

Berechnungssoftware für den Konstruktiven Ingenieurbau - Stand der Entwicklung im Vergleich zur Methodenforschung

W. Heil, R. Sauer, K. Schweizerhof, U. Vogel
Universität Karlsruhe, Institut für Mechanik

1995

Institut für Mechanik
Kaiserstr. 12, Geb. 20.30
76128 Karlsruhe
Tel.: +49 (0) 721/ 608-2071
Fax: +49 (0) 721/ 608-7990
E-Mail: ifm@uni-karlsruhe.de
www.ifm.uni-karlsruhe.de

Berechnungssoftware für den Konstruktiven Ingenieurbau — Stand der Entwicklung im Vergleich zur Methodenforschung

W.Heil, R.Sauer, K.Schweizerhof, U.Vogel

Zusammenfassung Mit der zunehmenden Leistungsfähigkeit preisgünstiger Rechner ist die Bedeutung von Berechnungssoftware und deren Akzeptanz in der Baupraxis in den letzten Jahren stark gewachsen. Gleichzeitig wurde die Leistungsfähigkeit der Berechnungsmethoden insbesondere auf dem Gebiet der Finiten Elemente und der nichtlinearen Lösungsverfahren durch intensive Forschung erheblich verbessert. Im vorliegenden Beitrag wird versucht, einen Überblick über den gegenwärtigen Stand der in der deutschen Baupraxis verfügbaren speziellen Bauberechnungssoftware aus der Sicht eines Universitätsinstituts zu geben. Im Mittelpunkt steht die Frage der Umsetzung der in der Forschung entwickelten Methoden für die Praxis. Auch die Anforderungen der Baupraxis sollen soweit möglich in die Betrachtung einbezogen werden.

Analysis programs for civil engineers – A comparison of method research and the current level of development

Abstract With the increasing capabilities of inexpensive computers the significance of the analysis programs for engineers and their acceptance in engineering practice has reached a very good level. At the same time, the intensive research efforts have lead to considerable improvements in the capabilities of the analysis methods over the last years in particular in the field of finite element and nonlinear solution methods.

The following contribution gives a summary of the current status of the special analysis software available for the german civil engineers from the point of view of university research. The focus is on putting the developed methods into practice in the engineering community. In particular the requirements of practising engineers are taken into account as much as possible.

1 Einführung und Ziel der Studie

Berechnungssoftware wurde in den letzten Jahren in vermehrtem Maße zu einem Standardhilfsmittel der Ingenieure in der Baupraxis. Dabei ist festzustellen, dass neben der Verfügbarkeit preisgünstiger und leistungsfähiger Rechner auch die Leistungsfähigkeit der verfügbaren Rechenprogramme in der Baupraxis erheblich gesteigert wurde. Diese Leistungssteigerung umfaßt sowohl die Handhabung der Daten und Ergebnisse einschließlich der Auf- und Nachbereitung (Pre- und Postprozessing) als auch neue methodische Entwicklungen. Während das Pre- und Postprozessing, die vereinfachte Handhabung und die Führung in den Programmen im wesentlichen die Tagesarbeit der Ingenieure erleichtert, wurde mit den neu entwickelten Methoden sowohl die Qualität der Berechnungen verbessert als auch der Zugang zu schwierigen Aufgaben wesentlich erleichtert bzw. überhaupt erst ermöglicht. Die Methodenentwicklung ist fast ausschließlich Sache der Hochschulen im In- und Ausland.

Handhabung und Auf- und Nachbereitung der Daten sind zwar für die Baupraxis von wesentlicher Bedeutung, die diesbezüglichen Weiterentwicklungen liegen wegen ihres geringen Theoriegehaltes jedoch weitgehend im Aufgabenbereich der Softwareentwickler und sollen hier nicht betrachtet werden. Qualität, Effizienz und Robustheit von Berechnungsmethoden auf der Grundlage konsistenter Theorien sind von zentraler Bedeutung für die Korrektheit und Durchführbarkeit von Analysen und damit letztendlich auch für die Standsicherheit der Bauwerke. Sie stehen daher im Mittelpunkt der Forschung der Hochschulen, aus deren Sicht die Berechnungssoftware beurteilt werden soll.

Ziel des Beitrags ist, die Weiterentwicklung der Methoden an den Hochschulen der Verbreitung und dem Einsatz in der Baupraxis an Hand der auf dem Markt befindlichen Berechnungssoftware gegenüberzustellen und nachzufragen, inwieweit sich neue methodische Entwicklungen in der Praxis durchsetzen oder warum nicht. Gleichzeitig wird versucht, einen groben Überblick über den Stand der Berechnungssoftware für baustatische Probleme in der Baupraxis zu geben.

Nicht einbezogen in die Untersuchung wird Standardsoftware für die Lösung von Einzelproblemen im Bauwesen, wie z.B. die Berechnung von Kehlbalkendächern, Stützmauern, Einzelfundamenten, Durchlaufträgern oder Plattensysteme nach Belastungsumordnungsverfahren/Pieper-Martens, Auswertung der

Tabellenwerke von z.B. Czerny oder Stiglat/Wippel, sowie Software aus dem Gebiet der Geotechnik und Bodenmechanik. Software zur Berücksichtigung von Wärmeleitung wird gleichfalls nicht betrachtet.

Ein Teil der Studie ist das Resultat einer Fragebogenaktion, an der sich bekannte Softwarehersteller beteiligten. Ziel der Studie ist nicht, einzelne Produkte detailliert zu untersuchen oder herauszuheben. Dies ist angesichts der Vielfalt der vorliegenden Programme und deren Optionen nur schwer möglich. Gleichfalls ist es nicht die Absicht der Verfasser, eine gegenüberstellende Wertung der Programme vorzunehmen.

In den folgenden Abschnitten werden die methodischen Forschungsfortschritte der letzten Jahre zusammengefaßt und ein Überblick über die in der Berechnungssoftware vorhandenen Möglichkeiten gegeben. Daran schließt sich eine Diskussion über die Übernahme der neuen Methoden in die Berechnungssoftware an. Abschließend werden die wesentlichen Ergebnisse zusammengefaßt und ein Ausblick über zukünftige Entwicklungen gegeben.

2 Für Berechnungssoftware wesentliche methodische Weiterentwicklungen

Ein wesentlicher Teil der Forschung der Institute für Baustatik und Mechanik im In- und Ausland ist auf methodische Weiterentwicklungen ausgerichtet. Es ist selbstverständlich, dass diese Weiterentwicklungen vielfach auf Computeranwendungen hinzielen bzw. auf den Rechner als Hilfsmittel bauen. Dies gilt für Stabtragwerke, wo zwar für ebene Tragwerke mit wenigen Stäben gut ausgearbeitete Formeln und Vorgehensweisen für nichtlineare Von-Hand-Berechnungen nach Theorie II. Ordnung auch mit Einbeziehung von Fließgelenken vorliegen [75, 56], aber bei größeren ebenen Tragwerken und räumlichen Systemen der Einsatz des Rechners unumgänglich ist. Es gilt besonders für Flächentragwerke wie Scheiben, Platten, Schalen sowie für Kontinua, für die bei Verwendung der Methode der Finiten Elemente der Rechnereinsatz angesichts der erforderlichen Lösung von größeren Gleichungssystemen mit der Methode untrennbar verbunden ist. Neben der Ausrichtung von Methoden auf bestimmte Tragsysteme wird auch viel Forschungsarbeit im allgemeinen Bereich der numerischen Algorithmen geleistet, wie z.B. der Gleichungslösung linearer und nichtlinearer Probleme, Zeitintegrationsverfahren, Eigenwertlöser, der Entwicklung

von nichtlinearen Werkstoffgesetzen für Stahl und Beton sowie neuerdings der automatischen Netzanpassung.

Die wesentlichen methodischen Weiterentwicklungen der letzten Jahre, die für Berechnungssoftware von Bedeutung sind und auch einen Reifegrad erreicht haben, der eine allgemeine Verwendung gestattet, sollen im folgenden in Stichworten aufgelistet werden; siehe auch [50].

1. Stabtragwerke

Weiterentwicklung der Berechnungsverfahren für nichtlineare Probleme: Ausbau der Berechnungsmethoden nach Theorie II. Ordnung unter Einbeziehung von Fließgelenken. Ursprünglich von Vogel [74] und Rubin [56] für ebene Rahmentragwerke für Handrechnungen aufbereitet. Fließzonentheorie für beliebige Querschnitte auch unter beliebiger Belastung [2, 39]; Fließgelenktheorie für räumliche Stabtragwerke, allerdings beschränkt auf symmetrische Profile [19]. Weiterentwicklung geometrisch vollständig nichtlinearer Theorien für Stäbe z.B. [47].

2. Scheibentragwerke

Für lineare Probleme: Entwicklung von leistungsfähigen Elementen niedriger Ansatzordnung; gemischt hybride Elemente (Pian-Sumihara) [48]; Elemente mit Drehfreiheitsgraden [3, 30, 33]; erweiterte Ansätze für Verzerrungen [63, 4]; für eine Übersicht siehe [60]. Diese Elemente erlauben effiziente Berechnungen auch mit feinen Netzaufteilungen mit hoher Genauigkeit. Wegen seiner quadratischen Konvergenzordnung wird bei Dreiecksnetzen in jüngster Zeit insbesondere bei adaptiven Analysen [91] auf das 6-Knoten Dreieckselement mit quadratischen Ansätzen für Verschiebungen gesetzt.

Für nichtlineare Probleme: Elemente mit erweiterten Verzerrungsansätzen, effiziente Algorithmen für elastoplastische Analysen [61, 41].

3. Plattentragwerke

Für lineare Probleme: Reissner/Mindlin- Elemente mit diskreten Kirchhoffbedingungen, Drei- und Vierecke (DKT- und DKQ-Elemente) nach [11, 13], DST-Element für dünne und dicke Platten [14]; Reissner/Mindlin- Elemente mit Ansätzen für Schubverzerrungen zur Vermeidung der Querschubversteifung [9, 31, 57]; Verbesserung dieser Elemente durch angepaßte Schubkorrekturfaktoren [38]; gemischt hybride Elemente mit Ansätzen für Schubverzerrungen [15, 62]; Reissner/Mindlin- Element mit Allman-Ansatz [57].

Für materiell nichtlineare Probleme: effiziente Algorithmen für elastoplastische Analysen [61, 41].

4. Schalenträgerwerke

a) Beliebige Schalengeometrien:

Für lineare und nichtlineare Probleme: Gute 4-Knoten-Elemente (Reissner/Mindlin Theorie) für doppelt gekrümmte Schalen [10, 18, 20, 62, 66, 77]; Elemente mit erweiterten Verzerrungsansätzen [4]; DKT/CST-Elemente [68, 14]; leistungsfähige Kirchhoff-Elemente höherer Ordnung [24].

Für geometrisch nichtlineare Probleme: Theoretische Weiterentwicklungen und entsprechende Elemente [62, 21, 20, 7].

Für materiell nichtlineare Analysen: leistungsfähige Algorithmen für elastoplastische Analysen (wie bei Platten und Scheiben); verbesserte Werkstoffmodelle für Stahlbeton [79, 87, 70, 27, 37].

b) Rotationsschalen

Fourierreihenentwicklung in Umfangsrichtung für nichtrotationssymmetrische Belastungen. In Meridianrichtung Finite Elemente mit linearem [88] bis kubischem Ansatz oder Übertragungsverfahren [84]; Lösungen auch für geometrisch und materiell nichtlineare Probleme [85, 86].

5. Beulen, Durchschlagen

Eigenwertlöser für geometrisch nichtlineare Probleme - linear und begleitend; unterster Wert bzw. Eigenwertgruppen (Subspace-Eigenwertlöser) [8]; Kurvenverfolgungsalgorithmen zur Berechnung von Durchschlagproblemen mit abfallenden Last-Verformungskurven [54, 49, 59] oder von Problemen mit sehr großen Verformungen; direkte Ansteuerung von Beul- bzw. Durchschlagspunkten [82, 83].

6. Dynamik

Eigenwertlöser zur modalen Analyse, Eigenfrequenzen und Eigenformen; Viele Frequenzen (Simultane Vektoriteration, Subspace Iteration [8]); Algorithmen zur direkten Berechnung von Zeitverläufen für lineare und nichtlineare Probleme: Newmark-, Wilson-, Hilber- α -Verfahren [29]; das θ_1 -Verfahren von Hoff [26].

7. Fehlerschätzung, Adaptivität, automatische Netzanpassung

Berechnung von geschätzten Fehlern und Fehlerindikatoren [6, 90, 52, 57] mit automati-

scher Netzanpassung für Scheiben-, Platten- und Schalenprobleme [57, 69].

8. Gleichungslöser, Sonstiges

Iterative Gleichungslöser: Konjugiertes Gradientenverfahren, Mehrgitterverfahren [57] und modifizierte Gauß-Seidelverfahren. Für eine grundlegende Darstellung siehe [22].

Für die Lösung nichtlinearer Probleme: Newton-, bzw. Newtonähnliche Verfahren (modifiziertes Newton-, Quasi-Newton Verfahren), siehe [40, 59]. Reine Newton-Verfahren führen wegen der in der Nähe der Lösung vorhandenen quadratischen Konvergenz zu den kleinsten Iterationszahlen auch für stark nichtlineare Probleme [61, 80, 41]. Hierzu sind die nichtlinearen Gleichungen und ihre FE Approximation jedoch konsistent zu linearisieren [80]. Letzteres erfordert im theoretischen Bereich höheren Aufwand, der aber zur Lösbarkeit von manchen Problemen mit ausgeprägten Nichtlinearitäten wesentlich ist. Quasi-Newton Verfahren [40, 59] sind wesentlich einfacher zu implementieren, zeigen bessere (superlineare) Konvergenz als modifizierte Newton Verfahren und sind für Probleme geeignet, bei denen eine Linearisierung infolge unstetiger Funktionen nicht sinnvoll ist, z.B. einige Betonmodelle.

Sonstige Entwicklungen: Strukturoptimierung [51, 16, 73], Form-, Querschnitts-, Gewichts-, Kostenoptimierung. Kontaktprobleme [81, 28, 23].

3 Vorhandene Berechnungssoftware

Die folgende Auswertung und Diskussion basiert auf den Informationen der Befragung von 31 Softwareherstellern in den Jahren 1992/93. Nicht mit einbezogen wird Software, die nicht speziell für das Bauwesen entwickelt wurde, welche aber für weite Klassen von Problemen gut einsetzbar ist, wie z.B. MSC-NASTRAN, ANSYS, ABAQUS, PERMAS [44, 5, 1, 35]. Auch die Programme der einzelnen Hochschulinstitute werden nicht berücksichtigt, da sie dem Markt nicht direkt zur Verfügung stehen.

3.1 Generelle Anwendungsbereiche der Software

Die im Rahmen der Untersuchung betrachtete Software läßt sich nach den angegebenen Anwendungsbereichen unterteilen:

1. Stabtragwerke (Fachwerk- und Biegestäbe, Trägerroste), weiter unterteilbar in

- zweidimensionale Tragwerke
 - dreidimensionale Tragwerke
2. Scheibentragwerke, ebene Verzerrungsprobleme
 3. Plattentragwerke
 4. Schalentragwerke
 5. Rotationssymmetrische Tragwerke
 - Kontinua
 - Kreisplatten und Rotationsschalen; gerade und gekrümmte Erzeugende
 - Rotationssymmetrische und allgemeine Belastung

Außerdem ist zu unterscheiden zwischen:

- Statik
- Dynamik
 - harmonische Analyse, Ermittlung der Eigenfrequenzen und Eigenformen
 - direkte Zeitverlaufsanalyse mit verschiedenen Zeitintegrationsverfahren
- geometrisch nichtlinear, auch Theorie II.Ordnung, Beulanalyse mit Eigenwertermittlung
- materiell nichtlinear, auch Fließgelenk- und Fließzonentheorie

Zu unterscheiden (siehe Tabelle 1) ist außerdem zwischen Programmen, die nur für einzelne Tragwerkstypen geeignet sind, z.B. reine Stabwerksprogramme, Scheiben- bzw. Plattenprogramme, oder Rotationsschalenprogramme, sowie zwischen Programmsystemen, die in der Form üblicher Finite Elemente Programme eine breite Palette von Möglichkeiten bieten. Im letzteren Fall wird je nach Tragwerkstyp das entsprechende Element ausgewählt; damit sind auch Kombinationen von verschiedenen Tragwerkselementen möglich, z.B. Plattenelemente mit Balken- oder Fachwerkelementen.

Der Vorteil der Einzelprogramme ist deren Kompaktheit, ihre meist kurzen Rechenzeiten sowie deren häufig speziell gute Ausstattung bezüglich Pre-, Postprozessing und Handhabung. Der Vorteil der Programmsysteme mit vielen Elementtypen ist die Vielseitigkeit, die sich allerdings auch in der damit automatisch komplexeren Handhabung und der leicht höheren Berechnungszeit bemerkbar macht. Ein wichtiges Argument für letzteres ist die Durchgängigkeit der Eingabe für alle Tragwerkstypen und die einheitliche Datenhandhabung, häufig auch die einheitliche Anbindung an ein CAD-Programm.

3.2 Möglichkeiten der einzelnen Programme

Es wird ein Überblick über die Berechnungsmöglichkeiten der vorliegenden Software gegeben, wobei der Schwerpunkt auf den methodischen Weiterentwicklungen und deren Einbindung in die gegenwärtigen Programme liegt. Die Verfasser weisen darauf hin, dass infolge der beschränkten Zahl der Antworten bei der Fragebogenaktion nur eine grobe generelle Aussage möglich ist.

Global läßt sich feststellen, dass die Berechnungssoftware zum größten Teil auf lineare Probleme der Statik und, eingeschränkt, der Dynamik ausgerichtet ist. Materiell und geometrisch nichtlineare Analysen sind weitgehend auf Theorie II. Ordnung und die Fließgelenk-/Fließzonentheorie bei Stabsystemen beschränkt. Eine erste Übersicht ist diesbezüglich in Tabelle 2 gegeben.

Im folgenden wird analog zu Abschnitt 3.1 auf die einzelnen Tragsysteme gesondert eingegangen:

1. Stabtragwerke

Wie bereits aus Tabelle 1 ersichtlich, liegen bei allen befragten Softwareherstellern vielseitige Programme zur linearen Analyse von Stabtragwerken - eben und räumlich - vor. Auch Probleme nach Theorie II. Ordnung können für ebene Systeme von fast allen Programmen behandelt werden (siehe Tabelle 2). Räumliche Probleme sind nur mit wenigen Programmen [34, 45, 46, 65] nach Theorie II. Ordnung berechenbar. Üblich ist, dass Biegedrillknicken nicht berücksichtigt wird. Es wird also der Einfluß der Biegemomente auf das räumliche Versagen vernachlässigt. Dominierend ist die Verwendung des Übertragungsverfahrens für die Aufstellung der Stabmatrizen. Die Antworten auf die Einbeziehung der Fließgelenktheorie bzw. Fließzonentheorie auch kombiniert mit Theorie II. Ordnung in die

Software zeigen, dass trotz der Anforderungen der DIN 18800 derzeit nur wenige Anbieter diese der Wirtschaftlichkeit dienenden Möglichkeiten aufgenommen haben [46, 55, 65]. Hierbei sind diese Erweiterungen mit Ausnahme des Programms STAR2/3 [65] auf ebene Rahmen beschränkt. Es sei bemerkt, dass Entlastungen in den Fließgelenken nicht erfaßt werden.

Überwiegend wird auf eine zweistufige Arbeitsweise gesetzt: zuerst wird die FE-Berechnung durchgeführt, daran schließen sich manuelle Nachweise in Strbereichen an (z.B. Durchstanznachweis). Die Erfassung von Bauzuständen kann entweder durch das Modell eines gesonderten statischen Systems oder durch spezielle Berücksichtigung im Programm erfolgen.

2. Scheiben

Für die zur Berechnung von Scheibentragwerken verwendeten Methoden liegen nur sehr eingeschränkt Informationen von Seiten der Softwarehersteller vor, siehe Tabelle 3.

Die angegebenen Finiten Elemente (Drei- und Vierecke) für Scheibenberechnungen sind in einigen Programmen z.B. [65] auch zur Berechnung ebener Verzerrungsprobleme und achsensymmetrischer Probleme einsetzbar. Interessant ist, dass hier vorwiegend relativ "alte" Elemente dominieren. Für lineare Berechnungen werden neben den klassischen Verschiebungselementen viele Elemente mit gemischten Ansätzen, z.B. das Element von Pian/Sumihara [48] und nichtkonforme Verschiebungselemente nach Taylor u.a. [71] angeboten [55, 65]. Es sei an dieser Stelle auch bemerkt, dass die klassischen, konformen Verschiebungselemente mit linearen Ansätzen relativ steif sind, d.h. eine feinere Auflösung des FE Netzes erforderlich ist als bei entsprechenden gemischten und nichtkonformen Elementen.

Für materiell nichtlineare Probleme wird in den entsprechenden Programmen [55, 65], soweit den Antworten entnehmbar, auf die Elemente mit Verschiebungsansatz zurückgegriffen. Spezielle Werkstoffmodelle für Beton sind in [65] und mit Rissen, Reißöffnung, auch für zyklische Belastung in [55] enthalten. Geometrisch nichtlineare Analysen werden für Scheiben derzeit wohl auf Grund geringer Nachfrage nicht angeboten.

3. Platten

Wie bei Scheiben liegen auch über die Berechnungsmethoden für Plattentragwerke nur wenige Informationen von Seiten der Softwarehersteller vor, siehe Tabelle 4. In fast al-

len betrachteten Programmen sind Dreieck- und Viereckelemente mit 3 bzw. 4 Knoten implementiert. Dies sind zum einen Elemente, die rein auf der Kirchhoff Theorie basieren (hierfür sind Elemente mit gemischten Ansätzen für Spannungen und Verschiebungen unumgänglich [25, 78]), zum anderen liegen auf der Reissner/Mindlin Theorie basierende Dreieck- und Viereckelemente vor, die einen vom Softwareaufsteller [65] modifizierten Verschiebungsansatz mit angenommenem Schubverzerrungsverlauf [31] enthalten. Die weiteren Elemente basieren auf der Reissner/Mindlin Theorie mit Kirchhoffbedingungen an ausgewählten Stellen nach den Arbeiten von Batoz und Mitarbeitern [11, 12, 13]. Letztere Elemente haben die Eigenschaft, bei Verfeinerung gegen die Kirchhoff-Lösung zu konvergieren. Es werden nur Verschiebungsansätze verwendet. Das DST-Element [14] in ALLFEM [46] kann wegen der Berücksichtigung der Querschubdeformation auch für mäßig dicke Platten eingesetzt werden.

4. Schalen

a) Beliebige Schalengeometrien

Wie bei Scheiben und Platten liegen auch über die Berechnungsmethoden für Schalentragwerke nur wenige Informationen von Seiten der Softwarehersteller vor. Wie bereits aus Tabelle 1 ersichtlich muss hier zwischen der Berechnung flacher und doppelt gekrümmter Schalen unterschieden werden. Bis auf das Viereck-Schalenelement in SAP90 [17], das auch innerhalb des Elementes doppelt gekrümmt sein kann, sind die anderen Schalenelemente [65, 46, 53, 55, 42, 45] auf die Berechnung von Schalen beschränkt, die durch flache Elemente, d.h. alle vier Knoten in einer Ebene, darstellbar sind. Dies liegt darin begründet, dass diese Elemente auf der einfachen Kopplung von Scheiben- und Plattenelementen – sogenannten Faltwerkselementen – basieren. Mit Hilfe einer Sonderbetrachtung kann in [65] das flache Element auch für stark gekrümmte Schalenbereiche eingesetzt werden. Dreieckelemente mit 3 Knoten hingegen können für beliebig gekrümmte Schalen verwendet werden. Allerdings wird für sinnvolle Ergebnisse wegen des sehr steifen Membrananteils für Tragwerke mit lokalen größeren Spannungsgradienten in Membranrichtung ein sehr feines Netz benötigt. Es sei außerdem bemerkt, dass bei der Kopplung der DKQ- bzw. DKT-Elemente für den Biegeanteil mit den linearen Verschiebungselementen für den Verschiebungsanteil am Elementrand leichte Inkompatibilitäten vorliegen, die sich allerdings bei hinreichend schlanken Tragwerken kaum negativ auf die Ergebnisse auswirken. Keines der hier betrachteten Programme erlaubt geometrisch nichtlineare Berechnungen

sowie materiell nichtlineare Analysen. Auch Beulberechnungen mit Hilfe der Lösung von Eigenwertproblemen sind mit keinem der betrachteten Programme möglich.

b) Rotationsschalen

Reine Rotationsschalenelemente liegen in [65, 46] vor, siehe Tabelle 1. In ALLFEM [46] sind gekrümmte Verschiebungselemente mit kubischem Verschiebungsansatz implementiert, während in dem Spezialprogramm SHELLS [65] sowohl Verschiebungselemente als auch Elemente nach dem Übertragungsverfahren eingebaut sind. Beide Programme lassen sowohl rotationssymmetrische als auch nichtrotationssymmetrische Belastungen zu. In [65] sind auch noch lineare Beulanalysen möglich.

5. Beulen, Durchschlagen, Versagen

Für Stabprobleme sind mit Theorie II. Ordnung kritische Lastfaktoren berechenbar, z.B. in [46]. Für Scheibenprobleme liegt nur in einem der betrachteten Programme [55] die Möglichkeit der Berechnung von Versagenspunkten bei materieller Nichtlinearität vor; hierbei ist eine Modifikation des Kurvenverfolgungsalgorithmus nach Riks [54, 49] implementiert. Lineare Eigenwertanalysen zur Vorhersage von kritischen Lasten bei linear elastischem Material sind bis auf ein Rotationsschalenprogramm [65] mit keinem der betrachteten Programme möglich.

6. Dynamik

Viele der betrachteten Programme enthalten die Möglichkeit, Eigenfrequenzen und Eigenformen, einzeln oder in Gruppen, zu berechnen und diese für das Antwortspektrenverfahren sowie für Zeitverlaufsberechnungen im Sinne einer modalen Analyse mit exakter Zeitintegration [42] zu verwenden (siehe Tabelle 2). Möglichkeiten für Zeitverlaufsanalysen mit direkten Methoden, wie Newmark- und Wilson-, Verfahren liegen nur in [32, 55, 65] vor. Nichtlineare dynamische Berechnungen sind - allerdings eingeschränkt auf Scheiben mit nichtlinearem Material (Beton) - nur in einem Programm [55] möglich.

7. Adaptivität, automatische Netzanpassung, Fehlerberechnung

Adaptivität und automatische Netzanpassung werden noch von keinem der Programme angeboten. Allerdings ist als Vorstufe schon ein Fehlerschätzer nach Zienkiewicz [88] in ASE [65] und in modifizierter Form in IFESCAD [45] implementiert. In diesen Programmen werden auch verschiedene Hilfsfunktionen zur lokalen Netzanpassung angeboten.

8. Gleichungslser, Sonstiges

Als Gleichungslser für lineare Probleme sind nur direkte Lser basierend auf Variationen der Gauß-Elimination eingebaut. Iterative Lser sind nicht vorhanden. Für nichtlineare Probleme wird in den Programmen [65, 55], die allgemeine nichtlineare Aufgaben bearbeiten können, ein Quasi-Newton Verfahren zur Lösung angeboten.

Sonstige Möglichkeiten wie z.B. Optimierung sind in keinem Programm enthalten. Auch Algorithmen zur Lösung von beliebigen Kontaktproblemen scheinen bis auf die Möglichkeit der Verwendung von nichtlinearen Federn für Einzelfälle nicht vorzuliegen.

3.3 Ergebnisse der Testberechnungen

Zur Überprüfung der Leistungsfähigkeit der einzelnen Softwarepakete wurden einige kleinere Testbeispiele (siehe auch [43]) ausgewählt, die von den Softwareherstellern und soweit möglich von den Verfassern selbst bearbeitet wurden. Hauptziel war der Test der Leistungsfähigkeit bezüglich neuerer methodischer Entwicklungen. Aus Aufwandsgründen konnten nicht alle angesprochenen Fähigkeiten auch in Beispielen untersucht werden. Die Beispiele legten trotz der relativ geringen Informationen von Seiten der Softwarehersteller aber in einigen Punkten klar, wo weitgehend keine Software Lösungsmöglichkeiten bietet.

Die Testbeispiele waren wie folgt aufgebaut:

1. Drei Beispiele zur Stabwerksberechnung nach Theorie II.Ord. mit Einschluß der Fließgelenktheorie bzw. Fließzonentheorie. Dies sind die in Bild 1 dargestellten "Eichrahmen" nach Vogel [76], die einen Querschnitt über mögliche Rahmensysteme darstellen sollen.
2. Ein Scheibenelement- und ein Plattenelementtest (siehe Bild 2), die die Konvergenz der Elemente überprüfen sollen, sowie ein Test zur Überprüfung der Fähigkeit, dünne Platten ohne Schubversteifung zu berechnen (siehe Bild 3 a). Für die beiden Patch-Testbeispiele soll bei Scheiben ein konstanter Membranspannungs- und Membrandehnungszustand und bei Platten ein konstanter Krümmungs- bzw. Biegespannungszustand erreicht werden.
3. Ein Beispiel zur Berechnung von einfach gekrümmten Schalenträgwerken (siehe Bild

- 3 b). Dies soll zeigen, wie gut die Viereck-Elemente gekoppelte Membran- und Biegezustände erfassen können.
4. Zwei Beispiele zur Berechnung von Schalentragerwerken mit doppelter Krümmung, siehe Bild 4. Damit soll die Fähigkeit der Viereck-Schalenelemente zur Darstellung von Starrkörperbewegungen bei gleichzeitiger Biegebeanspruchung einzelner Bereiche überprüft werden. Beim verdrehten Kragarm muß zusätzlich der Übergang von ausschließlicher Membranbeanspruchung in ausschließliche Biegebeanspruchung (Last F^b) bzw. umgekehrt (Last F^a) von den Finiten Elementen abgebildet werden.
 5. Ein Beispiel für materiell nichtlineare Scheibenberechnungen. Dieser Test soll die Qualität der implementierten Materialgesetze für Elastoplastizität (z.B. Stahl) sowie die Güte der eingebauten Algorithmen bezüglich Konvergenz zeigen.
 6. Ein Beispiel für geometrisch nichtlineare Schalenberechnungen mit Durchschlagen. Damit soll gezeigt werden, inwieweit die Schalenelemente geometrisch nichtlineares Verhalten abbilden können und ob eine Berechnung in den Versagensbereich hinein möglich ist.

Während für die beiden nichtlinearen Beispiele 5 und 6 bis zur Fertigstellung dieses Aufsatzes keine Lösungen eingingen und daher auf die Darstellung der Aufgaben an dieser Stelle verzichtet wird, lassen sich die Ergebnisse der sonstigen Testanalysen wie folgt zusammenfassen.

Zu Test 1. Sowohl für das Programm STAR2/3 [65] (Fließzonentheorie) als auch für ALLSTAR [46] (Fließgelenktheorie) liegen korrekte Lösungen für alle Probleme vor. Für MicroSnap [55] liegt nur eine Lösung für den Portalrahmen vor, wobei hier der korrekte Wert für die Traglast erreicht wurde. Sonst wurde keine Lösung für dieses materiell nichtlineare Beispiel mit Theorie II.Ord. erstellt. Für einen interessanten praxisnahen Vergleich zweier Programme siehe [58].

Zu Test 2. Lösungen lagen für [65, 46, 53, 55, 17] vor. Der Scheiben- und der Platten Patch-Test wurde von allen Systemen mit Drei- und Vierknotenelementen erfüllt, die für beliebige Elementformen zugelassen sind. Auch den Test für sehr dünne Platten bestehen diese Programme selbst mit sehr groben FE-Netzen.

Zu Test 3. Lösungen lagen für [65, 53, 55, 17] vor. Das Beispiel des Tonnendaches wird

sowohl von den "flachen" Schalenelementen (Kombination Platte-Scheibe) wie vom echten Schalenelement in [17] gut gelst.

Zu Test 4. Die Beispiele in Bild 4 erfordern FE Netze mit gekrümmten Elementen. Erwartungsgemäß kann mit allen "flachen" Viereck-Schalenelementen nicht das korrekte Ergebnis erzielt werden. Dies wird nur mit den echten Schalenelementen in SAP90 [17] und nach Einbau von Sonderüberlegungen in das ursprünglich flache Schalenelement, mit denen ein gekrümmtes Element simuliert wird, in ASE [65] erreicht. Es muß erwähnt werden, daß die flachen Dreieck-Schalenelemente zur Lösung dieser Probleme geeignet sind, allerdings werden infolge der großen MembranstEIFigkeit der Dreieckselemente zur Erzielung vergleichbarer Ergebnisse relativ feine Netze benötigt.

4 Methodische Weiterentwicklungen und deren Übernahme in Berechnungssoftware

Der Kontakt der Verfasser mit den Herstellern der Software im Laufe der Befragung und Durchführung der Testbeispiele zeigte, daß von Seiten der Hersteller eine große Offenheit zur Aufnahme methodischer Weiterentwicklungen vorhanden ist. Es zeigte sich aber auch, daß die Nachfrage von Seiten des Marktes d.h. der Bauwirtschaft, Firmen und Ingenieurbüros die Übernahme neuer Methoden in die Programme entscheidend bestimmt.

Zur Zeit scheint der Großteil der baupraktischen Aufgaben mit linearen Stabwerks- und Plattenprogrammen bewltigbar zu sein. Im Stahlbau werden für **Stabtragwerke** allerdings schon lngere Zeit auch nichtlineare Nachweise nach Theorie II.Ord. gefordert; daher liegt hierfür auch in ausreichendem Umfang Software vor. Neue Vorschriften, wie die DIN 18800 führten auch zu verstrkten Aktivitten bezüglich der Aufnahme von Fließgelenken bzw. Fließzonen in die Berechnungsprogramme, so daß hier insbesondere für ebene Probleme gute Lösungen vorliegen. Die schon relativ lange vorliegenden Lösungen für rumliche Stabtragwerke nach Theorie II. Ord. mit Fließzonen bzw. Fließgelenken wurden von den Softwareherstellern noch kaum in Programme umgesetzt. Auch hier scheint die Komplexitt der Implementierung und die mangelnde Nachfrage den Einbau derzeit zu verhindern.

Eine sehr sinnvolle Erweiterung ebener und rumlicher Stabwerksprogramme wre die zuz-

liche Berücksichtigung der Biegemomentenverteilung - neben den bereits vorhandenen Normalkrften - auf das Stabilitätsversagen der Stbe (Biegedrillknicken). Dann könnte der nach DIN 18800 T2 getrennt und zusätzlich zu führende Biegedrillknicknachweis entfallen.

Die Gegenüberstellung der Methodenentwicklung mit den in den Programmen vorhandenen **Plattenelementen** zeigt, dass die Praxis neuere Entwicklungen bei entsprechender Anforderung auch direkt umsetzt. Die vorhandenen Elemente sind entweder lange bewährt und auch in ihrer Leistungsfähigkeit sehr gut, wie die gemischten Viereck-Elemente in [53, 42], oder sie sind neuere Entwicklungen, wie die sehr leistungsfähigen Diskreten Kirchhoff Drei- und Viereck-Elemente in ihren verschiedenen Formen [55, 46, 17]. Letztere gehören zu den besten Elementen der neuesten methodischen Entwicklungen. Auch das in [65] implementierte Viereckelement nach [31] ist eines der moderneren Elemente, das die Nachteile der Schubversteifung der bilinearen Mindlin-Elemente mit Hilfe von Schubverzerrungsansätzen vermeidet.

Die in den Programmen vorhandenen **Scheibenelemente** sind sehr unterschiedlich. Die in vorwiegender Zahl implementierten klassischen Verschiebungselemente mit bilinearem Ansatz sind relativ steif; dies kann beim Viereckelement durch reduzierte Integration des Schubanteils [53] teilweise behoben werden. Die leistungsfähigsten Viereckelemente niedriger Ansatzordnung sind das gemischt hybride Element nach Pian/Sumihara [48] in [55] und das nichtkonforme Element nach Taylor u.a. [71] in ASE [65]. Werden höhere Ansatzordnungen und entsprechend größere Bandbreiten in Kauf genommen, so bietet das hybride Element nach Walder [78] eine zufriedenstellende Lösung. Für materiell nichtlineare Probleme wird auf eine reine Verschiebungsformulierung zurückgegriffen [65, 55]; hier bieten die neuen Entwicklungen nach Simo u.a. [64, 63] sicher eine bessere Alternative.

Entsprechend dem Umfang der Anforderungen aus der Praxis ist die Situation bei **räumlichen Schalenelementen**. Alle implementierten Schalenelemente, bis auf das Element von Simo/Taylor in [17], sind flache Schalenelemente, d.h. die Geometrie der Schale wird durch Ebenen angenähert. Dies gelingt für beliebig gekrümmte Schalen nur mit Dreiecken vollständig, mit Viereckelementen ist dies nur im Sonderfall möglich. Die einfache Verbindung der Platten- und Scheibenelemente, sogenannte Faltwerkselemente, führt bei Vierecken dann zu keiner korrekten Lösung. Es ist hierfür eine Schalentheorie mit Einbeziehung gekrümmter Geometrien erforderlich. Der theoretische und programmtechnische Aufwand

hierfür ist eindeutig höher als für Faltwerkselemente und damit für die Softwarehersteller mit erheblich höheren Kosten verbunden, was den vorliegenden Stand der Software bezüglich Schalen erklärt. Hier klafft eine relativ große Lücke zwischen vorhandenen Methoden und deren Umsetzung in die Programme.

Noch krasser steht es um die Entwicklungen bezüglich Nichtlinearitäten, die für Schalenträgerwerke noch in keiner Weise integriert sind. Hier wird eventuell die Nachfrage nach der Lösung von Stabilitätsproblemen und z.B. nichtlinearem Verhalten von Stahlbeton mit steigender Leistungsfähigkeit der Rechner noch wachsen, obgleich schon jetzt mit den schnellsten PC-Rechnern auch nichtlineare, mittelgroße Probleme mit sinnvollen Rechenzeiten gelöst werden können.

Auch wenn für **Rotationsschalen** schon viele Jahre Software z.B. in Lehrbüchern erhältlich ist, werden nicht viele Programme zur Berechnung von Rotationsschalen angeboten. Während in der Forschung schon längere Zeit mit solchen Programmen auch für materiell und geometrisch nichtlineare Probleme auch für nichtrotationssymmetrische Belastung sehr gute Ergebnisse auf effiziente Weise erzielt werden, liegen nur wenige Programme im Bausektor vor. Diese sind mit der Ausnahme, daß in einem Fall auch lineare Beulanalysen möglich sind [65], auf lineare Probleme beschränkt. Hier scheint der Bauproduktmarkt nicht mehr zu fordern. Allerdings stehen vielfältige Optionen für rotationssymmetrische Schalenträgerwerke und Kontinua in den im Anlagen- und Kernkraftbau verbreitet eingesetzten FE-Programmsystemen wie [5, 44, 1, 35] zur Verfügung.

Sicherlich ist es auch eine Frage der Rechnerleistung, bis weitere Möglichkeiten bezüglich **dynamischer Probleme** in die Bauberechnungssoftware Eingang finden. Die Beschränkung auf die Berechnung von Eigenfrequenzen und Eigenformen, Antwortspektren und modale Analyse ist auch mit mangelnden Anforderungen zu erklären. Die schon lange gut entwickelten direkten Verfahren zur Zeitintegration wie das Newmark-Verfahren, die zur Zeit kaum in die Programme eingebaut sind, werden im Zusammenhang mit dem Einbau nichtlinearer Materialgesetze an Bedeutung gewinnen.

Die Frage der **Fehlerschätzung** – derzeit ein hoch wichtiges Thema der Forschung – hat bis auf wenige Ausnahmen noch keinen Eingang in die betrachteten Programme gefunden, obgleich für praktische Belange im Ingenieurbereich leicht implementierbare Methoden [89, 90] vorliegen. Die damit gekoppelte **Adaptivität** und **automatische Netzanpas-**

sung liegt damit derzeit noch in keinem Programm vor. Dies ist wohl mit dem geringen "Alter" der Forschungsergebnisse zu erklären.

Die **Gleichungslösung** findet im linearen Bereich noch mit direkten Eliminationsmethoden und nicht mit iterativen Lösern statt, was wohl mit der Größe der Aufgaben mit derzeit meist überschaubaren Unbekanntenzahlen zu erklären ist. Für **nichtlineare Probleme** wird in den beiden Programmen [65, 55] mit Möglichkeiten zur nichtlinearen Berechnung ein Quasi-Newton Verfahren eingesetzt. Damit läßt sich die Implementierung von konsistenten Tangentenmatrizen umgehen und für viele nichtlineare Probleme eine Lösung bei ausreichender Konvergenz erzielen. Dies bedeutet für die Softwareerstellung eine deutliche Aufwandsreduktion. Allerdings sind damit auch bei sinnvollen Schrittweiten eventuell Schwierigkeiten mit der Konvergenz bei stark nichtlinearen Aufgaben verbunden.

Kontakt ist zwar für Anschlußprobleme im Stahl- und Holzbau sowie für nichtlineare Probleme beim Versagen von Strukturen und auch bei dynamischen Problemen von großer Wichtigkeit, kann aber in den Programmen nur über nichtlineare Federn - wenn vorhanden - abgebildet werden. Eine Kontaktbehandlung in größerem Umfang ist in keinem der untersuchten Programme enthalten.

Fragen der automatischen **Optimierung** scheinen im Bauwesen noch keine Marktbedeutung zu haben. Obgleich bereits umfangreiche Optimierungspakete an Hochschulen existieren, sind noch in keinem Programm hierzu Möglichkeiten vorgesehen.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, dass die Berechnungssoftware unter dem Gesichtspunkt der implementierten Methoden nur an einigen Stellen die neueren methodischen Entwicklungen enthält. Wesentliche Entwicklungen der letzten Jahre, insbesondere Schalelemente, nichtlineare Materialgesetze, nichtlineare Lösungsverfahren und Zeitintegrationsverfahren, sowie Methoden zur Stabilitätsanalyse allgemeiner Tragwerke sind nicht eingebaut. Dies ist zum größten Teil nicht eine Frage der technischen Möglichkeiten der Softwarehersteller, sondern eine Frage der Orientierung an den wesentlichen Anforderungen des Marktes und der für Einzelentwicklungen und Wartung bereitzustellenden Mittel.

Ergänzend soll erwähnt werden, dass im Gegensatz hierzu fast alle methodischen Entwicklungen der Hochschulen im In- und Ausland in die großen Finite Element Pakete [5, 44, 1, 35], die im wesentlichen im Großanlagen-, Maschinen-, Automobil- und Flug-

zeugbau, sowie in der Elektro- und Chemieindustrie eingesetzt werden, Eingang gefunden haben. Dort werden die in der Bausoftware nicht enthaltenen Methoden häufiger benötigt. Der wesentliche Unterschied zwischen den beiden Softwareangeboten besteht in der klaren Ausrichtung der Bausoftware auf die spezifischen Anforderungen der Bauwirtschaft, d.h. Anpassung an Normen, Ausgabe von Bewehrungsplänen, Ankoppelung an CAD und Abrechnung, und außerdem in der für viele Softwareanwender wichtigen Möglichkeit der Beschränkung auf Einzelmodule.

5 Zusammenfassung und Ausblick

An Hand einer Befragung von Softwareherstellern und einiger Testprobleme wurde versucht, einen Überblick über den gegenwärtigen Stand der Berechnungssoftware im Bauwesen zu geben. Festgestellt wurde, dass für die derzeit wesentlichen Standardanforderungen zur Berechnung von Stab- und Plattentragwerken ausreichende Software vorliegt. Viele methodische Weiterentwicklungen der letzten Jahre haben allerdings noch keinen Eingang in die meisten Programme gefunden, wobei sicher als Hauptgründe die nicht vorhandenen Anforderungen der Anwender und auch die bislang nicht ausreichende Rechnerleistung anzuführen sind. Beides, die Forderungen und die Rechnerleistungen werden in den nächsten Jahren wachsen, so dass nicht nur in der Handhabung und im Komfort der Rechenprogramme, sondern auch in methodischer Hinsicht wesentliche Erweiterungen in nächster Zeit zu erwarten sind.

Die laufenden Entwicklungen der Softwarehersteller sind in der Untersuchung nicht berücksichtigt. Die meisten Softwarehersteller teilten während der Befragungsaktion mit, an vielen methodischen Bereichen ihrer Software in der nächsten Zeit weiteren Ausbau vorzunehmen. Die vorliegende Übersicht ist deshalb nur als eine globale Betrachtung zu werten, bei der einzelne Urteile schnell überholt sein können.

Dominiert wird die Entwicklung im Bereich der Handhabung und des Pre- und Postprozessing, da hier der Benutzer zeitlich und damit kostenwirksam sofort Vorteile bemerkt. Hier wird sich – natürlich auch preisabhängig – der Wettbewerb am Markt direkt auswirken. Daher ist als wesentlichste Entwicklung in den nächsten Jahren der Einbau von Fehlerschätzern und adaptiven Methoden, d.h. die automatische Netzanpassung, einzuschätzen, die für die Benutzer von Programmen zur Berechnung von Flächentragwerken

eine wesentliche Erleichterung bringen wird. Bei einer guten Schnittstelle zwischen Geometrieerstellung (CAD-Programm) und FEM-Analyse kann hier eine erhebliche Verringerung des manuellen Aufwandes erreicht werden. Ein fernes, aber für viele Fälle erreichbares Ziel ist der Einschluß der Modellbildung in die adaptive FEM-Analyse durch Einsatz der Modelladaptivität.

Im Zeitalter steigender Sicherheitsanforderungen und wirtschaftlicherer Tragwerksauslegung gewinnen nichtlineare Methoden an Bedeutung, d.h. auch nichtlineare Schalelemente mit doppelter Krümmung werden von den Benutzern bald verlangt werden. Während der Berechnungsaufwand für materiell nichtlineare Aufgaben mit elasto-plastischen Werkstoffen auch auf PC-Rechnern bereits jetzt überschaubar ist, ist für komplexere Werkstoffe wie Beton, sofern sie nicht durch elasto-plastische Werkstoffmodelle angenähert werden, noch lange mit sehr hohem Aufwand zu rechnen. Dies gilt auch für Zeitverlaufsanalysen mit nichtlinearen Materialien, d.h. Software mit diesen Möglichkeiten wird nur vereinzelt erstellt werden.

6 Nutzung und erforderliche Ausbildung

Die verbesserten Berechnungsmöglichkeiten werden sich nur unwesentlich auf einfache überschaubare Standardprobleme auswirken, die erfahrene Ingenieure mit geringem Aufwand und großer Sicherheit bewältigen. Hier kann allerdings unter Nutzung einfacher Hilfsprogramme z.B. Tabellenkalkulationssysteme ein höherer Effizienzgrad und größere Beweglichkeit bezüglich Konstruktionsänderungen im späteren Stadium der Projektbearbeitung erreicht werden. Der wesentliche Vorteil des Einsatzes von Berechnungsprogrammen ist in der erhöhten Qualität, besserer Beurteilbarkeit und damit größerer Sicherheit zu sehen. Sollte dies allerdings in größerem Maße unter dem Aspekt der Kostenoptimierung zur Ausnutzung der Tragwerksreserven verwendet werden, wird die sonst bei einfachen Modellen häufig vorhandene mehrfache Sicherheit eventuell überstrapaziert. Hiervor ist zu warnen.

Im Anwendungsbereich ist ein deutlicher Mangel im Wissen um die theoretischen Hintergründe der implementierten Methoden festzustellen. Dies betrifft vor allem die nichtlinearen Methoden zur Analyse, aber z.B. auch die sinnvolle Verwendung von Finite-Element-Programmen zur Plattenberechnung. Bei letzterem ist der Gegensatz Kirchhoff

– Reissner/Mindlin- Theorie und die damit verbundenen Eigenheiten z.B. Eckensingularitäten, Randschichtprobleme bei Auflagern eine stete Quelle unsicherer Analysen. Hier können nur hinreichende Kenntnisse der verwendeten Theorien und die zugehörige Information der Softwarehersteller über ihre Implementierung im Programm zur Abhilfe führen.

Nur mit ständiger Fortbildung der Ingenieure in der Praxis – weit mehr als bisher – erscheint uns eine sinnvolle Handhabung, d.h. die Entwicklung guter und effizienter Ingenieurmodelle, möglich. Trotz fortschreitender Automatisierung kann nicht auf vertiefte Kenntnisse verzichtet werden.

Literatur

1. **ABAQUS**: Finite-Element-Programmsystem. Hibbitt, Karlson & Sorenson Inc. (1991)
2. **Ackermann, Th.**: Traglastberechnung räumlicher Rahmen aus Stahl- oder Leichtmetallprofilen mit dünnwandigen, offenen Querschnitten. Dissertation Institut für Baustatik, Universität Karlsruhe (1981)
3. **Allman, D.J.**: Compatible Triangular Element Including Vertex Rotations for Plane Elasticity Analysis. *Computers & Structures* 19 (1984) 1–8
4. **Andelfinger, U.**: Untersuchung zur Zuverlässigkeit hybrid-gemischter Finiten Elemente für Flächentragwerke. Dissertation, Universität Stuttgart (1991)
5. **ANSYS**: Engineering Analysis System (Programmsystem), Swanson Analysis System Inc., Houston, Pennsylvania (USA) (1989)
6. **Babuška, I.; Rheinboldt, W.**: Error Estimates for Adaptive Finite Elemente Computations. *SIAM J. Num. Anal.* 15 (1978) 736–754
7. **Başar, Y.**: A consistent theory of geometrically nonlinear shells with an independent rotation vector. *Int. J. Solids and Structures* 23 (1987) 1401–1445
8. **Bathe, K.-J.**: Finite Elemente Methoden. Springer-Verlag, Berlin (1986)
9. **Bathe, K.-J.; Dvorkin, E.N.**: A four-node plate bending element based on Mindlin/Reissner plate theory and a mixed interpolation. *Int. J. Num. Meth. Eng.* 21 (1985) 367–383
10. **Bathe, K.-J.; Dvorkin, E.N.**: A formulation of general shell elements – The use of mixed interpolation of tensorial components. *Int. J. Num. Meth. Eng.* 22 (1986) 697–722
11. **Batoz, J.L.; Bathe, K.-J.; Ho, L.-W.**: A study of three-node triangular plate bending elements. *Int. J. Num. Meth. Eng.* 15 (1980) 1771–1812
12. **Batoz, J.L.**: An explicit formulation for an efficient triangular plate element. *Int. J. Num. Meth. Eng.* 18 (1982) 1077–1089
13. **Batoz, J.L.; Tahar, M.B.**: Evaluation of a new quadrilateral thin plate bending element. *Int. J. Num. Meth. Eng.* 18 (1982) 1655–1677
14. **Batoz, J.L.; Lardeur, P.**: A discrete shear triangular nine dof element for analysis of thick to very thin plates. *Int. J. Num. Meth. Eng.* 28 (1989) 533–560

15. **Baumann, M.; Schweizerhof, K.; Andrussow, S.:** An efficient mixed hybrid 4-node shell element with assumed stresses for membrane, bending and shear parts. *Eng. Comp.* 11 (1994) 69–80
16. **Becker, A.; Barthold, F.-J.:** Einfluß der Strukturoptimierung auf das Stabilitätsverhalten von Struktur- und Flächentragwerken. in: *Finite Elemente – Anwendungen in der Baupraxis*, Eibl J., Obrecht H., Wriggers P., ed. Ernst & Sohn, Berlin (1991) 603–612
17. **Computers and Structures Inc.:** SAP 90 (Finite-Element-Programmsystem). Berkeley, California (USA), COMPUTERS & ENGINEERING, Lollar (1992)
18. **Ding, Y.:** Finite Rotations-Elemente zur geometrisch nichtlinearen Analyse allgemeiner Flächentragwerke. *Techn. - Wiss. Mitt. Nr. 89–6*, KIB, Ruhr-Universität Bochum (1989)
19. **Gebbeken, N.:** Eine Fließgelenktheorie höherer Ordnung für räumliche Stabtragwerke. Dissertation, Institut für Statik, Universität Hannover (1988)
20. **Gebhardt, H.:** Finite Element Konzepte für schubelastische Schalen mit endlichen Drehungen. Dissertation, Institut für Baustatik, Universität Karlsruhe (1990)
21. **Gruttman, F.; Stein, E.; Wriggers, P.:** Theory and numerics of thin elastic shells with finite rotations. *Ing. Archiv* 59 (1989) 54–67
22. **Hackbusch, W.:** Iterative Lösung großer schwach besetzter Gleichungssysteme. Teubner-Verlag, Stuttgart (1991)
23. **Hallquist, J.O.; Goudreau, G.L.; Benson, D.J.:** Sliding Interfaces with Contact-Impact in Large-Scale Lagrangian Computations. *Comp. Meth. Appl. Mech. Eng.* 51 (1988) 107–137
24. **Harte, R.:** Doppelt gekrümmte Dreieckselemente für die lineare und geometrisch nichtlineare Berechnung allgemeiner Flächentragwerke. *Techn. - Wiss. Mitt. Nr. 82–10*, Inst. für KIB, Ruhr-Universität Bochum (1982)
25. **Hilber, H.M.; Scharpf, D.W.:** CAD-Berichte; Implementierung und Anwendung von hybriden Plattenelementen. *KfK-CAD* 120 (2/1979)
26. **Hoff, C.; Pahl, P.J.:** Development of an implicit method with numerical dissipation from a generalized single-step algorithm for structural dynamics. *Comp. Meth. Appl. Mech. Eng.* 67 (1988) 367–385
27. **Hofstetter, G.:** Physikalisch und geometrisch nichtlineare Traglastanalysen von Spannbetonscheiben, -platten und -schalen mittels der Methode der Finiten Elemente. Dissertation,

TU Wien (1987)

28. **Hohberg, J.-M.:** A joint element for the nonlinear dynamic analysis of arch dams. Dissertation, ETH Zürich (1991)
29. **Hughes, T.J.R.:** The Finite Element Method. Prentice Hall, Englewood Cliffs (1987)
30. **Hughes, T.J.R.; Brezzi, F.:** On Drilling Degrees of Freedom. *Comp. Meth. Appl. Mech. Eng.* 72 (1989) 105–121
31. **Hughes, T.J.R.; Tezduyar, T.E.:** Finite elements based upon Mindlin plate theory with particular reference to the four-node bilinear isoparametric element. *Jour. Appl. Mech.* 48 (1981) 587–596
32. **IAS Software GmbH:** STAAD-III/ISDS (Programmsystem). Bensheim (1992)
33. **Ibrahimbegovic, A.; Taylor, R.L.; Wilson, E.L.:** A robust quadrilateral membrane finite element with drilling degrees of freedom. *Int. J. Num. Meth. Eng.* 30 (1990) 445–457
34. **Ing.-Software Dlubal GmbH:** RSTAB (Programmsystem). Tiefenbach (1992)
35. **INTES GmbH:** PERMAS (Finite-Element-Programmsystem). Stuttgart (1991)
36. **ISATEC GmbH:** ISATEC (Programmsystem). Kiel (1992)
37. **Kollegger, J.:** Ein Materialmodell für die Berechnung von Stahlbetonflächentragwerken. Dissertation, Kassel (1988)
38. **Lyly, M.; Stenberg, R.; Vihinen, T.:** A stable bilinear Element for the Reissner–Mindlin Plate Model. *Comp. Meth. Appl. Mech. Eng.* 110 (1993) 343–357
39. **Maier, D.:** Traglastberechnung räumlicher Stabwerke aus Stahl und Leichtmetall unter Berücksichtigung der Schubweichheit. Dissertation, Institut für Baustatik, Universität Karlsruhe (1986)
40. **Matthies, H.; Strang, G.:** The solution of nonlinear finite element equations. *Int. J. Num. Meth. Eng.* 14 (1979) 1613–1626
41. **Matzenmiller, A.:** Ein rationales Lösungskonzept für geometrisch und physikalisch nicht-lineare Strukturberechnungen. Dissertation, Universität Stuttgart (1988)
42. **mb – Programme:** MicroFe (Finite-Element-Programmsystem); Baustatik (Sammlung von Programmmodulen). mb-Programme Software im Bauwesen GmbH, Hameln (1992)

43. **MacNeal, R.; Harder, R.L.:** A proposed standard set of problems to test finite element accuracy. *Finite Elements in Analysis and Design* 1 (1985) 3–20
44. **MSC–NASTRAN:** Finite-Element-Programmsystem. MacNeal Schwendler Corp., München (1991)
45. **Mücke Software GmbH:** IFESCAD (Programmsystem). Lohmar/Dresden (1992)
46. **Nemetschek Programmsystem GmbH:** ALLSTAR (Sammlung von Programmmodulen); ALLFEM (Finite-Element-Programmsystem). München (1990)
47. **Osterrieder, P.:** Traglastberechnung von räumlichen Stabtragwerken bei großen Verformungen mit finiten Elementen. Dissertation, Universität Stuttgart (1983)
48. **Pian, T.H.H.; Sumihara, K.:** Rational approach for assumed stress finite elements. *Int. J. Num. Meth. Eng.* 20 (1984) 1685–1695
49. **Ramm, E.:** Strategies for tracing the nonlinear response near limit points. in: *Nonlinear Finite Element Analysis in Structural Mechanics*. Bathe K.-J., Stein E., Wunderlich W., ed., Springer-Verlag, Berlin (1980) 63–89
50. **Ramm, E.; Stander, N.; Stegmüller, H.:** Gegenwärtiger Stand der Methode der finiten Elemente. in: *Finite Elemente – Anwendungen in der Baupraxis*. Wunderlich W., Stein E., ed., Berlin (1988)
51. **Ramm, E.; Bletzinger, K.-U.; Kimmich, S.:** Strukturoptimierung – Akademische Spielereien oder nützliche Entwurfshilfe? in: *Finite Elemente – Anwendungen in der Baupraxis*, Eibl J., Obrecht A., Wriggers P., ed. Ernst & Sohn, Berlin (1991) 669–681
52. **Rank, E.; Roßmann, A.:** Fehlerabschätzungen und automatische Netzanpassung bei Finite-Element-Berechnungen. *Bauingenieur* 62 (1987) 449–454
53. **RIB/RZB GmbH:** TRIMAS (Programmsystem). Stuttgart (1992)
54. **Riks, E.:** An incremental approach to the solution of snapping and buckling problems. *Int. J. Solids and Structures* 15 (1979) 529–551
55. **Rothe + Baumgart GbR:** MicroSNAP (Programmsystem). Griesheim (1992)
56. **Rubin, H.:** Drehwinkelverfahren zur Berechnung biegesteifer Stabwerke nach Elastizitäts- oder Fließgelenktheorie I. und II. Ordnung unter Berücksichtigung von Vorverformungen. *Bauingenieur* 55 (1980) 81–92 und 147–155

57. **Rust, W.:** Mehrgitterverfahren und Netzadaption für lineare und nichtlineare statische Finite-Element-Berechnungen von Flächentragwerken. Dissertation, Universität Hannover (1991)
58. **Schmidt-Göner, G.:** Softwarevergleich - Rahmenprogramme. Bauinformatik 2 (1991) 205–210
59. **Schweizerhof, K.:** Quasi-Newton Verfahren und Kurvenverfolgungsalgorithmen für die Lösung nichtlinearer Gleichungssysteme in der Strukturmechanik. Schriftenreihe Heft 9, Inst. für Baustatik, Universität Karlsruhe (1989)
60. **Schweizerhof, K.; Andrussow, S.; Baumann, M.:** Moderne Finite Elementkonzepte für ebene und achsensymmetrische Probleme. in: Finite Elemente – Anwendungen in der Baupraxis, Eibl J., Obrecht H., Wriggers P., ed. Ernst & Sohn, Berlin (1991) 47–59
61. **Simo, J.C.; Taylor, R.L.:** Consistent tangent operators for rate-independent elastoplasticity. Comp. Meth. Appl. Mech. Eng. 48 (1985) 101–118
62. **Simo, J.C.; Fox, D.D.:** On a stress resultant geometrically exact shell model. Part I: Formulation and Optimal Parametrization. Comp. Meth. Appl. Mech. Eng. 72 (1989) 267–304. On a stress resultant geometrically exact shell model. Part II: The Linear Theory, Computational Aspects. Comp. Meth. Appl. Mech. Eng. 73 (1989) 53–92
63. **Simo, J.C.; Armero, F.:** Geometrically non-linear enhanced strain mixed methods and the method of incompatible modes. Int. J. Num. Meth. Eng. 33 (1992) 1413–1449
64. **Simo, J.C.; Rifai, M.S.:** A class of mixed assumed strain methods and the method of incompatible modes. Int. J. Num. Meth. Eng. 29 (1990) 1595–1638
65. **Sofistik GmbH:** ASE/ASS (Programmsystem für die Berechnung von Flächentragwerken), STAR2/3 (Programmsysteme für die Berechnung von Stabtragwerken); SHELLS (Programmsystem für die Berechnung von Rotationsschalen). Oberschleißheim (1992)
66. **Stander, N.; Matzenmiller, A.; Ramm, E.:** An assessment of assumed strain methods in finite rotation shell analysis. Eng. Comp. 6 (1989) 57–66
67. **Stein, A.:** Was kann eine FEM–CAD– Schnittstelle zur Erstellung von Bewehrungsplänen liefern? in: Finite Elemente in der Baupraxis, ed. Eibl J., Obrecht H., Wriggers P., Karlsruhe (1991) 373–382
68. **Stein, E.; Wagner, W.; Lambertz, K.H.:** Geometrically nonlinear theory and incremental analysis of thin shells. in: Flexible Shells, Theory and Applications. Springer-Verlag,

Berlin (1984) 22–43

69. **Stein, E.; Ohnimus, S.; Seifert, B.; Mahnken, R.:** Adaptive Finite-Element-Methoden im Konstruktiven Ingenieurbau. in: Baustatik–Baupraxis 5 (1993)
70. **Stempniewski, L.:** Flüssigkeitsgefüllte Stahlbetonbehälter unter Erdbebeneinwirkung. Dissertation, Universität Karlsruhe (1990)
71. **Taylor, R.L.; Beresford, P.J.; Wilson, E.L.:** A non-conforming element for stress analysis. *Int. J. Num. Meth. Eng.* 10 (1976) 1211–1219
72. **Taylor, R.L.; Simo, J.C.:** Bending and membrane elements for analysis of thick and thin shells. *Proceedings of the NUMETA Conference, Swansea* (1985)
73. **Thierauf, G.:** Optimale Bemessung und Optimierung im konstruktiven Ingenieurbau. *Bauingenieur* 64 (1989) 463–472
74. **Vogel, U.:** Die Traglastberechnung stählerner Rahmentragwerke nach der Plastizitätstheorie II. Ordnung. (Habil.schrift) *Forschungshefte aus dem Gebiet des Stahlbaus* 15 (1965)
75. **Vogel, U.:** Recent ECCS-Developments for Simplified Second-Order Elastic and Elastic-Plastic Analysis of Sway Frames. *Stability of Metal Structures, Third Int. Colloquium, Final Report, Paris* (1983) 217–224
76. **Vogel, U.:** Calibrating Frames – Vergleichsberechnungen an verschieblichen Rahmen. *Stahlbau* 10 (1985) 295–301
77. **Wagner, W.; Gruttmann, F.:** A Simple Finite Rotation Formulation for Composite Shell Elements. *Eng. Comp.* 11 (1994) 145–176
78. **Walder, U.:** Beitrag zur Berechnung von Flächentragwerken nach der Methode der Finiten Elemente. *ETH Zürich* (1977)
79. **Wedemeier, W.:** Beiträge zur Theorie und Numerik von Materialien mit innerer Reibung am Beispiel des Werkstoffes Beton. Dissertation, Universität Hannover (1990)
80. **Wriggers, P.:** Konsistente Linearisierungen in der Kontinuumsmechanik und ihre Anwendung auf die Finite-Elemente-Methode. Habilitation, Universität Hannover (1988)
81. **Wriggers, P.; Simo, J.C.:** A note on tangent stiffness for fully nonlinear contact problems. *Communications Appl. Num. Mech.* 1 (1985) 199–203
82. **Wriggers, P.; Simo, J.C.:** A General Procedure for the Direct Computation of Turning and Bifurcation Points. *Int. J. Num. Meth. Eng.* 30 (1990) 155–176

83. **Wriggers, P.; Wagner, W.; Mieke, C.:** A Quadratically Convergent Procedure for the Calculation of Stability Points in Finite Element Analysis. *Comp. Meth. Appl. Mech. Eng.* 70 (1988) 329–347
84. **Wunderlich, W.; Obrecht, H.; Schnabel, F.:** Tragverhalten von Behälterböden und Kugelschalen – Die Finite-Element-Methode als Werkzeug zur Aufstellung von Entwurfshilfen. in: *Finite Elemente – Anwendungen in der Baupraxis*, Wunderlich W., Stein E., ed., Ernst & Sohn, Berlin (1988) 155–166
85. **Wunderlich, W.; Koop, K.H.; Lu, Z.; Obrecht, H.:** Elastoplastisches Beulverhalten von Behältern – Nichtrotationssymmetrische Effekte. *Schlußbericht, AIF Forschungsvorhaben* 6269 (1989)
86. **Wunderlich, W.; Obrecht, H.:** Tragfähigkeit zusammengesetzter Rotationsschalen im geometrisch und physikalisch nichtlinearen Bereich. in: *Nichtlineare Berechnungen im Konstruktiven Ingenieurbau*, Stein E. (Hrsg), Springer-Verlag, Berlin (1989) 176–203
87. **Zhuang, Y.:** Ein Stahlbeton – Mehrschichten – Modell zur Kollapsanalyse großer Naturzugkühltürme. *Techn. - Wiss. Mitt. Nr. 90–7*, Inst. fr KIB, Ruhr–Universität Bochum (1990)
88. **Zienkiewicz, O.C.:** *Methode der Finiten Elemente*. Hanser-Verlag, München (1984)
89. **Zienkiewicz, O.C.; Zhu, J.Z.:** A Simple Error Estimator and Adaptive Procedure for Practical Engineering Analysis. *Int. J. Num. Meth. Eng.* 24 (1987) 334–357
90. **Zienkiewicz, O.C.; Zhu, J.Z.:** Error Estimates and Adaptive Refinement for Plate Bending Problems. *Int. J. Num. Meth. Eng.* 28 (1989) 2839–2853
91. **Zienkiewicz, O.C.; Zhu, J.Z.:** The superconvergent patch recovery (SPR) and adaptive finite element refinement. *Comp. Meth. Appl. Mech. Eng.* 101 (1992) 207–224

Adressen der Autoren

Prof. Udo Vogel
Dr.-Ing. Wolfgang Heil
Dipl.-Ing. Roland Sauer

Institut für Baustatik
Postfach 6980
D - 76128 Karlsruhe

Prof. Karl Schweizerhof
Institut für Mechanik
Postfach 6980
D - 76128 Karlsruhe

Tabelle 1: Anwendungsbereiche der Berechnungssoftware mit Bezug auf Tragsysteme

Programmsysteme (siehe unten)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Stabwerke										
zweidimensional	j	j	j	j	j	j	j	j	j	j
dreidimensional	j	j	j	j	j	j	j	j	j	j
Rahmentragwerke	j	j	j	j	j	j	j	j	j	j
Fachwerke	j	j	j	j	j	j	j	j	j	j
Trägerroste	j	j	j	j	j	j	j	j	j	j
Flächentragwerke										
Platten	j	j	j	j	j	j	j	n	j	j
Scheiben	n	j	j	j	j	j	j	n	j	j
Rotationsschalen	n	j	n	-	n	n	j	n	j	n
flache Schalen	n	j	j	j	j	j	j	n	j	j
doppelt gekrümmte Schalen	n	n	n	-	n	n	n	n	j	n

j = ja
n = nein
- = keine Angaben

1 ISATEC [36] | 2 STAAD-III/ISDS [32] | 3 IFESCAD [45] | 4 MicroFe [42] | 5 MicroSNAP [55]
6 STAR2 / ASE [65] | 7 ALLFEM / ALLSTAR [46] | 8 RSTAB [34] | 9 SAP 90 [17] | 10 TRIMAS [53]

Tabelle 2: Generelle bersicht ber Berechnungsmglichkeiten bezglich Statik, Dynamik und nichtlinearen Problemen

Programmsysteme (siehe unten)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Statik	j	j	j	j	j	j	j	j	j	j
Nichtlineare Berechnungsmglichkeiten										
Theorie II. Ordnung (fr Stbe)	j	j	j	j	j	j	j	j	j	j
Fliegelenktheorie (ebene Systeme)	-	-	n	n	n	j	j	n	j	j
Fliezonentheorie	-	-	n	n	j	j	-	n	n	n
geometrisch nichtlinear (allgemein)	-	-	n	n	t [*])	t [*])	n	-	n	t [*])
materiell nichtlinear (allgemein)	-	-	n	n	j	j	n	-	n	t [*])
Dynamik										
Eigenfrequenzen, Eigenformen	n	j	j	j	j	j	j	j	j	t [*])
Antwortspektrenverfahren	n	j	n	j	j	j	j	j	j	n
Zeitverlaufsanalysen	n	j	n	j	j	j	j	n	j	n

j = ja
n = nein
t = teilweise
- = keine Angaben
*) = fr Stabtragwerke

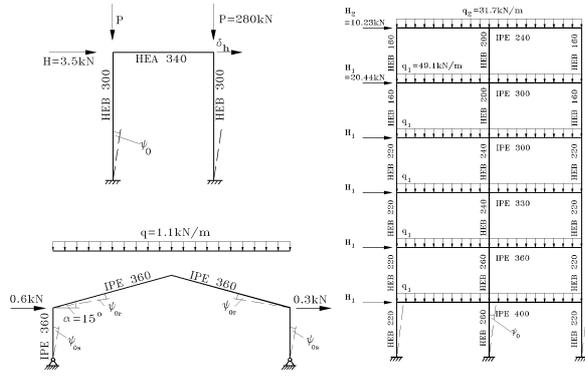
1 ISATEC [36] | 2 STAAD-III/ISDS [32] | 3 IFESCAD [45] | 4 MicroFe [42] | 5 MicroSNAP [55]
6 STAR2 / ASE [65] | 7 ALLFEM / ALLSTAR [46] | 8 RSTAB [34] | 9 SAP 90 [17] | 10 TRIMAS [53]

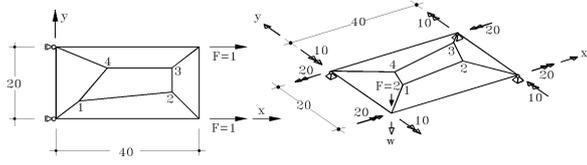
Tabelle 3: Finite Elemente für Scheibeberechnungen

	Scheibenelemente	
Programm	Elementform	Ansatz
ASE [65]	Dreieck Viereck	Verschiebung bilinear (CST – Element) nichtkonformes Element nach [71]
ALLFEM [46]	Drei-, Viereck	bilinearer Verschiebungsansatz
TRIMAS [53]	Viereck	bilineares isoparametrisches Element mit reduziert integriertem Schubanteil nach [25]
MicroSNAP [55]	Drei-, Viereck Viereck	isoparametrische Elemente (linear – quadratisch) gemischt hybrides Element nach [48]
SAP 90 [17]	Drei-, Viereck	isoparametrische Elemente (linear – quadratisch)
MicroFe [42]	Drei-, Viereck	hybrider Verschiebungsansatz nach [78]
IFESCAD [45]	Drei-, Viereck	Verschiebungsansätze

Tabelle 4: Finite Elemente für Plattenberechnungen

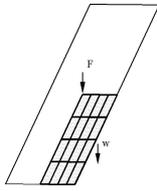
	Plattenelemente		
Programm	Elementform	Ansatz	Theorie
ASE [65]	Drei-, Viereck	bilineares Element nach [31] zusätzlich nichtkonforme Anstze	Mindlin
ALLFEM [46]	Drei-, Viereck	DST-, DKQ- Element nach [11, 14]	Mindlin - Kirchhoff
TRIMAS [53]	Drei-, Viereck	hybrider Verschiebungsansatz nach [25]	Kirchhoff
MicroSNAP [55]	Drei-, Viereck	DST-, DKQ- Element nach [11, 13]	Mindlin - Kirchhoff
SAP 90 [17]	Viereck	DKQ- Element nach [13, 72]	Mindlin - Kirchhoff
MicroFe [42]	Drei-, Viereck	hybrider Verschiebungsansatz nach [78]	Kirchhoff
IFESCAD [45]	Drei-, Viereck	Verschiebungselemente mit hybriden Spannungsansätzen	Kirchhoff
	Drei-, Viereck	modif. DST-, DKQ- Element nach [13]	Mindlin - Kirchhoff



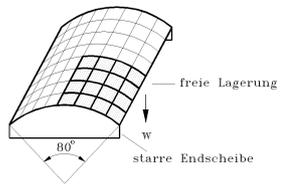


a)

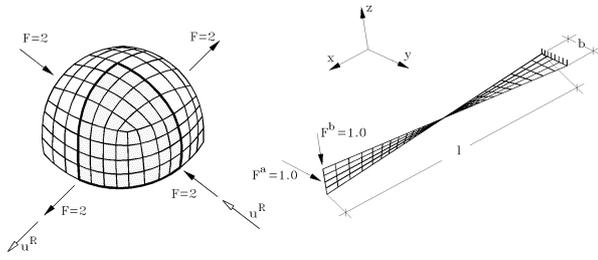
b)



a)



b)



a)

b)

Fig. 1. "Eichrahmen" nach [76] — Calibrating frames

Fig. 2. **a)** Scheiben-, **b)** Platten-Patch-Test (Test 2) — Patch test for **a)** plane stress elements and **b)** plate elements

Fig. 3. **a)** Dünne Rechteckplatte (Test 2), **b)** Tonnendach (Test 3) — **a)** Thin rectangular plate, **b)** Scordelis-Lo roof

Fig. 4. **a)** Halbkugel, **b)** Verdrillter Kragarm — **a)** Hemispherical shell, **b)** Twisted beam