmikroskop als eben und geschlossen dar. Die dargestellten Transportmechanismen und Kristallisationseffekte während der Austrocknung erklären, weshalb bei den Probekörpern, die nach dem Ausschalen sowohl bei geringen Temperaturen als auch bei hohen relativen Feuchten gelagert wurden, an der Oberfläche des Betons ein höheres Vorkommen an Calcium und eine geschlossenerere und glattere Oberflächenstruktur detektiert wurde als bei den Probekörpern, bei denen durch höhere Temperaturen oder geringere relative Feuchten während der Austrocknung die Trocknungsfront und damit auch der Ort der Calciumhydroxid-Ausscheidung im Betoninneren lag.

#### 5 Zusammenfassung

Die in der Baupraxis aufgetretenen fleckigen Hell-Dunkel-Verfärbungen wurden im Labor nachgestellt, indem bei der Herstellung, der Erhärtung und der Austrocknung des Betons winterliche Bedingungen simuliert wurden. Die im Rahmen der Bauwerksuntersuchungen gefundene Korrelation zwischen dem Auftreten von Verfärbungen bei gleichzeitig dichtem oberflächennahen Gefüge und einer geschlossenen, ebenen Oberflächenstruktur konnten mit Hilfe der Untersuchungen an den Laborprobekörpern verifiziert werden.

Anhand der Ergebnisse der Bauwerksuntersuchungen und deren Verifikation im Labor wurde ein kausaler Zusammenhang zwischen den charakteristischen Kenngrößen Mineralbestand, Oberflächenstruktur und Farberscheinung abgeleitet. Durch die vermehrte Ablagerung calciumreicher Verbindungen auf der Betonoberfläche bei ungünstigen klimatischen Bedingungen (geringe Temperaturen bei gleichzeitig hohen relativen Feuchten) verändert sich die Oberflächenstruktur, welche letztlich durch eine ebene und geschlossene Gestalt die dunkle Farbwirkung dieser Bereiche bestimmt.

Die Forschungsarbeiten wurden durch die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ (AiF) gefördert.

#### 6 Literatur

- [1] Todd, J.T.; et al.: Lightness constancy in the presence of specular highlights. *Psychological Science*, Vol. 15, pp. 33-39, 2004
- [2] Lutz, et al.: *Lehrbuch der Bauphysik*. B.G. Teubner, Stuttgart 1985
- [3] Merkblatt Sichtbeton, Fassung August 2004