

Farbmetrische Analyse zur quantitativen Bewertung der Farbe von glatten Sichtbetonflächen

Tobias Schack¹, Ludger Lohaus¹ und Michael Haist¹

¹*Institut für Baustoffe, Hannover, Deutschland*

KURZFASSUNG:

Farb- und Helligkeitsunterschiede an glatten Sichtbetonflächen werden von einer Vielzahl von Einflussfaktoren beeinflusst. In der Planungsphase von Sichtbetonbauteilen wird die Farbe zumeist indirekt z. B. durch Verweis auf vergleichbare Bauwerke oder über Erprobungsflächen aus Beton eingegrenzt. Eine objektive und quantitative Festlegung findet jedoch nicht statt. Im Gegensatz dazu wird in vielen anderen Industriezweigen, wie z. B. der Automobil- oder Lebensmittelindustrie aber auch bei der Zementherstellung, die Lichtspektroskopie bzw. Farbmessung bereits erfolgreich zur quantitativen Farbmessung für Qualitätssicherungszwecke eingesetzt.

Im vorliegenden Beitrag werden Einflüsse der Ausgangsstoffe sowie einzelner betontechnologischer Eigenschaften auf die resultierende Farbe von Sichtbetonflächen systematisch und quantitativ mittels Lichtspektroskopie ermittelt und bewertet. Ferner wird die prinzipielle Eignung des Messverfahrens zur Anwendung in der Planungsphase glatter Sichtbetonflächen diskutiert.

Schlagworte: Sichtbeton, Farbe, Farbmetrik, CIE L*a*b*, Helligkeit

ABSTRACT:

Colour and luminance differences on exposed concrete are influenced by a large number of factors. In the planing phase the colour is usually specified by referencing to other – similar – structures or by providing hand samples. However, an objective and quantitative assessment does not take place. In contrast, in many other industries such as automotive or food industry but also in cement production, the light spectroscopy or colour measurement is already successfully used for quality control purposes with both colour and luminance being quality criteria.

In the present paper the influence of the raw materials and concrete properties on the resulting colour of exposed concrete surfaces is systematically und quantitatively determined and evaluated by light spectroscopy. Furthermore, the application of the measuring method for use in the planning phase of smooth exposed concrete surfaces is evaluated.

Keywords: exposed-concrete, colour, colorimetry, CIE L*a*b*, luminance

1 EINLEITUNG

In der modernen Architektur stellt die Sichtbetonbauweise ein bevorzugtes Stilmittel, vor allem für repräsentative Massivbauten, dar. Die Merkmale der Gestaltung und der Herstellung des Betons, wie z. B. Textur, Form, Fugen und Farbe, bestimmen dabei maßgebend die architektonische Wirkung des Bauteils oder Bauwerks. Von Seiten planender Architekten liegt die derzeitige Präferenz unter anderem bei glatten Sichtbetonflächen mit gleichmäßiger Farbtönung. Das Gestaltungsziel von Sichtbeton beruht vorrangig auf den individuellen gestalterischen Vorstellungen des planenden Architekten bzw. des Bauherrn und ist demzufolge nur schwierig in einer allgemeinverbindlichen Vorschrift zu regeln. Das DBV/VDZ-Merkblatt "Sichtbeton" (DBV 2015) sowie die ÖVBB-Richtlinie "Sichtbeton – Geschalte Betonflächen" (ÖVBB 2009) stellen jeweils umfassende Ansätze mit Hinweisen zur Planung, Ausschreibung, Ausführung und Qualitätssicherung für die moderne Sichtbetonbauweise zur Verfügung. So werden in diesen Regelwerken die Anforderungen z. B. an die Textur, Porigkeit, Farbtongleichmäßigkeit und die Ebenheit anhand von Sichtbetonklassen (SB1-SB3) zusammengefasst. Zur Farbe der Sichtbetonfläche werden dabei jedoch keine direkten Anforderungen definiert. Einzig in der ÖVBB-Richtlinie wird das Merkmal der Farbe als nicht klassenbindende Anforderung definiert. Das Merkblatt über Betonfertigteile aus Architekturbeton der Fachvereinigung Deutscher Betonfertigteilebau e.V. (FDB 2009) definiert den Begriff „Architekturbeton“ als Ausführungen, die u. a. eine möglichst perfekte, einheitliche Oberfläche und Farbe zum Ziel haben. Für die architektonische Wirkung des Bauteils oder Bauwerks, vor allem bei Verwendung von Architekturbeton, stellt die Farbe somit ein primäres Merkmal dar (vgl. Bild 1).



Bild 1: NS-Dokumentationszentrum in München (links [1]), Sprengelmuseum in Hannover (Mitte [2]) und Gebäude der Deutschen Bank in Berlin mit Fertigteilen aus Architekturbeton (rechts [3])

Eine objektive Beurteilung der Anforderungen, insbesondere der Farbe, am fertigen Bauteil oder Bauwerk stellt sich bislang als schwierig dar, daher erfolgt üblicherweise eine subjektive Bewertung ggf. unter Berücksichtigung von Erprobungsflächen. Verfahren zur Beurteilung der Porigkeit sind bekannt und werden in der Praxis erfolgreich an Sichtbetonflächen angewendet (Goldammer 2017). Vereinzelt werden auch Methoden zur Beurteilung der Oberflächenqualität oder der Verfärbungsintensität in der Literatur beschrieben (Schirmer et al. 2018, Lohaus et al. 2016, Weisheit 2010). Nicht verbreitet sind im Betonbau hingegen Methoden der Lichtspektroskopie bzw. Farbmessung, wie sie z. B. in der Automobilindustrie, der Farben- und Lackindustrie sowie der Lebensmittelindustrie zur Qualitätssicherung eingesetzt werden. Auch in der Zementproduktion sind ähnliche Methoden zur Messung der chemischen Zusammensetzung des Klinker-Rohmehls verbreitet, werden jedoch im Betonbau bislang nicht systematisch eingesetzt (Boss 2012). Im Bereich der Betontechnologie wurde die Lichtspektroskopie bisher nur vereinzelt zur Beurteilung der Farbintensität von Pigmenten (Yang 2014) oder der Farbänderung im Hochtemperaturbereich bzw. Brandfall (Annerel 2011) eingesetzt.

Im vorliegenden Beitrag werden Einflüsse der Ausgangsstoffe sowie einzelner betontechnologischer Einflussfaktoren auf die resultierende Farbe von Sichtbetonflächen beschrieben und quantitativ mittels eines Spektralphotometers ermittelt und bewertet. Darauf aufbauend wird die prinzipielle Eignung der Lichtspektroskopie-Methode zur Anwendung bei glatten Sichtbetonflächen als Messverfahren in der Planungsphase diskutiert. Zunächst wird jedoch im nachfolgenden Kapitel ein kurzer Überblick über die Grundlagen der Farbenlehre und die daraus resultierenden Konsequenzen für die Farbmessung gegeben.

2 GRUNDLAGEN DER FARBENLEHRE

Farbe ist keine physikalische bzw. keine primäre stoffliche Eigenschaft, sondern eine menschliche Sinnesempfindung. Zur Wahrnehmung von Farben ist Licht erforderlich, so dass durch Reflexionseigenschaften von Körpern ein Farbreiz und infolgedessen eine Farbwahrnehmung beim Beobachter ausgelöst wird. Je nach Wellenlängenbereich wird dem Licht eine bestimmte Farbe zugeordnet, wobei nur der Wellenlängenbereich von 380 nm bis 729 nm für den Menschen sichtbar ist (Richter 1981).

Maßbeziehungen zwischen einzelnen Farben können durch die Farbmetrik ausgedrückt werden. Man unterscheidet allgemein zwischen unbunten und bunten Farben. Unbunte Farben können einzig durch ihre Helligkeit beschrieben werden und sind demzufolge eindimensional. Zur Beschreibung von bunten Farben sind dagegen drei voneinander unabhängige Merkmale notwendig.

Zur technischen Erfassung von Farben bzw. Farbinformationen sind Messgeräte sowie spezielle Maßsysteme notwendig, da es sich um keine physikalischen Messgrößen handelt. Als Ausgangspunkt der Farbmetrik dienen die sogenannten Normalspektralwertfunktionen. Demnach können Farben mit Hilfe der Farbmetrik objektiv gemessen und durch Zahlen eindeutig ausgedrückt werden (Wego 2010). Die zahlenmäßige Beschreibung von Farben erfolgt mittels Farbmaßzahlen in unterschiedlichen Farbräumen. Im Laufe der Zeit wurden verschiedene Farbräume definiert, wobei sich der CIE-L*a*b*-Farbenraum als besonders nützlich herausgestellt hat. Der CIE-L*a*b*-Farbenraum wurde 1976 durch die CEN eingeführt und ist in DIN 6174 (2007) bzw. DIN EN ISO 11664-4 (2012) definiert. Die vom Menschen wahrnehmbaren Farben werden im CIE-L*a*b*-Farbenraum in eine geometrische Darstellung überführt und dabei weitgehend gleichabständig dargestellt. Hierdurch wird nachweislich eine hohe Übereinstimmung zwischen dem empfundenen Farbabstand – d. h. dem Unterschied zwischen zwei Farben – und dessen geometrischer Repräsentation im Farbenraum erzielt. Der Farbenraum ist als dreidimensionales Koordinatensystem in Zylinderform aufgebaut (vgl. Bild 2) und wird durch die Helligkeit (L*-Wert) und die Farbmaßzahlen (a*- und b*-Werte) aufgespannt.

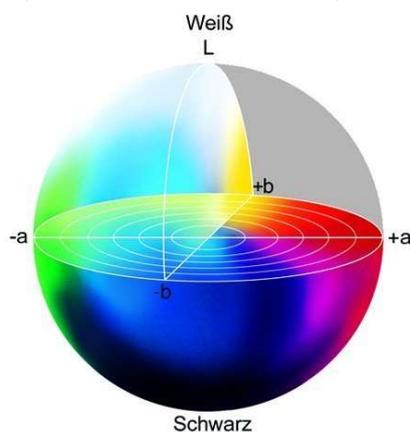


Bild 2: CIE-L*a*b*-Farbenraum (c't labs 2015)

Die Helligkeit wird durch den dimensionslosen Kennwert L^* ausgedrückt und kann Werte zwischen $L^* = 0$ (schwarz) und $L^* = 100$ (weiß) annehmen. Die Farbmaßzahl a^* beschreibt die Rot-Grün-Achse, wobei ein negativer Wert einer Grünfärbung und ein positiver Wert einer Rotfärbung entspricht. Der dritte Kennwert b^* entspricht im positiven Bereich einer Gelbfärbung und im negativen Wertebereich einer Blaufärbung und definiert demnach die Blau-Gelb-Achse. Aus den Farbmaßzahlen a^* und b^* können die Farbmaßzahlen Buntheit C^*_{ab} (Sättigung) und Buntton h_{ab} (Farbton) abgeleitet werden:

$$C^*_{ab} = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \quad (1)$$

$$h_{ab} = \arctan\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \quad (2)$$

Zur Darstellung des Unterschiedes zweier Farbreize ist der Farbabstand ΔE_{ab} definiert. Mathematisch betrachtet ist dies der kürzeste euklidische Abstand zwischen zwei im CIE- $L^*a^*b^*$ -Koordinatensystem definierten Farborten:

$$\Delta E_{ab} = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (3)$$

$$\Delta L^* = L^*_1 - L^*_0 \quad \Delta a^* = a^*_1 - a^*_0 \quad \Delta b^* = b^*_1 - b^*_0 \quad (4)$$

Der Farbabstand zweier Farbreize gibt demnach eine eindeutige Auskunft, wie stark sich die zwei Farben voneinander unterscheiden. In der Literatur werden viele unterschiedliche Einteilungen angegeben, ab welchem Farbabstand der Unterschied zwischen den zwei betrachteten Farbreizen als unterschiedlich wahrgenommen wird. Teichmann (1990) sowie Hellerich (2004) et al. geben ab einem Farbabstand $\Delta E_{ab} = 1,5$ bis $3,0$ eine deutliche Differenzierbarkeit an.

3 FARB- UND HELLIGKEITSUNTERSCHIEDE AN BETONOBERFLÄCHEN

Die Entstehung von Farbunterschieden an Sichtbetonflächen lässt sich nach dem Ort bzw. Zeit der Entstehung kategorisieren, wie z. B. während der Planungsphase, der Produktion, der Ausführung oder während der Nutzung (Heeß 2011). Eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst in der Ausführungsphase aber auch in der Nutzungsphase das endgültige Erscheinungsbild der Sichtbetonfläche, wie z. B. die Wechselwirkungen zwischen Trennmittel, Schalungshaut und Beton sowie die Witterungsbedingungen nach dem Ausschalen. Mit voranschreitender Hydratation kann sich die Farbe der Betonoberfläche vergleichmäßigen, jedoch können auch temporäre oder bleibende Verfärbungen auftreten (DBV 2015). Eine Vielzahl von Mechanismen bzw. Eigenschaften zur Entstehung von Verfärbungserscheinungen bzw. Farbtonunterschieden an Sichtbetonoberflächen sind in der Literatur beschrieben (Strehlein 2011, Schack et al. 2017, Fiala 2017).

Während der Planungsphase spielt die Stoffauswahl sowie die Festlegung betontechnologischer Eigenschaften eine entscheidende Rolle für die resultierende Farbe der Betonoberfläche. Durch die Wahl der Zementart und der Zusatzstoffe wird das endgültige Erscheinungsbild der Sichtbetonfläche hinsichtlich der Farbe und Helligkeit bereits in der Planungsphase vorbestimmt, jedoch nicht endgültig festgelegt (Trüb 1973, Heeß 2011). Die endgültige Farbe und Helligkeit von hydratisierten Klinkern bzw. Zementen werden neben der absoluten Menge färbender Klinkerphasen auch durch deren Zusammensetzung, insbesondere der eisenreichen Schmelzphasen, beeinflusst (Möller 2018).

Neben der Zusammensetzung des Zements ist der Wassergehalt bzw. der w/z-Wert eine weiterer entscheidender Stellparameter zur Beeinflussung der Farbe bzw. Helligkeit. Die oberflächennahe Gefügeausbildung ist direkt vom Wassergehalt bzw. w/z-Wert abhängig was auch die Farbe bzw. Helligkeit beeinflusst. Je rauer und offenerporiger die Betonoberfläche, desto mehr Licht wird an dieser diffus gebrochen und führt zu einem veränderten Remissionsverhalten (Wihler 2004). Die physikalischen Grundlagen dazu sind z. B. in Strehlein (2011) ausführlich beschrieben. Demnach erscheint eine Betonoberfläche mit hohem w/z-Wert und offenerporigen Gefüge heller als eine Betonoberfläche mit niedrigerem w/z-Wert und dichtem Gefüge (Ludwig et al. 2012).

Eine farbliche Gestaltung von Sichtbetonflächen ist zudem infolge der Zugabe von Pigmenten möglich. Pigmente verändern während der Hydratation nicht ihre Struktur und bewirken demzufolge keine zusätzliche Helligkeit (Ludwig et al. 2012). Eine systematische Abstimmung des Verhältnisses von Zusatzstoff zu Zement kann die Farbsättigung jedoch deutlich steigern (Jang et al. 2014).

4 UNTERSUCHUNGSMETHODIK

Die Farbe bzw. Helligkeit von Sichtbetonflächen ist bereits während der Planungsphase ein wichtiger Bestandteil zur Erfüllung des vom Architekten bzw. Bauherrn gewünschten Ergebnisses. Einflüsse der Ausgangsstoffe sowie betontechnologischer Parameter auf das resultierende Erscheinungsbild bei Sichtbetonflächen werden bisher zumeist durch die visuelle Bewertung von Erprobungsflächen bestimmt. Eine quantitative Bewertung der Farbe während der Planungsphase, aber auch nach Fertigstellung des Bauteils, wird bisher zumeist jedoch nicht vorgenommen.

Zur systematischen Untersuchung des Einflusses der Ausgangsstoffe sowie betontechnologischer Parameter auf die resultierende Farbe von Betonoberflächen wurden Betone mit variierender Zementart sowie variierendem w/z-Wert hergestellt. Bei allen Mischungszusammensetzungen wurde ein konstanter Zementgehalt von 400 kg/m^3 verwendet. Die Variation des w/z-Wertes erfolgte durch die Einstellung des entsprechenden Wassergehaltes (vgl. Tabelle 1). Es wurde dichte Gesteinskörnung entsprechend der Sieblinie A/B16 verwendet. Zur Vermeidung möglicher Wechselwirkungen wurden keine Zusatzmittel eingesetzt, so dass die Konsistenz stark variierte. Die Tabelle 2 gibt einen Überblick über die untersuchten Variationen und über die verwendeten Zementarten. Es wurden jeweils drei würfelförmige Probekörper ($150 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$) in Kunststoffschalungen hergestellt und nach 24 Stunden ausgeschalt. Die ausgeschalteten Probekörper lagerten im Anschluss bei 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchte. Als Trennmittel wurde zur Reduzierung möglicher Interaktionen zwischen Trennmittel und Beton eine wässrige Emulsion verwendet, die möglichst dünn auf die Schalungshaut aufgetragen wurde.

Zur Bestimmung der Farbe der Betonoberflächen wurden farbmetrische Messungen mit einem Spektralphotometer (Colorimeter PCE-CSM 5) in bestimmten Zeitintervallen durchgeführt. Die farbmetrischen Messungen wurden im CIE-L*a*b*-Farbraum gemäß DIN 6174 (2007) bzw. DIN EN ISO 11664-4 (2012) durchgeführt (vgl. Kapitel 2). Der verwendete Messkopf ermöglichte die Erfassung der gerichteten Oberflächenreflexion eines Messflecks mit einem Durchmesser von 8 mm . In Anlehnung an Lübke (2013) wurde als Messgeometrie $8^\circ/d$ verwendet. An jeder Betonoberfläche ($150 \times 150 \text{ mm}^2$) wurden in einem definierten Raster jeweils 15 Messwerte bestimmt. Anhand der ermittelten Kennwerte erfolgte eine Bewertung der Farbe in Abhängigkeit des L*-Wertes (Helligkeit) und der a*- und b*-Werte (Farbigkeit). Des Weiteren wurde vor den farbmetrischen Messungen der spezifische elektrische Widerstand der einzelnen Betonoberflächen, zur indirekten Ermittlung des oberflächennahen Feuchtegehaltes, mittels Wenner-Sonde bestimmt.

Tabelle 1: Übersicht der untersuchten Betone

Zement (400 kg/m ³)	w/z-Wert [-]		
	0,40 (w = 160 kg/m ³)	0,50 (w = 200 kg/m ³)	0,60 (w = 240 kg/m ³)
CEM I 42,5 R	x	x	x
CEM I 52,5 R		x	
CEM I 52,5 SR3 (na)	x	x	x
CEM III/A 42,5 N	x	x	x
CEM III/B 42,5 L-LH/SR (na)		x	

5 VERSUCHSERGEBNISSE

5.1 Einfluss der Zementart

Bild 3 zeigt die Helligkeit (mittlerer L*-Wert) unterschiedlicher Betone in Abhängigkeit der Zementart bei einem konstanten w/z-Wert von 0,50. Die Bestimmung der L*-Werte erfolgte dabei an Betonoberflächen mit einem spezifischen elektrischen Widerstand von $\geq 100 \text{ k}\Omega\text{cm}$, so dass jeweils eine vollständig trockene Oberfläche angenommen werden kann (vgl. Kapitel 5.3). Mögliche Einflüsse oberflächennaher Feuchtigkeit auf die Helligkeit können bei diesen Ergebnissen ausgeschlossen werden. Es ist eine deutliche Abhängigkeit der Helligkeit (L*-Wert) von der eingesetzten Zementart feststellbar. So weisen die Betone mit CEM I, unabhängig der Festigkeitsklasse, vergleichbare Helligkeiten von 74,1 (CEM I 42,5 R) und 74,3 (CEM I 52,5 R) auf. Der Beton mit Hochofenzement und geringem Hüttensandanteil (CEM III/A) zeigt ebenso eine Helligkeit von 74,3. Mit steigendem Hüttensandanteil (CEM III/B) ist eine deutliche Steigerung des L*-Wertes auf 81,7 feststellbar. Die dunkelste Oberfläche kann mit 60,2 bei Verwendung des CEM I 52,5 SR3 (na) festgestellt werden. Die ermittelten L*-Werte der einzelnen Betonoberflächen werden durch den visuellen Eindruck bestätigt (vgl. Fotografien in Bild 4). Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass einzig durch die Variation der Zementart bei konstantem w/z-Wert ein $\Delta L_{\text{max}} = 21,6$ festgestellt werden kann und die Zementart einen signifikanten Einfluss auf die resultierende Helligkeit der Betonoberfläche ausweist.

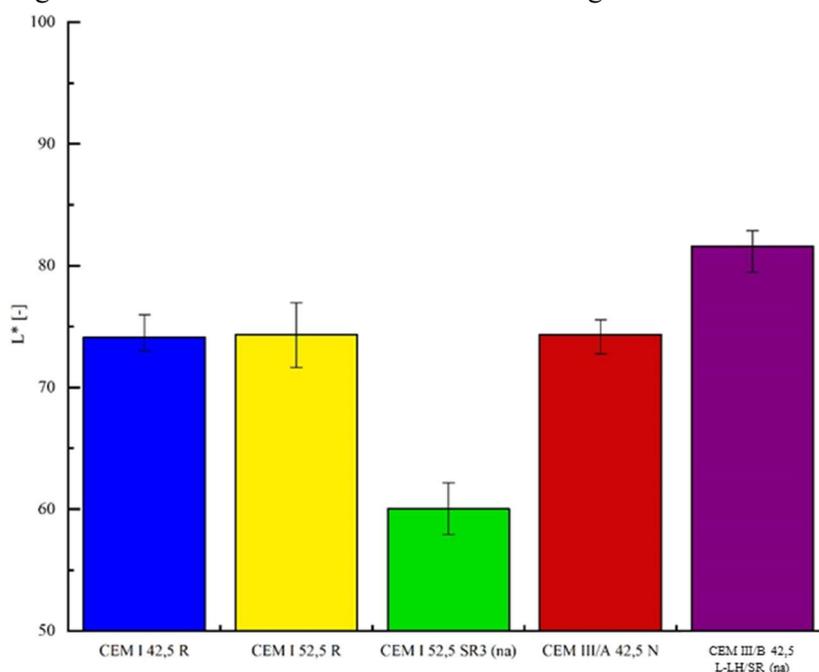


Bild 3: Helligkeit (L*-Wert) in Abhängigkeit der Zementart (w/z = 0,50 = konst.)

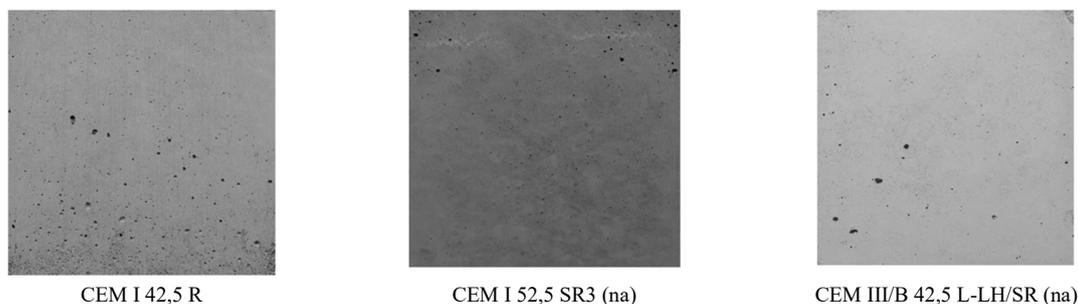


Bild 4: Visueller Eindruck der Betonoberflächen in Abhängigkeit der Zementart ($w/z = 0,50 = \text{konst.}$)

5.2 Einfluss des w/z -Wertes

In Bild 5 ist die Helligkeit als mittlerer L^* -Wert in Abhängigkeit des w/z -Wertes und der Zementart dargestellt. Es kann ein Zusammenhang zwischen der Helligkeit und dem w/z -Wert festgestellt werden. Die Betone mit einem hohen w/z -Wert von 0,60 weisen jeweils die hellsten Betonoberflächen unabhängig der Zementart auf. Vor allem bei Verwendung von CEM III/A ist ein systematischer Einfluss des w/z -Wertes feststellbar. Mit abnehmenden w/z -Wert nimmt hier die Helligkeit stetig ab. Ein ähnlicher, wenngleich auch weniger stark ausgeprägter Einfluss ist auch bei Verwendung von CEM I festzustellen, die Unterschiede zwischen $w/z = 0,4$ und $0,5$ mit 74,3 bzw. 74,9 (CEM I 42,5 R) und 59,7 bzw. 60,7 (CEM I 52,5 SR3 (na)) sind deutlich geringer. Aufgrund des geringen Wassergehaltes wiesen die Betone mit einem w/z -Wert von 0,40 und Portlandzement eine sehr steife Konsistenz auf und waren dementsprechend schwer zu verarbeiten. Zur Sicherstellung einer möglichst porenfreien Betonoberfläche musste die Verdichtungszeit stark erhöht werden. Dies führte vermutlich zu einem Anstieg des Wassergehaltes im schalungsnahen Bereich (Wandeeinfluss), so dass sich an der Betonoberfläche ein vergleichbarer w/z -Wert zu den Betonen mit einem w/z -Wert von 0,50 einstellte. Resultierend daraus ist eine vergleichbare Helligkeit der Betonoberflächen feststellbar. Die Betone mit Hochofenzement waren dagegen unabhängig der w/z -Werte gut verarbeitbar und konnten mit identischer Verdichtungsenergie eingebaut werden, so dass die Helligkeit der Betonoberflächen eine deutliche Anhängigkeit vom w/z -Wert aufweist.

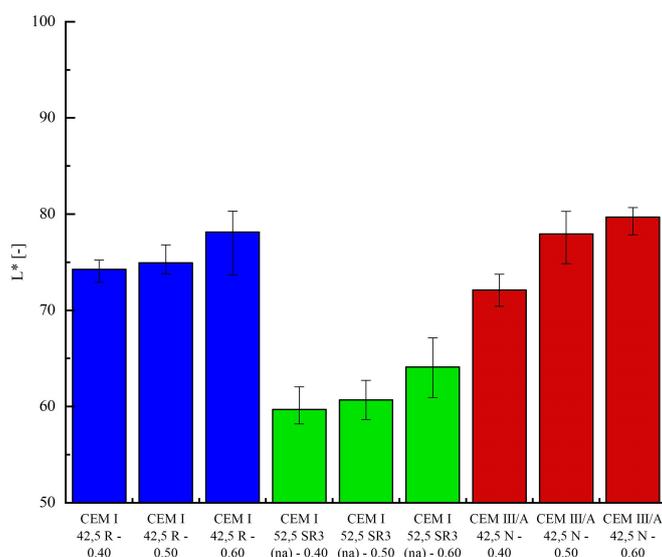


Bild 5: Helligkeit (L^* -Wert) von Betonoberflächen in Abhängigkeit des w/z -Wertes und der Zementart

5.3 Einfluss der oberflächennahen Feuchtigkeit

In Bild 6 ist die Helligkeit (L^* -Wert) von Betonen mit unterschiedlichen Zementarten und w/z-Werten in Abhängigkeit des spezifischen elektrischen Widerstandes dargestellt. Der spezifische elektrische Widerstand dient dabei als indirektes Maß für den oberflächennahen Feuchtegehalt. Ein höherer Feuchtegehalt senkt dabei den spezifischen Widerstand. Als globale Referenzwerte für den spezifischen elektrischen Widerstand werden für gealterte, im freien gelagerte, geschützte Betonbauteile unter Verwendung von Portlandzement $100 \text{ k}\Omega\text{cm}$ und bei Verwendung von Hochofenzement $200\text{-}600 \text{ k}\Omega\text{cm}$ angegeben (Polder 2001). Demnach kann bei diesen genannten Größenordnungen eine trockene Betonoberfläche angenommen werden.

Es ist deutlich ersichtlich, dass der L^* -Wert vor allem im Anfangsstadium bei geringen spezifischen elektrischen Widerständen ansteigt. Mit zunehmender Austrocknung tritt eine Aufhellung der Betonoberflächen ein. Bereits bei spezifischen elektrischen Widerständen von etwa $10\text{-}25 \text{ k}\Omega\text{cm}$ ist eine konstante Helligkeit bei allen Betonen und demnach keine weitere Aufhellung feststellbar. Als Kriterium für eine konstante Helligkeit wurde dabei in Anlehnung an Hellerich (2004) ein $\Delta L^* \leq 1,5$ angenommen.

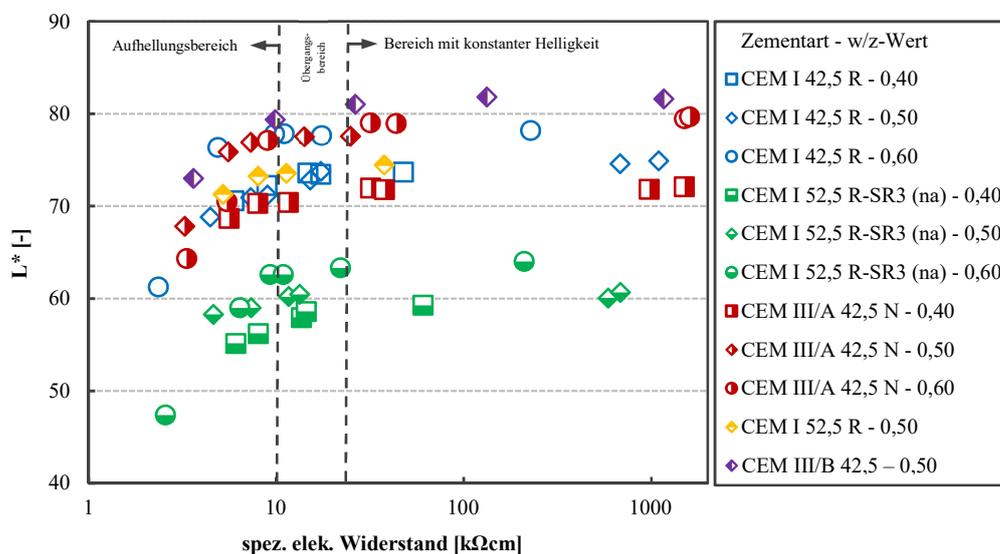


Bild 6: Helligkeit (L^* -Wert) von Betonoberflächen in Abhängigkeit des elektrisch spezifischen Widerstandes für Betone gemäß Tab. 1 hergestellt mit unterschiedlichen Zementarten und w/z-Werten (siehe Legende)

In Bild 7 ist die Aufhellung ΔL^*_{0-n} (vgl. Gleichung (4)) in Abhängigkeit des spezifischen Widerstandes für die unterschiedlichen w/z-Werte dargestellt. Aus dem Vergleich der drei Diagramme wird deutlich, dass der w/z-Wert der maßgebende Einflussfaktor für die Aufhellung ist. So kann unabhängig der Zementart bei einem w/z-Wert von 0,40 im Mittel eine Aufhellung von $\Delta L^*_{0-n} = 4$, bei w/z-Wert von 0,50 von $\Delta L^*_{0-n} = 5$ und bei einem w/z-Wert von 0,60 von $\Delta L^*_{0-n} = 15$ festgestellt werden. Lediglich bei einem w/z-Wert von 0,50 lässt sich eine Abhängigkeit der Zementart ableiten, da die Betone mit CEM III etwa eine doppelt so hohe Aufhellung gegenüber dem Betonen mit CEM I aufweisen. Diese Tendenz wird bei den weiteren w/z-Werten jedoch nicht bestätigt. Die zuvor beschriebenen Ergebnisse werden durch die visuelle Bewertung in Bild 8 bestätigt. Es ist eine deutliche Aufhellung der Betonoberfläche bei einem w/z-Wert von 0,60 (untere Bildreihe) gegenüber der Betonoberfläche bei einem w/z-Wert von 0,40 (obere Bildreihe) erkennbar.

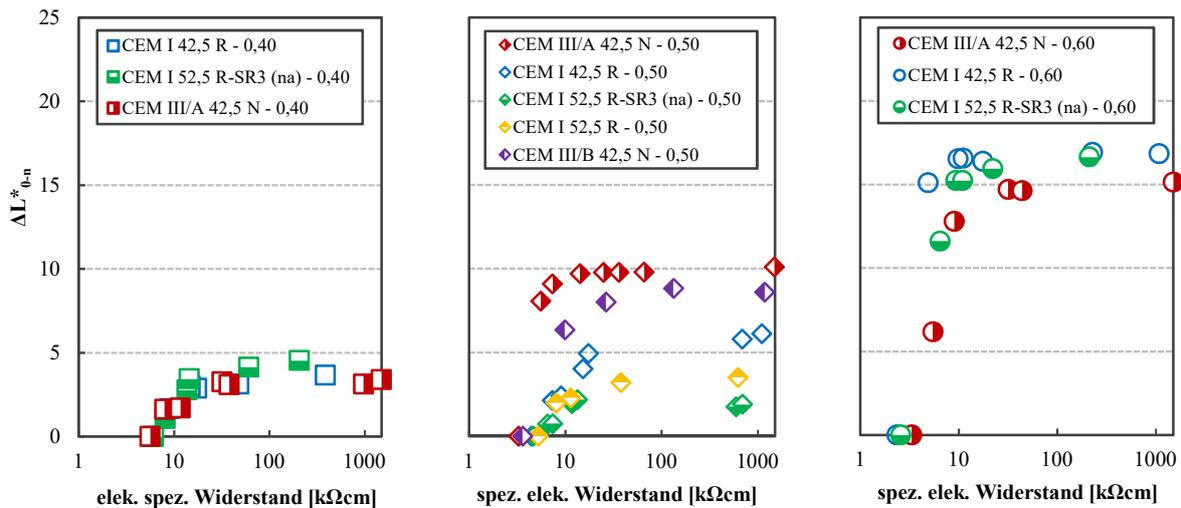


Bild 7: Aufhellung (ΔL^*_{0-n}) von Betonoberflächen in Abhängigkeit des spezifischen elektrischen Widerstandes

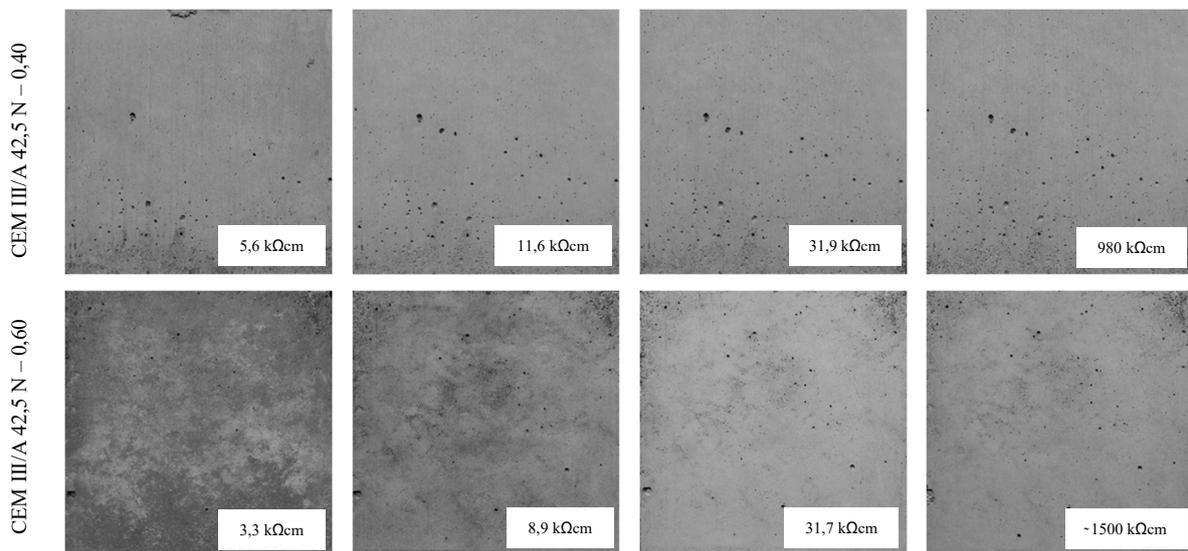


Bild 8: Visuelle Aufhellung von Betonoberflächen in Abhängigkeit des w/z-Wertes und des elektrischen spezifischen Widerstandes

5.4 Farbmaßzahlen a^* und b^*

Zur quantitativen Beschreibung von bunten Farben sind neben der Helligkeit (L^* -Wert) weitere Kennwerte zur Sättigung und Buntheit erforderlich (vgl. Kapitel 2.2). Bild 9 zeigt die Farbmaßzahlen a^* und b^* aller untersuchten Betonoberflächen in Abhängigkeit der Zementart. Zur besseren Übersichtlichkeit sind dazu die jeweiligen L^* -Werte ebenfalls dargestellt. Die a^* -Werte weisen alle positive Werte auf, was einer Rotfärbung der Betonoberflächen entspricht. Dem b^* -Wert zur Folge weisen die Betonoberflächen nahezu alle eine Gelbfärbung auf, wobei diese gegenüber der Rotfärbung eine deutlich stärkere Sättigung besitzt. Unabhängig vom w/z-Wert weisen die Betonoberflächen mit Hochofenzement eine stärkere Rotfärbung (höhere a^* -Werte) gegenüber den Betonoberflächen mit Portlandzement auf. Darüber hinaus kann vor allem bei den Betonen mit CEM III/A mit zunehmender Austrocknung eine Verschiebung der a - und b^* -Werte in Richtung des negativen Wertebereiches festgestellt werden. Demnach verändert sich nicht allein die Helligkeit (vgl. Kapitel 5.3), sondern auch

die Färbung der Betonoberflächen in Abhängigkeit der Hydratation bzw. des oberflächennahen Feuchtegehaltes.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass Betone mit Hochofenzement eine deutlich stärkere Rotfärbung als Betone mit Portlandzement aufweisen. Diese unterschiedlichen Charakteristika in Abhängigkeit der Zementart werden durch den Farbton, ausgedrückt durch den Parameter h_{ab} , bestätigt (vgl. Bild 10). Die Betone mit Hochofenzement weisen geringere Werte für h_{ab} und demnach eine stärkere Rotfärbung auf. Mit zunehmenden Hüttensandanteil (CEM III/B) sind tendenziell noch geringere h_{ab} -Werte gegenüber dem Beton mit CEM III/A zu erkennen. Demzufolge ist mit steigenden Hüttensandanteil eine Zunahme der Rotfärbung an den Betonoberflächen feststellbar. Die Betone mit Portlandzement zeigen vergleichbare Farbtonungen unabhängig der Zement-Festigkeitsklasse. Jedoch lässt sich bei den Betonen mit CEM I eine Abhängigkeit der Farbtonung vom w/z-Wert feststellen. Mit abnehmenden w/z-Wert steigt dabei der Parameter h_{ab} tendenziell in Richtung höherer Werte und dementsprechend einer veränderten Farbtonung.

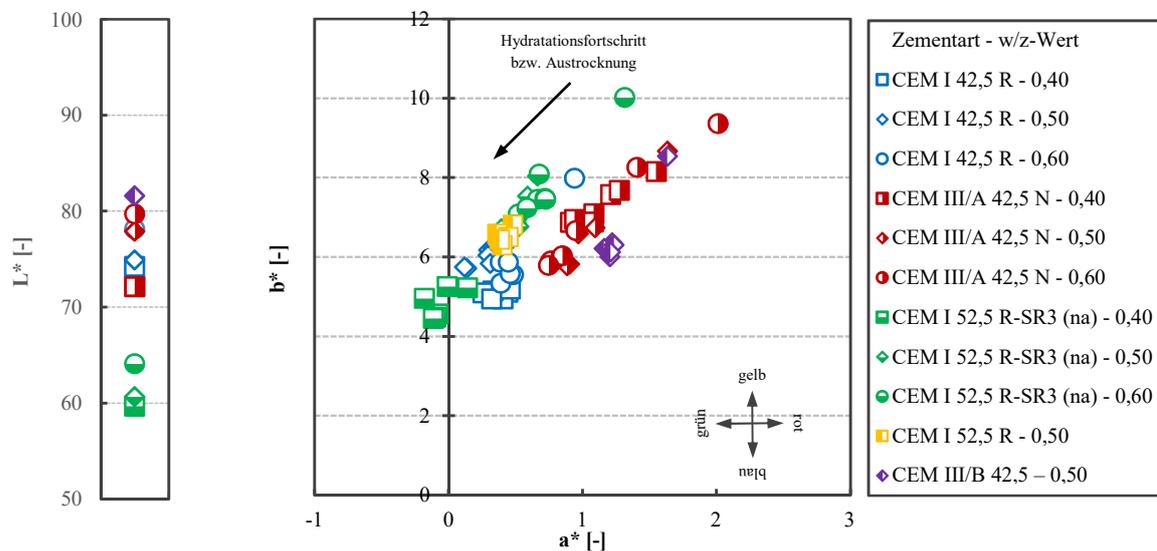


Bild 9: Helligkeit (L^* -Wert) und Farbmaßzahlen (a^* - und b^* -Werte) der Betonoberflächen für die untersuchten Betone (Zementart – w/z-Wert)

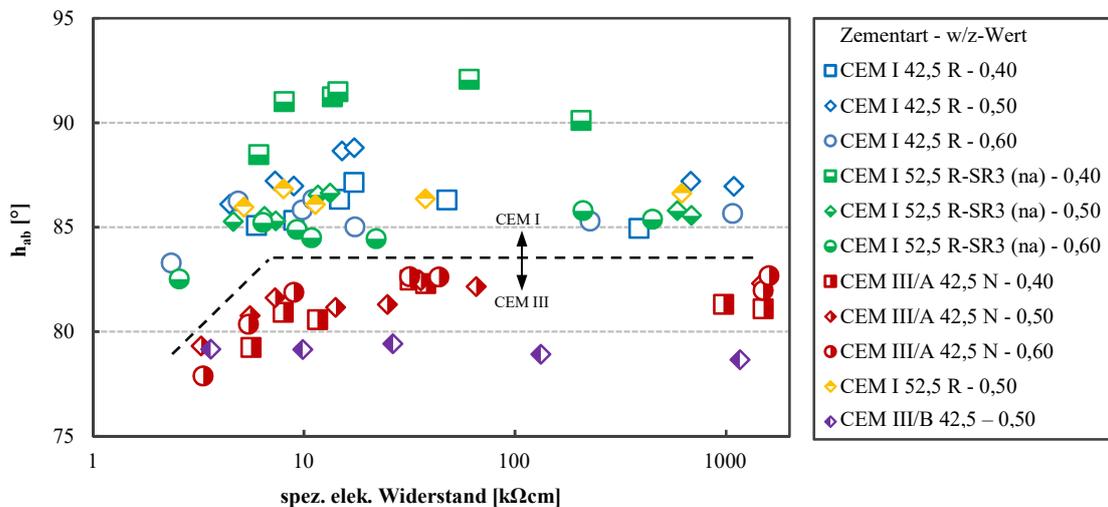


Bild 10: Farbtonung (h_{ab}) von Betonoberflächen in Abhängigkeit des elektrisch spezifischen Widerstandes für die untersuchten Betone (Zementart – w/z-Wert)

6 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass sowohl die Auswahl der Ausgangsstoffe als auch betontechnologische Parameter wie der w/z-Wert einen signifikanten Einfluss auf die resultierende Farbe von Sichtbetonflächen besitzen. Die Zementart beeinflusst primär die Helligkeit, jedoch auch die Sättigung und den Farbton der Betonoberfläche. In Abhängigkeit der Zementart weisen die Betonoberflächen unterschiedliche Färbungsanteile auf. So weisen z. B. Betone mit Hochofenzement (CEM III) eine stärkere Rotfärbung gegenüber Betonen mit Portlandzementen (CEM I) auf.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass Betonoberflächen in Abhängigkeit der eingesetzten Ausgangsstoffe sowie betontechnologischer Parameter deutlich veränderte Farbeigenschaften ausweisen. Es lassen sich nicht nur Unterschiede in der Helligkeit (unbunte Farben), sondern auch der Buntheit und der Sättigung (bunte Farben) feststellen. In Abhängigkeit der oberflächennahen Feuchtigkeit tritt mit zunehmender Austrocknung eine Aufhellung der Betonoberflächen ein, die ab einem gewissen Feuchtegehalt (spez. elek. Widerstand $\approx 10\text{-}25\text{ k}\Omega\text{cm}$) jedoch stagniert. Die Stärke der Aufhellung ist dabei vor allem vom eingestellten w/z-Wert abhängig.

Die Farbmessung mittels Spektralphotometer stellt für die Planungsphase von Sichtbetonbauteilen ein hilfreiches und zielführendes Messverfahren zur Einstellung und Kontrolle der gewünschten Farbe an Erprobungsflächen im Labor unter konstanten Randbedingungen dar. Die Auswahl der Ausgangsstoffe sowie die Einstellung betontechnologischer Parameter kann somit an Erprobungsflächen im Labormaßstab systematisch auf die Farbe abgestimmt werden. Wechselwirkungen zwischen Zementen und Zusatzstoffen oder Zusatzmitteln können ebenso systematisch an Erprobungsflächen untersucht sowie quantitativ bewertet und dessen Einflüsse auf die Farbe angepasst werden.

LITERATUR

- Annerel, E., Taerwe, L. (2011): Methods to quantify the colour development of concrete exposed to fire, *Construction and Buildings Materials*, 25-2011, S. 3989-3997
- Boss, P. (2012): Farbkontrolle: Das Grau des Zements, BFT International, 07-2012
- c't labs (2015): Druck-Farbe ist nicht gleich Farbe, online: <https://www.heise.de/ct/artikel/c-t-Labs-Druck-Farbe-ist-nicht-gleich-Farbe-2640868.html>, Letzter Zugriff: 15.08.2019
- Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V. & Verein Deutscher Zementwerke e.V. (2015): DBV/VDZ-Merkblatt "Sichtbeton", Eigenverlag, Berlin/Düsseldorf
- DIN 6174 (2007): Farbmetrische Bestimmung von Farbmaßzahlen und Farbabständen im angenähert gleichförmigen CIELAB-Farbenraum, Beuth, Berlin
- DIN EN ISO 11664-4 (2012): Farbmetrik - Teil 4: CIE 1976 L*a*b* Farbenraum, Beuth, Berlin
- Fachvereinigung Deutscher Betonfertigteile e. V. (2009): Merkblatt Nr. 8 über Betonfertigteile aus Architekturbeton, Fachvereinigung Deutscher Betonfertigteile e. V. (Hrsg.), Bonn
- Lübbe, E. (2013): Farbbempfindung, Farbbeschreibung und Farbmessung, Springer Vieweg, Wiesbaden
- Fiala, H. (2017): Verfärbungen von Sichtbetonflächen, *Beton- und Stahlbetonbau Special Issue Betonoberflächen Vol. 112*, Ernst & Sohn, S. 24-32
- Goldammer, K.-R. (2017): Sichtbeton und Schalungstechnik, In Konrad Bergmeister & Frank Fingerloos (Hrsg.), *Betonkalender 2017*, Berlin, S. 323-380
- Hellerich, W., Harsch, G. & Haenle, S. (2004): Werkstoff-Führer Kunststoffe Eigenschaften, Prüfungen, Kennwerte, Hanser-Verlag
- Heeß, S. (2011) Farbunterscheide bei Sichtbetonflächen, *BetonWerk International*, 5-2011, S. 180-183

- Lohaus, L. & Steinhäuser, H. (2016): Kriterien für die Eignung eines Betons zur Herstellung von Sichtbeton, *beton*, 05-2016, S. 190-196
- Lohaus, L., Schack, T. & Cotardo, D. (2017): Die Kunst der Sichtbetontechnik, *Beton- und Stahlbetonbau Special Issue Betonoberflächen Vol. 112*, Ernst & Sohn, S. 3-11
- Ludwig, M., Ludwig, F., Weber, P. & Scholz, H. (2012): Wie beeinflusst Wasser die Helligkeit an der Betonoberfläche, *BetonWerk International*, 6-2012, S. 42-45
- Möller, H. (2018): Farbmessung zum Verständnis von Struktur und Eigenschaften von Zementphasen und Calciumsilikathydraten, In F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde (Hrsg.), *Tagungsband 20. Internationale Baustofftagung ibausil*, Weimar, S. 1-121-1-135
- Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik (2009): *Richtlinie Sichtbeton – Geschalte Betonoberflächen*, Wien
- Polder, R. B. (2001): Test methods for on site measurement of resistivity of concrete — a RILEM TC-154 technical recommendation, *Construction and Building Materials*, 2-3-2001, S. 125-131
- Richter, M. (1981): *Einführung in die Farbmetrik*, de Gruyter, New York
- Schack, T., Begemann, C., Beyer, D. & Lohaus, L. (2018): Farbtonunregelmäßigkeiten im unteren Wandbereich an Sichtbetonflächen – Interaktion zwischen betontechnologischen und bauverfahrenstechnischen Einflüssen, In F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde (Hrsg.), *Tagungsband 20. Internationale Baustofftagung ibausil*, Weimar, S. 1-1075-1-1082
- Schirmer, U. & Osburg, A. (2017): Methodenentwicklung zur parameterbasierten Beurteilung und Klassifizierung von Sichtbetonoberflächen – Farb- und Strukturanalyse im Labormaßstab, In *Claustahler Zentrum für Materialtechnik (Hrsg.), 2. Niedersächsisches Symposium Materialtechnik*, Shaker Verlag GmbH, S.359-369
- Strehlein, D. (2011): *Fleckige Dunkelverfärbungen an Sichtbetonoberflächen Charakterisierung – Entstehung – Vermeidung*, Dissertation, München
- Teichmann, G. (1990): Farbmetrik in der Betonindustrie? *Betonwerk Fertigteiletechnik*, 11, S. 58-73
- Trüb, U. A. (1973): *Die Betonoberfläche*, Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin
- Wego, A. & Geske, G. (2010): Korrekte Erkennung von Farben und Oberflächen mit Farbsensoren, *Photonik*, 5-2010, S. 38-42
- Weisheit, S., Waldmann, D. & Greger M. (2010): Untersuchungen zur Oberflächenqualität von Selbstverdichtendem Beton, In *Breit, Wolfgang et al. (Hrsg.), 51. Forschungskolloquium des DAfStb - Doktorandensymposium 2010*, Kaiserslautern
- Wihler H.-D. (2004): Farbdifferenzen von Betonwaren, *beton*, 2-2004, S. 74-76
- Yang, H., Kang, H. & So, S. (2014): Color Expression Characteristics and Physical Properties of Colored Mortar using Ground Granulated Blast Furnace Slag and White Portland Cement, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18(4)-2014, S. 1125-1132

[1] <https://www.ns-dokuzentrum-muenchen.de/zentrum/ueber-uns/>, Letzter Zugriff: 15.08.2019

[2] <https://www.baunetzwissen.de/beton/objekte/kultur/sprenkel-museum-in-hannover-4761265>, Letzter Zugriff: 15.08.2019

[3] https://www.bft-international.com/de/artikel/bft_Repraesentative_Fassaden_aus_Architekturbeton_2852735.html, Letzter Zugriff: 15.08.2019