

Carbonbeton für die Herstellung, Instandsetzung und Verstärkung von Betonbauwerken

1 Einleitung

Die aktuelle Situation im Bauwesen ist geprägt von Bauwerksabrissen und material-, energie- und emissionsintensiven Neubauten. Um die gesetzten Klimaziele dennoch zu erreichen, ist hier ein Umdenken erforderlich. Gefragt sind innovative Lösungs- und Optimierungsansätze und der Einsatz nachhaltiger Bau- und Sanierungsmaterialien für die gegebenen Problematiken der Branche.



Abbildung 1: Korrosionsschäden an Stahlbetonbauwerk (Foto: CARBOCON GMBH)

Insbesondere bei der Stahlbetonbauweise zeigten sich in den vergangenen Jahrzehnten erhebliche Schwachstellen: Die metallische Bewehrung ist korrosionsanfällig und wird daher mit einer dicken Betondeckung kombiniert. Dies führt zu einem großen Verbrauch mineralischer Rohstoffe und zu erheblichen CO₂-Emissionen. Gleichzeitig können Risse im Beton den Schutz der Stahlbewehrung mindern und zur Korrosion des Stahls führen. Bei mangelnden Unterhaltungs- und Instandsetzungsmaßnahmen führt dies oftmals zum Abriss des Bauwerkes.

Als Alternative zum Stahlbeton erfolgen seit ca. 30 Jahren Forschungs- und Entwicklungsarbeiten an nicht-metallischen Bewehrungen. Ein Ergebnis dieser Forschung ist unter anderem der Einsatz von Carbonbeton, welcher im

Laufe der Jahre erfolgreich aus dem Forschungskontext zu einem wirtschaftlichen Einsatz in der Praxis überführt wurde.

Carbonbeton lässt sich sowohl im Neubaubereich als auch bei der Sanierung und Verstärkung von Bestandsbauwerken anwenden. Im Neubaubereich wurden bereits Pavillons, Parkhäuser, Fassaden, Brücken und mit dem „CUBE“ sogar ein ganzes Gebäude aus Carbonbeton gefertigt [1].

Darüber hinaus bietet das Anwendungsfeld der Verstärkung, Sanierung und Instandsetzung sehr große Potentiale. Mit dem bauaufsichtlich zugelassenen CARBorefit®-Verfahren [2] sind hier bereits erste baurechtliche Grundlagen für die Anwendung vorhanden. Ziel der Verstärkung mit CARBorefit® ist der großflächige Bauwerkserhalt, um knappen Wohnraum und kritische Infrastruktur zu bewahren sowie Bauwerke von gesellschaftlichem Wert zu erhalten und deren Abriss zu verhindern.

2 Carbonbeton für die Verstärkung und Instandsetzung

Es existiert ein umfangreicher Bestand an Bauwerken aus Stahlbeton – von Wohngebäuden über Brücken bis hin zu Kulturdenkmälern –, deren ursprüngliche Tragfähigkeit hergestellt, deren aktueller Zustand bewahrt oder der aufgrund strategischer Umnutzung zusätzlich verstärkt werden soll. In allen Fällen kann Carbonbeton Einsatz finden, um die beschriebenen Zielstellungen zu erfüllen.

Carbonbeton ist ein Baustoff, der aus einer nicht-metallischen Carbonbewehrung und einem Beton besteht. Einwirkende Zugkräfte werden dabei von der Carbonbewehrung aufgenommen, während der Beton den Verbund zum Bestandsbauwerk sicherstellt [3].

Die Bewehrungsherstellung erfolgt ausgehend von Carbonfilamentgarnen, welche im Zuge eines textilen Flächenbildungsprozesses zu 2-dimensionalen Gitterstrukturen verarbeitet werden (siehe Abbildung 2). Durch eine aufgetragene Tränkung (polymere Beschichtung) werden eine Formstabilität der Gitter sowie ein verbesserter Verbund – sowohl zwischen den einzelnen Fasern innerhalb des Garns als auch zum Beton – gewährleistet. In Kombination mit einem Beton entsteht ein effizienter Verbundwerkstoff, welcher den Hochleistungsanforderungen für Bauanwendungen in Sachen Festigkeit und Dauerhaftigkeit gerecht wird [3].



Abbildung 2: links und Mitte: Herstellung der Carbonbewehrung (Fotos: TU Dresden); rechts: verschiedene Carbonbewehrungen (Foto: C³ e.V.)

2.1 Baurechtliche Grundlage – die CARBOrefit®-Zulassung

Für eine praktische Anwendung von Carbonbeton bei statisch relevanten Baumaßnahmen ist eine baurechtliche Regelung erforderlich. Während in der Vergangenheit Anwendungen immer mit einer Zustimmung im Einzelfall verbunden waren, liegt mit der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung (abZ) / allgemeinen Bauartgenehmigung (aBG) Z31.10-182 „CARBOrefit®“ [2] für das Verstärken mit Carbonbeton eine baubehördliche Regulierung durch das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) vor. Somit steht den Planern mit CARBOrefit® ein anerkanntes Verfahren zur Verfügung, mit dem effiziente, wirtschaftliche und nachhaltige Lösungen zur Erhaltung des Bestands realisiert werden können. Bei der Instandsetzung mit CARBOrefit® kann sowohl die Tragfähigkeit als auch die Dauerhaftigkeit von Stahlbetonbauwerken erhöht werden.

Um die Weiterentwicklung der Zulassung voranzubringen, hat sich das CARBOrefit®-Konsortium gegründet. Dabei handelt es sich um eine Interessensgemeinschaft aus 11 Unternehmen, welche aus planenden Ingenieuren, Carbonfilament- und Bauchemieproduzenten, Carbonbewehrungsherstellern und -fertigern sowie Betonproduzenten besteht.

Da die Konsortialpartner verschiedene Gittertypen bereitstellen, kann der jeweilige Planer das geeignetste Gitter für das Projekt auswählen, um eine effiziente Lösung anzubieten. Hilfestellung bietet die CARBOrefit®-Implementierung in das FRILO-Programm „B2 Stahlbetonbemessung“, welches Planern und Ingenieuren neuerdings eine softwarebasierte Berechnung und Bemessung von Stahlbetonplatten mit Carbonbetonverstärkung ermöglicht. Dies bietet einen klaren Mehrwert für eine großflächige Anwendung des Verfahrens.

Zudem wird durch die zulassungsspezifische Schulung und Zertifizierung von ausführenden Unternehmen auch die Qualität bei der Umsetzung der Verstärkungsmaßnahmen gewährleistet. In Summe kann jedes CARBOrefit®-Projekt, ausgehend von der Planung und Bemessung, über die Produktion der einzelnen Carbonbetonkomponenten bis hin zur Ausführung und Anwendung, in enger Zusammenarbeit mit allen Beteiligten hochqualitativ und effizient umgesetzt werden.

2.2 Ausführung einer Carbonbetonverstärkung

Die Ausführung von CARBOrefit®-Projekten erfolgt durch qualifizierte Unternehmen, welche ihre Eignung durch die Teilnahme an einer Schulung und eine erfolgreiche Zertifizierung nachweisen müssen. Dies erfordert das Bestehen einer Prüfung, welche sowohl theoretische Kenntnisse als auch das technische Know-how abprüft. Dieses Vorgehen dient der Qualitätssicherung der ausgeführten Maßnahmen und wird durch das DIBt vorgegeben. Nach erfolgreicher Erlangung des Eignungsnachweises können Verstärkungen entsprechend der CARBOrefit®-Zulassung ausgeführt werden. [4]

Abbildung 3 zeigt den grundlegenden Aufbau der Verstärkung eines Stahlbetonbauteils entsprechend des CARBOREFIT®-Verfahrens. Auf der aufgerauten Oberfläche eines sanierungsbedürftigen stahlbewehrten Altbetons, wird eine erste Feinbetonschicht, dann ein Carbongitter und anschließend eine weitere Schicht Feinbeton aufgetragen. Dieses Vorgehen wird wiederholt, bis die zuvor berechnete, statisch erforderliche Lagenanzahl erreicht ist.

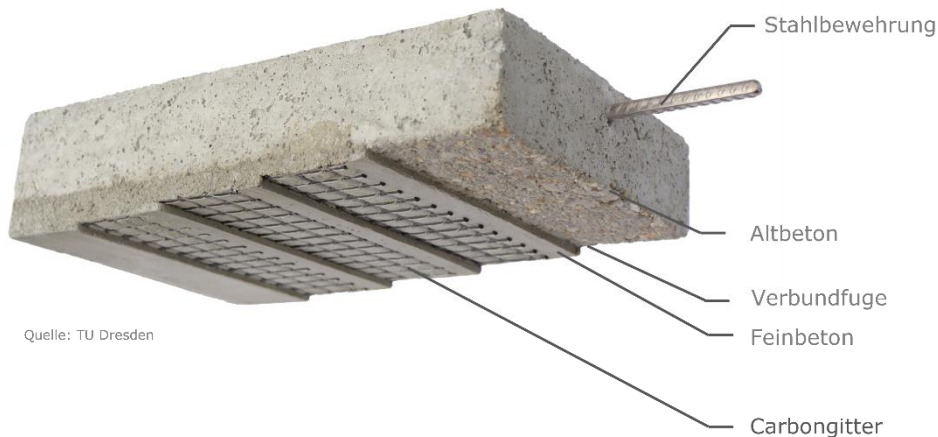


Abbildung 3: Verstärkung eines Stahlbetonbestandes mit Carbonbeton (Grafik: TU Dresden)

Der Arbeitsablauf einer Verstärkungsmaßnahme beinhaltet dabei typischerweise die folgenden 10 Schritte:

1. Baustelleneinrichtung und Bereitstellung des Materials
2. Vorbereitung der Oberfläche durch Sandstrahlen
3. Bei Bedarf: Instandsetzen des Altbetonuntergrundes
4. Vorbereiten des Gitters
5. Vornässen der Oberfläche und Anmischen des Feinbetons
6. Spritzen des Feinbetons (lagenweise)
7. Einarbeiten der Gitter
8. Spritzen der Abschlusschicht
9. Nachbehandlung
10. Laufende Überprüfung im Rahmen der Eigen- und Fremdüberwachung

Durch den Einsatz des Verfahrens können zahlreiche Vorteile erzielt werden, die im Folgenden zusammengefasst werden.

2.3 Vorteile des Carbonbetons im Bereich der Sanierung

2.3.1 Ökologie – korrosionsbeständig, dauerhaft, ressourcensparend

Carbon ist ein nicht-metallisches Material, das sich aufgrund seiner Korrosionsbeständigkeit durch Dauerhaftigkeit und Langlebigkeit auszeichnet. Zudem ist die für metallische Bewehrungen typische schützende Mindestbetondeckung von mehreren Zentimetern aufgrund der Korrosionsbeständigkeit nicht erforderlich, sodass die Carbonbetonverstärkung sehr dünn ausführbar ist. Um die Schichtstärken zu minimieren, wird als Beton bei der Verstärkung ein Feinbeton mit nur 1 mm Größtkorn eingesetzt, sodass Schichtstärken von nur wenigen Millimetern erzielt werden können. Die damit erreichbare Reduktion des Betoneinsatzes geht unter anderem mit einem geringeren Ausstoß an CO₂-Emissionen einher.

Abbildung 4 zeigt beispielhaft eine herkömmliche Spritzbetonverstärkung im Vergleich zu einer Carbonbetonverstärkung. Der Unterschied ist deutlich erkennbar: Einer ca. 7 cm dicken Spritzbetonverstärkung steht eine ca. 1 cm dünne Carbonbetonverstärkung entgegen. Der Carbonbeton

zeichnet sich somit durch eine hohe Materialeffizienz und ein geringes Eigengewicht aus, ist ressourcensparend und bringt somit ökologische Vorteile mit sich.



Abbildung 4: Vergleich einer konventionellen Verstärkung mit einer Carbonbeton-Verstärkung (Grafik: TU Dresden)

2.3.2 Ökonomie – leicht, hochfest, wirtschaftlich

Die Carbonbewehrung zeichnet sich durch eine geringe Dichte und damit einhergehend mit einem ca. 4-fachen Gewichtsvorteil im Vergleich zu Stahl aus. Gleichzeitig besitzt Carbon eine deutlich höhere Zugfestigkeit und erzielt somit eine ca. 6-fache Tragfähigkeit. Daher sind deutlich geringere Bewehrungsquerschnitte erforderlich. Auch aufgrund des geringen Gewichtes der Bewehrung bietet eine Carbonbetonanwendung ökonomische Vorteile durch eine schnelle und einfache Handhabbarkeit, eine Umsetzbarkeit mit konventionellen Geräten und Einsparungspotentialen in der Logistik. Zudem stellen das Vermeiden von Abriss und Neubau sowie die in 2.3.1 beschriebene Langlebigkeit des Materials ökonomische Mehrwerte dar.

Insgesamt zeigt sich, dass selbst ein höherer Materialpreis pro Flächeneinheit durch Vorteile bei Gewicht, Leistungsfähigkeit, eingesetzter Materialmenge und Dauerhaftigkeit relativiert werden kann. Projekte mit Carbonbetonverstärkungen erzielen daher einen hohen wirtschaftlichen Nutzen!

2.3.3 Soziales – minimalinvasiv, denkmalershaltend, einfach umsetzbar

Neben den ökonomischen und ökologischen Vorteilen lassen sich auch soziokulturelle Vorteile durch den Einsatz von Carbonbetonverstärkungen ableiten. Aufgrund der dünnen und somit auch leichten Ausführung können die Sanierungsobjekte minimalinvasiv instandgesetzt werden. Auf diese Weise lässt sich das äußere Erscheinungsbild des Bauwerkes bewahren. Darüber hinaus kann bei Carbonbetonverstärkungen auf eine Verdübelung verzichtet werden, sodass das Verfahren sehr bestandsschonend und denkmalershaltend umgesetzt werden kann. Auch das Bewahren von knappem Wohnraum stellt einen Mehrwert dar. Insgesamt werden somit Bauwerke von gesellschaftlichem und kulturellem Wert erhalten.

Des Weiteren ist das Verfahren einfach und schnell anwendbar. Beim Anbringen der Carbonbetonverstärkung am Bauwerk können aufgrund des geringeren Gewichtes der Bewehrung beispielsweise Überkopfarbeiten deutlich einfacher ausgeführt werden, sodass eine Benutzerfreundlichkeit und eine geringere körperliche Belastung für die Anwender resultiert.

2.3.4 Fazit zur Nachhaltigkeit

Insgesamt zeigt sich, dass in den drei Dimensionen der Nachhaltigkeit – Ökologie, Ökonomie und Soziales – durch den Einsatz von Carbonbetonverstärkungen große Potentiale vorhanden sind. Diese werden auch schon in der Praxis sichtbar: Eine Analyse anhand der realen Verstärkungsmaßnahme an der Hyparschale in Magdeburg zeigte, dass mit dem Einsatz von Carbonbeton nicht nur ein abrisgefährdetes und denkmalgeschütztes Wahrzeichen der Stadt erhalten werden konnte, sondern auch ein Beitrag zum

nachhaltigen Bauen geleistet wurde. Im Vergleich zum konventionellen Spritzbeton konnten durch die filigrane Ausführung mit Carbonbeton das Erscheinungsbild bewahrt und 85 % Ressourcen sowie über 50 % an CO₂-Emissionen eingespart werden. [5]

Bei einem Vergleich mit einem Abriss und Neubau würden die ökologischen sowie auch die ökonomischen und soziokulturellen Vorteile sogar noch deutlicher werden.

3 Anwendungsbeispiele

Die beschriebenen Potentiale führen dazu, dass die Carbonbetonverstärkung bereits in zahlreichen Praxisprojekten Anwendung findet. Eine Auswahl ausgeführter Anwendungsbeispiele wird im Folgenden dargestellt und zeigt, dass das Verfahren für Sanierungen sowohl im Hochbau- als auch im Brückenbereich geeignet ist.

Abbildung 5 und 6 zeigen zwei Stahlbetonschalenbauwerke die bereits weit vor der Einführung der CARBOREfit®-Zulassung mit Carbonbeton umgesetzt wurden: Die Stahlbeton-Hyparschale der Fachhochschule Schweinfurt erforderte aufgrund von Verformungen durch Spannungsüberschreitungen eine nachträgliche Verstärkung, die mit einer 15 mm dünnen Textilbetonschicht ausgeführt wurde [6]. Die Tonnenschale in Zwickau wurde aufgrund einer Umnutzung des Gebäudes mit bis zu 7 Lagen Carbonbetongittern statisch verstärkt. Dabei konnte das historische Erscheinungsbild der bogenförmigen Unterzüge bewahrt werden. [6] [7]

Die Abbildungen 7 bis 10 beinhalten 4 beispielhafte Projekte, welche in Anlehnung an die CARBOREfit®-Zulassung durchgeführt wurden: Mit der Sanierung der Hyparschale in Magdeburg (Abbildung 7) konnte die Dachkonstruktion, bestehend aus vier hyperbolischen Paraboloid-Schalen, mit jeweils 10 mm Carbonbeton an der Ober- und Unterseite verstärkt werden [3] [5] [6]. Auch im Beyer-Bau (Abbildung 8) – einem Gebäude auf dem Campus der Technischen Universität Dresden – werden aktuell ausgewählte Deckenflächen und Unterzügen verstärkt, um das historische Bauwerk zu erhalten [3].

Auch im Bereich der Brücken eignet sich Carbonbeton für die Instandsetzung. Dies zeigt sich zum einen bei der Sanierung der denkmalgeschützten, historischen Fußgängerbrücke über den Stadtgraben zur Thainburg in Naumburg (Saale) (Abbildung 9). Die ursprünglich aus Eisenbeton hergestellte Brücke konnte mit 6 bis 9 mm Carbonbeton am Brückenbogen statisch ertüchtigt werden [8]. Zum anderen konnte durch eine Carbonbetonverstärkung die Autobahnbrücke der A648 über den Fluss Nidda (Abbildung 10) erhalten werden, die mit einer 5- bis 6-lagigen Ausführung saniert wurde [3].



Abbildung 5: Schalenträgerwerk FH Schweinfurt (Foto: TU Dresden)

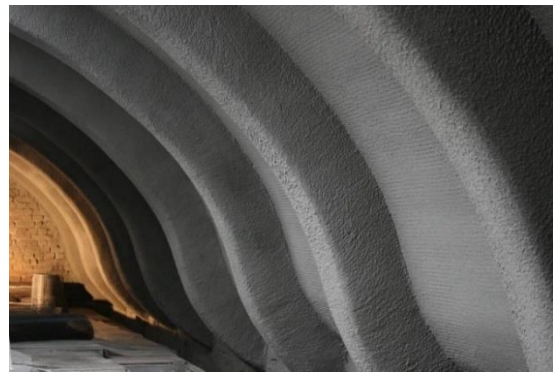


Abbildung 6: Tonnenschale in Zwickau (Foto: TU Dresden)



Abbildung 7: Hyparschale in Magdeburg (Foto: Marcus Bredt)



Abbildung 8: Beyer-Bau in Dresden (Foto: CARBOCON GMBH)



Abbildung 9: Brücke zur Thainburg in Naumburg (Saale) (Foto: CARBOCON GMBH)



Abbildung 10: Autobahnbrücke A648 über die Nidda (Foto: CARBOCON GMBH)

Die Referenzbeispiele zeigen: Die Anwendbarkeit von CARBorefit®-Carbonbetonverstärkungen ist in verschiedenen Kontexten nachgewiesen. Die Bauweise weist auch einen wirtschaftlichen Mehrwert auf, sodass enorme Potentiale zur Erhaltung von Bestandsbauwerken entstehen.

Literatur

- [1] CUBE. Neues Bauen mit Carbonbeton. New Building with Carbon Concrete. Hrsg.: Curbach, M., Wasmuth & Zohlen, 2022.
- [2] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung / Allgemeine Bauartgenehmigung Z-31.10-182 „CARBorefit®-Verfahren zur Verstärkung von Stahlbeton mit Carbonbeton“, Deutsches Institut für Bautechnik, 2021.
- [3] Curbach, M. et al. Verstärken mit Carbonbeton in: *Betonkalender 2022. Nachhaltigkeit, Digitalisierung, Instandhaltung*. Hrsg.: Bergmeister, K.; Fingerloss, F.; Wörner, J., Ernst & Sohn, 2022.
- [4] Grundsätze für den Eignungsnachweis zur Ausführung von Arbeiten zur Verstärkung von Betonbauteilen mit Carbonbeton mit Bausätzen nach den gültigen allgemeinen Bauartgenehmigungen, Deutsches Institut für Bautechnik, 2022. https://www.dibt.de/fileadmin/dibt-website/Dokumente/Referat/I4/Grundsaeetze_Eignungsnachweis_Carbonbeton.pdf
- [5] Schumann, A. et al. Ressourceneinsparung mit Carbonbeton. Am Beispiel der Verstärkung der Hyparschale in Magdeburg in: *Nachhaltigkeit, Ressourceneffizienz und Klimaschutz. Konstruktive Lösungen für das Planen und Bauen. Aktueller Stand der Technik*. Hrsg.: Hauke, B., Institut Bauen und Umwelt e.V., DGNB e.V., Eds., Ernst & Sohn, 2021.
- [6] Lieboldt, M. Praktische Anwendung. Verstärkung und Instandsetzung in: *Handbuch Carbonbeton. Einsatz nichtmetallischer Bewehrung*. Hrsg.: Curbach, M.; Hegger, J.; Schladitz, F.; Tietze, M.; Lieboldt, M., Ernst & Sohn, 2023.
- [7] Schladitz, F. et al. Verstärkung einer denkmalgeschätzten Tonnenschale mit Textilbeton in: *Beton- und Stahlbetonbau 104 (7)*, 432–437, 2009. <https://doi.org/10.1002/best.200908241>
- [8] Krauß, L. et al. Innovatives Verfahren CARBorefit® zur Verstärkung von Bauwerken mit Carbonbeton in: *nbau 1 (2022), Heft 1*, Ernst & Sohn, 2022.