

# Computer Vision-basierte Messmethoden zur Charakterisierung von (Frisch-)Betoneigenschaften

Bericht zum DBV-Forschungsvorhaben 321

## Motivation

Der Ausbreitversuch ist auch über 50 Jahre nach seiner Einführung noch immer der Gold-Standard bei der Ermittlung der Frischbetoneigenschaften sowohl im Betonwerk als auch auf der Baustelle. Aus dem ermittelten Durchmesser des Ausbreitkuchens wird dabei auf das Fließverhalten des Betons geschlossen und dieses Verhalten in Form einer Konsistenzangabe zusammengefasst. Die Baustoffprüferin bzw. der Baustoffprüfer erkennt bei der Betrachtung des Ausbreitkuchens aber nicht nur die Konsistenz, sondern mit entsprechender Erfahrung auch, ob der Beton die Gefahr aufweist zu bluten oder sich zu entmischen. Bislang gelingt es nicht, dieses Erfahrungswissen in eine quantitative Bewertung zu überführen, die stichhaltig genug ist, um abgesicherte Entscheidungen zu treffen. Ergänzende Untersuchungen, wie beispielsweise zur Blut- und Entmischungsneigung oder zum Wassergehalt, sind zumeist sehr zeitaufwendig und daher nicht zweckmäßig, um beispielsweise den Beton zum Einbau abzulehnen. Insbesondere fehlen der-

zeit geeignete Methoden, um auch geringe Abweichungen von den Sollwerten in den (Frisch-)Betoneigenschaften zu detektieren, zielsicher zu quantifizieren und damit Trends zu erkennen. Eine ‚Aussteuerung‘ der Betoneigenschaften ist daher – wenn sie überhaupt rechtzeitig stattfindet – stark vom Erfahrungsschatz der Prüferin bzw. des Prüfers abhängig und beschränkt sich nahezu ausschließlich auf einen Telefonanruf im Werk, ohne jedoch die Fehlerursachen quantifiziert angeben zu können.

Dieser Sachstand bildete die Ausgangssituation für das im vorliegenden Beitrag beschriebene vom DBV finanzierte Forschungsvorhaben. Zielsetzung der Arbeiten war es, die Potenziale sogenannter Computer Vision-Methoden zum Einsatz bei der Ausbreitmaßprüfung zu untersuchen und damit das Erfahrungswissen versierter Baustoffprüfer/Innen zu digitalisieren. Hierzu wurden im Vorhaben erste Ansätze für optische berührungslose Messmethoden zur Charakterisierung von (Frisch-) Betoneigenschaften basierend auf photogrammetrischen Messprinzipien entwickelt. Im Zentrum der vorgestellten

Machbarkeitsstudie stand die Frage, ob und wenn ja welche Betoneigenschaften mittels dieser Messmethoden zielsicher quantifiziert werden können.

## Methodenentwicklung

Lassen sich aus Fotos oder Videos eines Ausbreitkuchens Informationen beispielsweise über die Betonzusammensetzung oder die Stabilität des Frischbetons ableiten? Die Grundlage für die Beantwortung dieser Frage bilden photogrammetrische Messprinzipien, die aber auf den hier vorliegenden Fall des Ausbreitmaßes von Beton übertragen werden mussten. Dabei war es u. a. das Ziel, im Rahmen der Konsistenzprüfung eine hinreichend genaue photogrammetrische Rekonstruktion der Oberfläche des ausgebreiteten Frischbetons unter Verwendung von minimal notwendigem Bildmaterial (zur Gewährleistung der Praxistauglichkeit) zu erreichen. Hierzu wurden in einer umfangreichen systematischen Parameterstudie unterschiedliche Kameras und Aufnahmekonfigurationen – d. h. Projektionszentren, Blickrichtung, Abstände

etc. – hinsichtlich der erzielbaren Genauigkeit der digitalen Bildauswertung untersucht. Es zeigte sich, dass bereits vier aus ungefähr festgelegten Positionen aufgenommene Einzelbilder mit einer gewöhnlichen Spiegelreflexkamera ausreichend sind, um die Form des Ausbreitkuchens sowie die Oberflächenstruktur des ausgebreiteten Betons reproduzierbar zu bewerten.

### Experimentelles Untersuchungsprogramm

Zur gezielten Veränderung der Oberflächeneigenschaften (Oberflächengestalt bzw. -textur sowie Reflexion) des Frischbetons wurden die Eigenschaften durch Variation stofflicher und betontechnologischer Parameter systematisch verändert. Die Steuerung der Konsistenz

erfolgte vorrangig durch Anpassung des Leimgehaltes (Bindemittel und Wasser) sowie des w/z-Wertes, so dass die Untersuchung des gesamten Konsistenzbereiches von F2 bis F6 möglich war. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die untersuchten Betone.

### Untersuchungsergebnisse

Die hier untersuchte, auf photogrammetrischen Messprinzipien basierende Messmethodik gestattet eine genaue Rekonstruktion der Oberfläche des ausgebreiteten Frischbetons als 3D-Modell. Bild 1 zeigt die 3D-Oberflächenstrukturen ausgewählter Frischbetone in Abhängigkeit der Konsistenz bzw. des Leimgehaltes. Die Oberflächengestalt bzw. -textur weist visuell deutlich sichtbare Unterschiede in Abhängigkeit der

Konsistenz bzw. des Leimgehaltes auf. Es lassen sich sowohl Unterschiede in der Oberflächengestalt, der vertikalen Ausdehnung als auch im Durchmesser erkennen und optisch quantifizieren. So kann beispielsweise detektiert werden, dass sich bei einem sehr geringen Leimgehalt und resultierendem Ausbreitmaß von 40 cm der Frischbeton infolge der 15 Schläge nicht vollständig ausgebreitet hat (siehe Bild 1 a). Der Rand der Konusform ist dabei nach der Durchführung der Schläge noch deutlich ersichtlich.

Tabelle 1. Variation der Parameter zur Einstellung unterschiedlicher Betonzusammensetzungen (Konsistenzbereich F2-F6)

Stofflicher bzw. betontechnologischer Parameter	Wertebereich
w/z-Wert	0,50; 0,55; 0,60
Leimgehalt	280; 300; 325; 350; 400 l/m <sup>3</sup>
Korngrößenverteilung	Siebliniencharakteristik A/B
Größtkorn	8; 16; 32 mm
Fließmitteldosierung	PCE-Fließmittel bei ausgewählten Mischungen

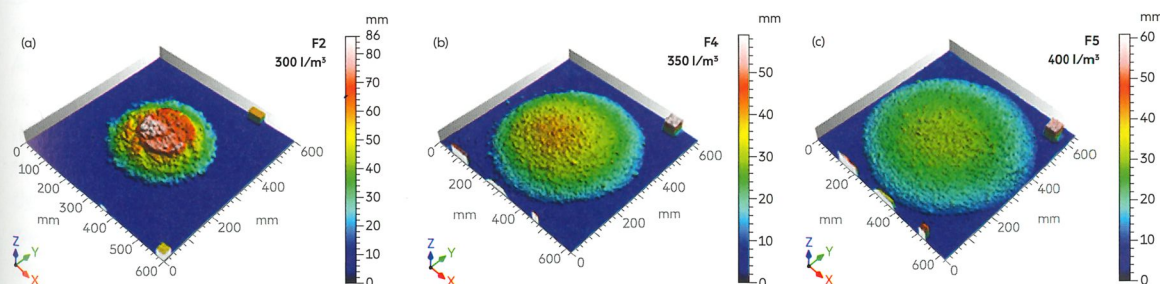


Bild 1. 3D-Oberflächenmodelle von ausgebreiteten Frischbetonen in Abhängigkeit des Ausbreitmaßes (F2 bis F5) – Veränderung der Konsistenz durch systematische Variation des Leimgehaltes von 300 l/m<sup>3</sup> (a), 350 l/m<sup>3</sup> (b) bis 400 l/m<sup>3</sup> (c) (Betonzusammensetzungen: w/z = 0,50; GK = 16 mm; Sieblinie A/B; kein Fließmittel)

Bild 2 zeigt das mittels optischer Methoden ermittelte Ausbreitmaß im Vergleich zum händisch ermittelten Wert. Hierbei wird eine sehr gute Übereinstimmung deutlich, wobei der digital ermittelte Wert für das Ausbreitmaß derzeit geringfügig größere Werte liefert. Die Autoren sehen ein großes Potenzial in der Anwendung neuer Bildauswertelgorithmen, um die Genauigkeit weiter zu verbessern.

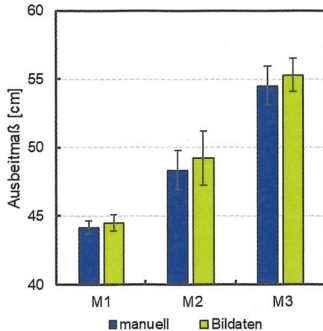


Bild 2. Ausbreitmaß für drei unterschiedliche Betone zum einen durch händische Messung gemäß DIN EN 12350-5:2019-09 ermittelt und zum anderen aus Bilddaten des identischen Ausbreitkuchens abgeleitet

Um weitergehende Informationen z. B. zur Betonzusammensetzung aus den Bildaufnahmen abzuleiten, wurde die Eignung von Kenngrößen zur Beschreibung der Oberflächengestalt bzw. -textur des Ausbreitkuchens untersucht. Als geeigneter 3D-Oberflächenkennwert zur Bewertung der Konsistenz aber auch des Leimgehaltes konnte anhand einer Streudiagramm-Matrix (Auswertung von insgesamt 33 Kennwerten) der funktionsorientierte Kennwert  $V_{mc}$  gemäß DIN EN ISO 25178-2:2012-09 identifiziert werden. Bild 3 zeigt  $V_{mc}$  als Funktion der Konsistenz im Alter von 10 min nach Wasserzugabe für alle untersuchten Betonzusammensetzungen. Beide Eigenschaften scheinen danach in einer nicht-linearen Wechselwirkung zu stehen. Mit abnehmender Konsistenz ist ein exponentieller Anstieg des Oberflächenkennwertes  $V_{mc}$  feststellbar.

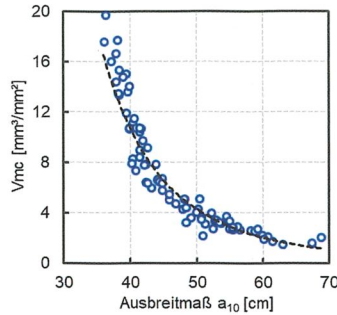


Bild 3. Oberflächenkennwert  $V_{mc}$  in Abhängigkeit der Konsistenz  $a_{10}$

Da die Konsistenz u. a. maßgeblich vom Leimgehalt bestimmt wird, ist in Bild 4 der Zusammenhang zwischen dem Leimgehalt und  $V_{mc}$  dargestellt. Bei konstantem w/z-Wert kann eine deutliche Abnahme von  $V_{mc}$  mit zunehmendem Leimgehalt festgestellt werden. Diese Veränderung ist dabei vom Größtkorn der verwendeten Gesteinskörnung abhängig. Eine Veränderung des w/z-Wertes führt beim hier gewählten Mischungsansatz zu einer Veränderung des Leimgehaltes und dementsprechend zu einer Veränderung von  $V_{mc}$ .

Der Einsatz verflüssigender Zusatzmittel äußert sich in einer Steigerung der Konsistenz bei gleichbleibendem Leimgehalt. Da der Oberflächenkennwert  $V_{mc}$  stark von der Konsistenz abhängig ist (vgl. Bild 2), kann durch den Einsatz von Fließmittel (FM) eine deutliche Abnahme von  $V_{mc}$  gegenüber der Betonzusammensetzung ohne FM bei identischem Leimgehalt festgestellt werden, s. Bild 4.

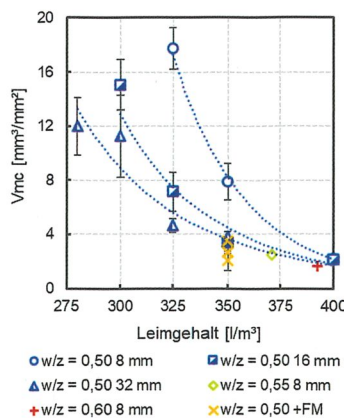


Bild 4: Mittlerer Oberflächenkennwert  $V_{mc}$  in Abhängigkeit des Leimgehaltes – systematische Variation des Leimgehaltes durch Veränderung des w/z-Wertes, Einsatz von verflüssigendem Zusatzmittel und Variation des Größtkorns der Gesteinskörnung bei gleicher Sieblinien-Charakteristik (A/B)

In Ergänzung zu den obigen Experimenten wurde untersucht, ob es mittels optischer Methoden möglich ist, dass Blutverhalten des Betons zu ermitteln bzw. in Form einer ‚Schnellprüfung‘ vorherzusagen. Hierzu wurde die Reflektivität von Mörteloberflächen 15 min nach Wasserzugabe ermittelt und mit der maximalen Blutwassermenge – ermittelt in Anlehnung an das DBV-Merkblatt „Besondere Verfahren zur Prüfung von Frischbeton“ Fassung Juni 2007 – verglichen. Bild 5 zeigt, dass es mit diesem Verfahren gelingt, das Langzeitblutverhalten potenziell vorherzusagen. Für eine dezidierte Bewertung sind jedoch weitergehende Untersuchungen notwendig.

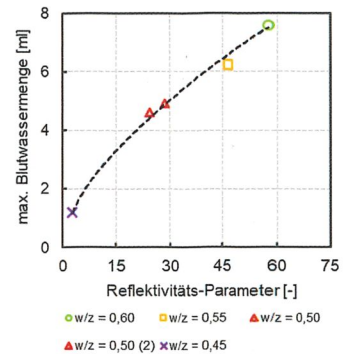


Bild 5. Oberflächenreflektivität von Mörteloberflächen 15 min nach Wasserzugabe in Relation zur kumulierten Blutwassermenge nach 24 h Blutdauer ermittelt mittels modifiziertem Eimerverfahren in Anlehnung an das DBV-Merkblatt „Besondere Verfahren zur Prüfung von Frischbeton“ Fassung Juni 2007

## Zusammenfassung

Zielsetzung des Projekts war es, in Form einer Machbarkeitsstudie zu prüfen, inwieweit aus Bilddaten eines frischen Ausbreitkuchens Informationen über die Betonzusammensetzung und Eigenschaften wie beispielsweise das Größtkorn, den w/z-Wert oder das Bluthverhalten ermittelt werden können. Hierzu wurde zunächst untersucht, mit welchen Kameras und Methoden entsprechende Bilder aufgenommen werden müssen, um eine möglichst gute Datengrundlage zu schaffen. In einem nächsten Schritt wurde der Einsatz photogrammetrischer und Computer Vision-basierter Techniken erprobt, mittels derer die komplexen Bilddaten auf einfache Kenngrößen zurückgeführt werden konnten.

Im Rahmen eines umfangreichen experimentellen Versuchsprogramms konnte gezeigt werden, dass die Veränderung der Betonzusammensetzung zu einer systematischen Veränderung der bildoptisch ermittelten Kennwerte wie beispielsweise Rauheits- oder Reflektivitätskennwerte führt. Die Untersuchungsergebnisse des Forschungsvorhabens lassen erkennen, dass photogrammetrische Methoden sowie Computer Vision zur Erfassung und Auswertung von Merkmalen des Frischbetons geeignet sind und in Kennwerte zur Eigenschaftsbewertung überführt werden können. So scheint es möglich, die gegenwärtig stark subjektiv geprägte Identitäts- bzw. Annahmeprüfung auf der Baustelle in eine quantitative Bewertung relevanter (Frisch-)Betoneigenschaften zu überführen. Einen entscheidenden Vorteil stellt dabei die digitale Erfassung der Kennwerte und der Eigenschaftsbewertung dar, da demzufolge eine direkte Einbindung festgestellter Qualitätsabweichungen in den Produktionszyklus möglich wird.

## Danksagung

Die Forschungseinrichtungen bedanken sich beim DBV für die Förderung des Forschungsvorhabens sowie beim Projektausschuss für die Unterstützung.

### Durchführende Forschungseinrichtungen

Leibniz Universität Hannover,  
Institut für Baustoffe  
Leibniz Universität Hannover,  
Institut für Photogrammetrie  
und GeoInformation

### Projektleiter

Prof. Dr.-Ing. Michael Haist  
Prof. Dr.-Ing. Christian Heipke

### Sachbearbeiter

Tobias Schack M. Sc.

### Zeitraum

Februar 2020 bis Januar 2022



**Ansprechpartnerin  
im DBV:**

**Dr.-Ing.  
Katja Voland**  
T 030 236096-25  
voland@betonverein.de