

Schriftenreihe des Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau

Herausgeber:
Geschäftsführender Direktor des
Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau
Ruhr-Universität Bochum

Heft 2005-9

Detlef Kuhl

**Modellierung und Simulation von
Mehrfeldproblemen der Strukturmechanik**

Shaker Verlag
Aachen 2005

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Zugl.: Bochum, Univ., Habil.-Schr., 2004

Copyright Shaker Verlag 2005

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-4632-0

ISSN 1614-4384

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

Zusammenfassung

Der vorliegende Beitrag behandelt die Modellbildung und die numerische Simulation von Mehrfeldproblemen im erweiterten Gebiet der Strukturmechanik. Als repräsentative Beispiele werden die HU-WASHIZU-Elastodynamik von Schalentragwerken und die Thermo-Elasto-Plastizität von Raketenbrennkammern erläutert. Der Schwerpunkt der Mehrfeldmodellierung und -simulation liegt auf langzeitlichen chemomechanischen Deteriorationsmechanismen von Betontragwerken.

Als Grundlage der Modellbildung von Mehrfeldproblemen werden generalisierte Ein- und Mehrfeldprobleme vorgestellt. Diese werden von den Bilanzen, den treibenden Kräften und den konstitutiven Gesetzen als Funktion der Feld- und Geschichtsvariablen beschrieben. Interaktionen der Felder sind in den Bilanzen und den konstitutiven Gesetzen manifestiert. In Vorbereitung auf die numerische Lösung von Mehrfeldproblemen werden diese Bilanzen in eine räumlich schwache Form überführt sowie bezüglich der Feldvariablen linearisiert.

Die numerische Lösung von nichtlinearen und transienten Mehrfeld-Anfangsrandwertaufgaben basiert auf der räumlichen Finite-Elemente-Diskretisierung, der Zeitintegration und der NEWTON-RAPHSON-Iteration. Die Finite-Elemente-Diskretisierung in Tensornotation erlaubt die standardisierte Elementformulierung ein-, zwei- und dreidimensionaler Kontinua. Neben den im Rahmen der p -Version der Finite-Elemente-Methode üblichen hierarchischen Ansatzfunktionen, werden klassische LAGRANGE-Ansatzfunktionen zur effektiven Umsetzung beliebigdimensionaler p -Mehrfeld-elemente reformuliert. Zur Zeitintegration werden NEWMARK- und GALERKIN-Verfahren für nichtlineare Anfangswertaufgaben erster und zweiter Ordnung entwickelt. Beide Verfahrensklassen werden durch numerisch aufwendige, jedoch ungemein zuverlässige Fehlerschätzer der h - und p -Methode und Algorithmen der adaptiven Zeitschrittanpassung ergänzt. Die Vorteile der Klasse der NEWMARK-Verfahren liegt im geringen numerischen Aufwand. Die GALERKIN-Verfahren überzeugen durch ihre hohe Genauigkeit und Robustheit. Die numerischen Verfahren werden derart entwickelt, dass ein modularer Aufbau von Algorithmen-, Element-, Modell- und Materialbibliotheken möglich ist.

Die Modellierung langzeitlicher chemomechanischer Deterioration von Betontragwerken durch das Kalziumauslaugen und die mechanisch induzierte Schädigung zeigt die Umsetzung des vorgeschlagenen abstrakten Mehrfeldproblems. Das Modell besteht im Wesentlichen aus einem Porenmodell und phänomenologischen Modellen der mechanischen Schädigung und der Betonkorrosion. Besonderheiten des Modells sind die chemischen Geschichtsparameter, die den irreversiblen Charakter des Kalziumauslaugens widerspiegeln, und der analoge Aufbau von mechanischem und chemischem Schädigungsmodell. Materialstudien zeigen, dass das Modell in der Lage ist sowohl die einzelnen Schädigungsmechanismen als auch deren Interaktion abzubilden. Die Simulation chemomechanischer

Schädigung von Betonstrukturen illustriert deren chemomechanische Deterioration sowie die Umsetzung des numerischen Konzepts. Insbesondere können die Interaktionen von Mechanik und Chemie sowie die Verminderung der Struktursteifigkeit und -festigkeit aufgrund des chemischen Angriffs gezeigt werden.

Untersuchungen im Rahmen der Elektrolytchemie der Dissoziationsprodukte von Calciumhydroxid als dem meistgelösten Bestandteil des Zementsteins zeigen, dass klassische Diffusionsmodelle nicht ausreichen um den Transport von interagierenden Ionen durch das Porengefüge adäquat abzubilden. Die NERNST-Kopplung von im Porenfluid wandernden Kat- und Anionen und die Konzentrationsabhängigkeit der Diffusivität liefern im Vergleich zur klassischen Kalziumionen-Diffusion drastisch veränderte Transporteigenschaften. Verschiedene Elektrolyt-Diffusionsmodelle werden anhand von experimentell ermittelten konzentrationsabhängigen Diffusionskoeffizienten verschiedener Elektrolyte verglichen. Letztlich werden auf dieser Basis das NERNST-HARTLEY- und das ONSAGER-FUOSS-Modell verifiziert. Die Unterschiede von klassischen Diffusionsmodellen und Elektrolyt-Diffusionsmodellen werden auf Material- und Systemebene im Kontext der Diffusion und der Reaktion-Diffusion untersucht. Insbesondere wird gezeigt, dass die klassische Modellierung des Diffusionsprozesses zu einer beträchtlichen Überschätzung der prognostizierten Lebensdauer von Betontragwerken führt.

Detaillierte Studien zur Numerik werden am Beispiel der Dissoziation-Elektrolyt-Diffusion durchgeführt, da sich diese Rechnungen im Zuge der Forschungsarbeiten als besonders kritisch erwiesen. Stabilitätsprobleme bei nicht glatten Änderungen der DIRICHLET-Randbedingungen oder des Produktionsterms der Dissoziationsprodukte können mithilfe adaptiv kontrollierter NEWMARK-Zeitintegrationsverfahren sowie mit diskontinuierlichen und kontinuierlichen GALERKIN-Zeitintegrationsverfahren behoben werden. Bezüglich der untersuchten numerischen Verfahren können die Fehlerschätzer der h - und p -Methode verifiziert und ein hochwertiger und günstiger Fehlerindikator identifiziert werden. Basierend auf den Fehlerschätzern werden die Funktionsweise der adaptiven Zeitschrittsteuerung demonstriert sowie die Genauigkeitsordnung der Zeitintegrationsverfahren im nichtlinearen Kontext ermittelt. Die NEWMARK-Verfahren sind von zweiter Ordnung genau. Die diskontinuierlichen und kontinuierlichen GALERKIN-Integratoren erreichen für das untersuchte Reaktions-Diffusions-Problem Genauigkeitsordnungen von p beziehungsweise $p+1$, wobei p dem beliebig wählbaren temporalen Ansatzpolynomgrad entspricht.

Insgesamt wird ein Modellierungs- und Simulationsrahmen zur Verfügung gestellt, der zur effektiven Umsetzung einer Vielzahl von Mehrfeldproblemen geeignet ist. Die modular aufgebauten numerischen Methoden sind robust, kontrollierbar und einfach an veränderte Gegebenheiten anzupassen.