

Zusammenfassung der Promotionsschrift

**Computermodellierung des Bruchverhaltens und Entwurf von  
kapselungsbasiertem selbstheilendem Beton mit  
XFEM und Kohäsionsflächenverfahren**

**“Computational Fracture Modeling and Design of  
Encapsulation-Based Self-Healing Concrete Using  
XFEM and Cohesive Surface Technique”**

zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

an der Fakultät Bauingenieurwesen  
der Bauhaus-Universität Weimar

vorgelegt von

**M.Sc. John Nabil Mikhail Hanna**

(interner Doktorand)

Geboren am 27. November 1983 in Fayoum, Ägypten

Mentor

Prof. Dr.-Ing. Timon Rabczuk

Weimar, Januar 2022

---

## Problemstellung und Zielsetzung der Arbeit

1. Beton ist das weltweit am meisten verwendete Baumaterial. Sein Schwachpunkt ist jedoch, dass er im Laufe der Zeit Risse bekommt und sich seine Dauerhaftigkeit verschlechtert. Die Renovierung der aus ihm errichteten Gebäude ist sehr kostspielig, insbesondere bei der Instandhaltung der Infrastruktur, die nicht leicht zugänglich ist.
2. Selbstheilender Beton (selbstreparierender Beton) auf der Grundlage von Kapselungen hat in letzter Zeit großes Interesse gefunden, da er in der Lage ist, Risse ohne menschliches Eingreifen zu heilen (reparieren), die Lebensdauer zu verlängern und die Instandhaltungskosten zu senken. Wenn die sich ausbreitenden Risse auf die Mikrokapseln treffen, setzen diese die rissheilende Substanz frei, um die Risse zu schließen.
3. In der Literatur wurden mehrere experimentelle Studien durchgeführt, um das Bruchverhalten und die Heilungsfähigkeit der Kapseln zu untersuchen. Diese Studien haben ergeben, dass die Verbindung zwischen der Kapselschale und der Zementmatrix nicht immer perfekt ist.
4. Die Computermodellierung von selbstheilendem Beton befindet sich noch in einem frühen Stadium. In den meisten Fällen wurde der Ansatz der kohäsiven Elemente mit einer Null-Dicke verwendet. Dieser Ansatz ist allerdings empfindlich gegenüber der zugrundeliegenden Diskretisierung.
5. Das Ziel dieser Arbeit ist durch Computermodellierung das Bruchverhalten von kapselbasiertem selbstheilendem Beton mit Hilfe der erweiterten Finite-Elemente-Methode „eXtended Finite Element Method (XFEM)“- und Kohäsionsflächenverfahren zu untersuchen. XFEM ist eine der vielversprechendsten und genauesten Methoden für die Modellierung von Materialversagen, da sie die Rissausbreitung ohne Neuvernetzung ermöglicht. Außerdem sollen die physikalischen Phänomene untersucht werden, die experimentell nur schwer zu untersuchen sind, wie zum Beispiel:
  - a. Untersuchung der Heilungseffizienz von selbstheilendem Beton in Bezug auf die Belastbarkeit von geheilten Probekörpern. Untersuchung der Auswirkungen von teilweise verheilten Rissen und der Grenzflächenverbindung zwischen dem Beton und der verfestigten rissheilenden Substanz auf die gesamte Heilungseffizienz.
  - b. Untersuchung der Wechselwirkung zwischen der Mikrokapsel und dem Beton, um die Faktoren zu ermitteln, die zum Bruch und zur Ablösung der Mikrokapsel von der Betonmatrix führen, auch in Abhängigkeit von der Mikrokapselgröße.
  - c. Durchführung einer Vergleichsstudie zwischen den mit den vorgeschlagenen Modellierungstechniken erzielten Ergebnissen und dem in der Literatur am häufigsten verwendeten Modellierungsansatz, um die Genauigkeit der vorgeschlagenen Modellierung zu quantifizieren.
  - d. Entwicklung eines Modellierungsansatzes zur Untersuchung der Auswirkungen von Kapselclustern auf den Bruchprozess von kapselbasiertem selbstheilendem Beton.
  - e. Erweiterung der vorgeschlagenen Modellierung auf 3D-Simulationen, um die weniger rechenaufwändigen 2D-Simulationen zu untersuchen und zu validieren.
  - f. Entwicklung einer Entwurfsmethode für Mikrokapseln, um deren Größe unter Berücksichtigung eines ausreichenden Volumens der rissheilenden Substanz zur Heilung einer spezifischen Rissbreite zu bestimmen.

## Stand der Wissenschaft

6. Es gibt viele Strategien und Techniken für selbstheilenden Beton, die auf unterschiedliche Weise klassifiziert werden können. Allerdings basieren alle auf nur zwei Hauptkonzepten der Selbstheilung, nämlich der autogenen und der autonomen

- Selbstheilung. Bei der autogenen Selbstheilung wird die rissheilende Substanz direkt mit anderen Betonbestandteilen vermischt, und die Heilung erfolgt generisch.
7. Bei der autonomen Selbstheilung wird die Selbstheilungsfunktion durch die Einbettung von selbstheilenden Einheiten, z.B. Kapseln, die rissheilende Substanzen enthalten, erreicht. Man spricht hier von kapselungsbasiertem selbstheilendem Beton. Die rissheilende Substanz wird freigesetzt, sobald die Kapseln brechen. Die Heilung erfolgt dann in der Nähe der beschädigten Stelle. Die Heilung ist im Vergleich zur allgemeinen autogenen Heilung stärker lokalisiert. Die hier vorgeschlagene Modellierung konzentriert sich auf diesen Betonheilungstyp, da es sich um die vielversprechendste Methode handelt.
  8. International wurden mehrere experimentelle Studien zu diesem Thema durchgeführt. Diese Studien haben gezeigt, dass die Effizienz der Heilung vom Bruch der Mikrokapseln und der Freisetzung der rissheilenden Substanz abhängt, um die Risse zu heilen. In der Literatur wurde bei der Computermodellierung des Bruchverhaltens meist der Ansatz der kohäsiven Elemente mit einer Null-Dicke verwendet, welche allerdings zu netzabhängigen Ergebnissen führt.
  9. Die erweiterte Finite-Elemente-Methode „eXtended Finite Element Method (XFEM)“ ist eine vielversprechende, flexible und leistungsstarke diskrete Rissmethode, die eine Rissausbreitung ohne Neuvernetzung ermöglicht. Die XFEM hat bereits sehr gute Ergebnisse bei der Modellierung von Rissen in Beton aufgrund der sog. Anreicherung gezeigt. In der Literatur gibt es nur wenige Studien zur Genauigkeit der Computermodellierung der Fraktur bei selbstheilendem Beton. Darüber hinaus gibt es keine Studien zu den Auswirkungen von Kapselclustern. Auch gibt es kaum Methoden für den Entwurf von Mikrokapseln unter Berücksichtigung der Menge der rissheilenden Substanz, die zur Heilung der erwarteten Rissbreite erforderlich ist.

### **Eingesetzte Methoden**

10. Die vorgeschlagenen Computermodellierungen wurden in der kommerziellen Software Abaqus entwickelt. Der vorgeschlagene Bruchmodellierungsansatz zur Untersuchung der Heilungseffizienz von 2D-Proben selbstheilenden Betons besteht aus zwei Teilen; aus Beton und der verfestigten rissheilenden Substanz. Im Fall, dass sich der Riss nur innerhalb der verfestigten rissheilenden Substanz ausbreitet, wird die Betonmatrix mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) modelliert. Die verfestigte rissheilende Substanz wird mit der erweiterten Finite-Elemente-Methode (XFEM) modelliert und durch Bindungsbeschränkungen miteinander verbunden. Um zu untersuchen, wo der Riss entsteht, werden sowohl die Betonmatrix als auch die verfestigte rissheilende Substanz, mit der XFEM modelliert und durch die Kohäsionsflächenverfahren miteinander verbunden.
11. In dem vorgeschlagenen Modellierungsansatz zur Untersuchung des Bruchs des kapselbasierten selbstheilenden Betons werden 2D-Proben bestehend aus zwei Teilen, einer Betonmatrix und einer Mikrokapselschale, eingesetzt. Beide werden durch das XFEM modelliert und durch die Kohäsionsflächenverfahren miteinander kombiniert.
12. Der zuvor vorgeschlagene Ansatz zur Bruchmodellierung wurde entwickelt, um die Auswirkung der Kapselcluster durch Variation der Kontaktfläche zwischen der Mikrokapsel und dem Beton zu untersuchen.
13. Die vorgeschlagenen Mikrokapsel-Bruchmodellierungen werden auf 3D-Simulationen erweitert. Außerdem werden die erzielten Ergebnisse mit den Ergebnissen von 2D-Simulationen verglichen, um die 2D-Simulationen zu validieren und den Genauigkeitsunterschied zwischen 2D- und 3D-Simulationen abzuschätzen.
14. Es wurde eine neue Entwurfsmethode entwickelt, um die Größe der Mikrokapseln unter Berücksichtigung eines ausreichenden Volumens der rissheilenden Substanz

zur Heilung einer bestimmten Rissbreite zu entwerfen. Sie basiert auf der Konfiguration der Einheitszelle, dem repräsentativen Volumenelement (RVE), periodischen Randbedingungen und deren Verknüpfungen mit dem Volumenanteil sowie der Rissbreite als Variablen. Außerdem wurden Computersimulationen des vorgeschlagenen Mikrokapselentwurfs mit unterschiedlichen Volumenanteilen durchgeführt und validiert.

### **Wesentliche erzielte Ergebnisse**

15. Die Länge des verheilten Risses und die Kohäsionseigenschaften von Grenzflächen zwischen der verfestigten rissheilenden Substanz und der Betonmatrix spielen eine wichtige Rolle für die Festigkeit der Probe und für das Rissbild. Die Risse entstehen nur dann in der Betonmatrix und breiten sich aus, wenn die Kohäsionseigenschaften von Grenzflächen zwischen 75 % und 100 % der Brucheigenschaften der verfestigten rissheilenden Substanz bei vollständig verheilten Risslänge liegen. Die verfestigte rissheilende Substanz löst sich jedoch von dem Beton, wenn sie weniger als 25 % betragen.
16. Das Kern-Schale-Verhältnis der Mikrokapseln und die Grenzflächenfestigkeit zwischen der Mikrokapselschale und der Betonmatrix haben einen großen Einfluss auf die maximale Tragfähigkeit der Proben, während die Grenzflächenbruchenergie keinen signifikanten Einfluss hat. Je höher der Wert der Grenzflächenfestigkeit, desto höher ist die maximale Tragfähigkeit der Proben. Andererseits führt auch ein geringeres Kern-Schale-Verhältnis der Mikrokapseln (größere Schalendicke) zu einer Erhöhung der maximalen Tragfähigkeit der Probe und umgekehrt.
17. Die Brucheigenschaften von Grenzflächen zwischen Mikrokapselschale und Betonmatrix sowie das Kern-Schale-Verhältnis der Mikrokapseln beeinflussen das Rissbild. Es wird nicht empfohlen, das Kern-Schale-Verhältnis der Mikrokapsel auf 1:1 zu setzen, da dies die größte Schalendicke, aber das kleinste Volumen der rissheilenden Substanz bedeutet. Denn die Ablösung der Mikrokapsel vom Beton erfolgt unabhängig von den Werten der Brucheigenschaften der Grenzflächen. Andernfalls, wenn die Brucheigenschaften von Grenzflächen weniger als 50 % der Brucheigenschaften des Betons betragen, erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, dass sich die Mikrokapsel ablöst.
18. Die vorgeschlagene Bruchmodellierung hat eine große Genauigkeit in Bezug auf die maximale Traglast und das Rissbild im Vergleich zum Ansatz der kohäsiven Elemente mit einer Null-Dicke gezeigt.
19. Die Kontaktlänge des Kapselumfangs hat einen großen Einfluss auf die Festigkeit der Proben und das Bruchbild. Je höher die Kontaktlänge des Kapselumfangs ist, desto größer ist die Festigkeit der Probe und umso höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Mikrokapsel bricht und umgekehrt.
20. Nach den Ergebnissen der 3D-Simulationen können 2D-Simulationen für die Modellierung des Bruchs selbstheilenden Betons mit Mikrokapseln ausreichen. Allerdings sollte die Festigkeit des aus 2D-Simulationen gewonnenen Probekörpers um 3,65 % erhöht werden, um fast die gleiche Genauigkeit wie bei einer 3D-Simulation zu erreichen.
21. Der Volumenanteil und die Brucheigenschaften von Grenzflächen zwischen Mikrokapselschale und Betonmatrix sind direkt proportional zur RVE-Probenkapazität des vorgeschlagenen Mikrokapselentwurfs. Im Gegensatz dazu ist das Kern-Schale-Verhältnis der Mikrokapseln umgekehrt proportional zur Probentragfähigkeit.
22. Der Volumenanteil und die Brucheigenschaften von Grenzflächen sowie das Kern-Schale-Verhältnis der Mikrokapsel wirken sich ebenfalls auf das Rissbild aus, da ein Anstieg dieser Werte die Wahrscheinlichkeit erhöht, dass die Mikrokapsel bricht.