

Softwaregestützte Tragwerksberechnung – Qualitätssicherung nach VDI-Ri 6201

Reinhard Harte, Kirsten Stopp

Statik und Dynamik der Tragwerke

Abteilung Bauingenieurwesen, Bergische Universität Wuppertal

D-42285 Wuppertal

Email: harte@uni-wuppertal.de

Zusammenfassung

Bisher fehlte in Deutschland eine Qualitätssicherung für die Entwicklung und Anwendung von Software für die Tragwerksplanung. Diese Lücke soll die Richtlinie VDI 6201 schließen und damit zugleich eine höhere Akzeptanz der softwaregestützten Tragwerksberechnung im internationalen Wettbewerb ermöglichen.

Abstract

So far, there is a lack of quality assurance for the development and application of software for structural engineering in Germany. The guideline VDI 6201 is intended to fill this gap and to allow a greater acceptance of software-based structural analysis in international competition.

1 Einleitung

Die Entwicklung und die Anwendung von Software für die Tragwerkplanung sind in Deutschland nicht geregelt. Statik-Software kann von jedermann auf den Markt gebracht und ebenfalls von jedermann angewendet werden. Für die Qualitätssicherung bestehen weder auf Hersteller- noch auf Anwenderseite spezifische Vorgaben oder allgemein gültige Richtlinien. Wenn aber die Anwendungsgrenzen und die theoretischen Hintergründe der Software unklar bleiben, die Folgen veralteter Programmversionen nicht bekannt sind und schließlich die Programme selbst Fehler aufweisen, dann sind sicherheitsrelevante Mängel bei der Tragwerksplanung unvermeidlich und können im Grenzfall Tragwerkseinstürze bewirken. Zudem führen unübersichtliche Ein- und Ausgaben und unklare Kenntnisse über den theoretischen Hintergrund der verwendeten Software zu unnötigen Diskussionen zwischen Entwurfsverfassern, Prüfsingenieuren und Baufirmen.

Diese Bestandsaufnahme hat den VDI zur Bildung eines Richtlinienausschusses veranlasst, um im Sinne der Sicherheit höhere Qualitätsansprüche an Software durchzusetzen und die Akzeptanz deutscher Software im Ausland zu verbessern. Beides sollte erklärtes Ziel aller an der softwaregestützten Tragwerksberechnung Beteiligten sein – Softwarehersteller und Softwareanwender, Tragwerksplaner und Prüfsingenieure. Der vorliegende Beitrag berichtet über den Stand der Arbeit des Richtlinienausschusses zur Richtlinie VDI 6201, die in zwei Teilen – Blatt 1 und Blatt 2 – veröffentlicht wird (Bild 1). Der Gründruck von Blatt 1 ist im September 2014 veröffentlicht worden.

ICS 35.080, 91.010.30 VDI-RICHTLINIEN September 2014		
VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE	Softwaregestützte Tragwerksberechnung Grundlagen, Anforderungen, Modellbildung	VDI 6201 Blatt 1 <i>Entwurf</i>
ICS ##.###.### VDI-RICHTLINIEN ##### 20##		
VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE	Softwaregestützte Tragwerksberechnung Evaluierungsbeispiele	VDI 6201 Blatt 2 <i>Entwurf</i>
ICS ##.###.### VDI-RICHTLINIEN ##### 20##		
VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE	Softwaregestützte Tragwerksberechnung Evaluierungsbeispiele Beispiel 1	VDI 6201 Blatt 2.1 <i>Entwurf</i>

Abb. 1 Struktur der VDI-Richtlinienreihe 6201 [1, 2]

Grundlage der Richtlinie bildet die VDI 1000 [3] in Verbindung mit den Grundsätzen der Normungsarbeit nach DIN 820 und den Hinweisen des VDI-Richtlinien-Redaktionshandbuchs [4].

2 Begriffe und Modellbildung

Reale Bauwerke müssen zunächst in geeignete Modelle überführt werden, die durch Verkürzung der Gesamtheit ihrer Eigenschaften auf die für den jeweiligen Betrachtungsfall maßgeblichen Eigenschaften entstehen. So werden die *Entwurfsmodelle* des Architekten vom Tragwerksplaner in *statische Modelle* (statische Systeme) überführt, die dann übertragen werden in *Bemessungsmodelle*, die den Grenzzustandsbedingungen der Baustoffnormen genügen. Bei den mittlerweile immer komplexeren Tragstrukturen ist dann die Überführung in ein *numerisches Rechenmodell* mit einem für die Problemlösung geeigneten mechanischen oder mathematischen Hintergrund erforderlich. Die bei der Überführung in das *numerische Modell* und bei der Interpretation der resultierenden Ergebnisse entstehenden Problemfelder wurden bereits verschiedentlich thematisiert [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12].

Die Stufen der Modellbildung sind in der Literatur bisher unterschiedlich eingeführt worden [6, 7, 13]. Ziel einer Richtlinie soll es u.a. sein, Begriffe und technische Sprachregelungen zu harmonisieren. Dabei soll jeder Benennung nach Möglichkeit nur ein Bedeutungsinhalt (Definition) zugewiesen werden [4]. Abgesehen von den baustofforientierten *Bemessungsmodellen*, die zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht Gegenstand der Richtlinienreihe VDI 6201 sein sollen, lassen sich die für die Tragwerksberechnung relevanten Modelle nach Ansicht des Richtlinienausschusses wie folgt einstufen und benennen [1]:

Strukturmodell

Abbild des wirklichen Bauwerks, das auf die tragverhaltensrelevanten Komponenten verkürzt wurde (statisches System: eben oder räumlich, ein-, zwei- oder dreidimensionale Tragelemente, Lagerungen und Randbedingungen, idealisierte Einwirkungen); das *Strukturmodell* kann das Tragwerk in Teilstrukturen oder als Gesamtstruktur abbilden.

Mechanisches Modell

Wahl geeigneter mechanischer Abstraktionen/Grundgleichungen für die Bearbeitung des *Strukturmodells* im Hinblick auf die Bestimmung einer wirklichkeitsnahen Tragwerksantwort unter den gegebenen Einwirkungen (lineare und nichtlineare Theorie, Stabilitätstheorie, Zeitabhängigkeit, Materialverhalten u. ä.).

Numerisches Modell

Wahl geeigneter Rechenalgorithmen in Software-Produkten für die Lösung des *Mechanischen Modells*, z.B. bei der Finite-Elemente-Methode die Diskretisierung der kontinuierlichen Informationen des *Mechanischen Modells* in den einzelnen Knotenpunkten.

Neben einer Präzisierung von Begriffen zum *Strukturmodell* und zum *Mechanischen Modell*, die den meisten Bauingenieuren größtenteils aus ihrer beruflichen Praxis bekannt sein dürften, werden in VDI 6201, Blatt 1, auch Begriffe definiert, die das *Numerische Modell* und die Software-Produkte betreffen. Denn bisher dürfte der meist anglistische Sprachgebrauch der Softwarehersteller vielen Softwareanwendern unverständlich oder zumindest missverständlich geblieben sein.

So wird ein Anwender, der sich für die Aktualität seines Software-Produktes interessiert, vom Softwarehersteller mit Begriffen wie *Version*, *Release*, *Hotfix*, *Servicepack*, *Upgrade* und *Update* konfrontiert, deren unterschiedliche Bedeutung ihm fremd bleibt (und vielleicht auch in den verschiedenen Softwarehäusern unterschiedlich belegt ist). Gleiches gilt für positive, d.h. gewollte, und negative, d.h. ungewollte, Eigenschaften von Software-Produkten, die der Softwarehersteller mit Begriffen wie *Feature* und *Bug* umschreibt.

Wichtig ist auch eine eindeutige Unterscheidung zwischen *Validierung* und *Verifizierung* von Software-Eigenschaften. Eine Software-Eigenschaft ist dann *validiert*, wenn sie für eine konkrete Aufgabenstellung geeignet ist, d.h. wenn die Übertragung des *Strukturmodells* und des *Mechanischen Modells* in das *Numerische Modell* überhaupt sinnvoll möglich ist. Die korrekte Implementierung des *Mechanischen Modells* in das Software-Produkt, d.h. der Nachweis, dass richtig programmiert wurde, lässt sich durch Vergleich der erzielten Ergebnisse mit Referenzlösungen *verifizieren*.

Sich von beidem zu überzeugen, bleibt aber Aufgabe des für die Standsicherheit verantwortlichen *Softwareanwenders*. VDI 6201 Blatt 1 [1] und später VDI 6201 Blatt 2 [2] mit Evaluierungsbeispielen sollen hierfür Hilfestellungen geben.

3 Anforderungen

Die Richtlinie formuliert die Anforderungen an alle an der softwaregestützten Tragwerksberechnung Beteiligten, an die Firmen als *Softwarehersteller* und an deren Mitarbeiter als *Softwareentwickler*, sowie an die Tragwerksplaner und an die Prüfsingenieure als *Softwareanwen-*

der. Dabei werden auch Mindestanforderungen an die Ausbildung der betreffenden Personengruppen gestellt:

Nach VDI 6201 Blatt 1 ist die Befähigung für die Anwendung von Software-Programmen verbunden mit der Berufsbezeichnung „Ingenieurin“ oder „Ingenieur“ nach Ingenieurgesetz [14] für die Fachrichtung Bauingenieurwesen mit Inhalten des Konstruktiven Ingenieurbaus. Das trifft zu auf Diplom-Ingenieurinnen und -Ingenieure bzw. Master-Ingenieurinnen und -Ingenieure mit entsprechender Vertiefung und mindestens zwei Jahren praktischer Tätigkeit in der Tragwerksplanung. Bei Bachelor-Ingenieurinnen und -Ingenieuren sollte die praktische Tätigkeit verbunden mit geeigneten Weiterbildungsmaßnahmen auf mindestens vier Jahre erweitert werden. Die gleichen Anforderungen gelten auch für die mit der Prüfung von softwaregestützten Tragwerksberechnungen befassten Mitarbeiter von Prüfüngenieurern. Für die Softwareentwickler gelten diese Anforderungen, sofern sie sich mit der Programmierung der mechanischen und statisch-konstruktiven Inhalte der Tragwerksberechnung befassen. Sie gelten nicht für Entwickler von allgemeinen, mathematisch-numerischen Lösungsalgorithmen und für Experten in Softwarefirmen, die für das elektronische Datenmanagement (Transfer und Speicherung etc.) zuständig sind.

Den *Softwareherstellern* wird zudem die Verpflichtung auferlegt, den *Softwareanwendern* Einführungen in Form von Schulungen, Lehrfilmen oder ergänzenden Schriften und Musterbeispielen anzubieten sowie für fortgeschrittene Fragestellungen problemspezifische Schulungen und Projektunterstützungen zu leisten.

Entsprechend werden die *Softwareanwender* – Tragwerksplaner und Prüfüngenieur – auf die Teilnahme an derartigen Schulungen verpflichtet: „Die softwaregestützte Tragwerksberechnung erfordert umfassende Kenntnisse in der Anwendung und in der Bewertung der eingesetzten Software. Hierfür sind geeignete Schulungen und Weiterbildungen für die jeweilige Software erforderlich, in denen nicht nur die Bedienung, sondern auch die Grundlagen und Grenzen der Software behandelt werden. Hierzu gehören auch Kenntnisse über das Konvergenzverhalten und die Lösungsqualität der verwendeten Software und über geeignete Modellierungen. Für allgemeine Softwareprodukte mit komplexen Anwendungsmöglichkeiten können mehrtägige Schulungen angemessen sein. Darüber hinaus sollte sich jeder Anwender durch geeignete Fortbildungsmaßnahmen in der Anwendung der jeweils verwendeten Softwareprodukte fortbilden.“ [1].

Die Anforderungen an Form und Inhalt einer softwaregestützten Tragwerksberechnung werden präzisiert, wie Darstellung und Dokumentation der Ein- und Ausgabedaten, durchzuführende Kontrollen etc. Für den Prüfenden verbleibt es bei der bereits in [15] und den Verordnungen der Länder, z.B. in Nr. 28.332 VV BauPrüfVO NRW [16], geforderten Prüfung mit unabhängigen Vergleichsberechnungen: „Wird der rechnerische Standsicherheitsnachweis mit Hilfe von EDV-Anlagen erstellt, muss in der statischen Berechnung dargelegt werden, in welcher Form, mit welchen Prüfprogrammen oder Systemkontrollen und mit welchen Ergebnisabweichungen die Prüfung durchgeführt wurde. Für die Prüfung und Aufstellung der Standsicherheitsnachweise sind unterschiedliche Programme zu verwenden.“ [16]. Nach Meinung des Richtlinienausschusses bedeutet das nicht zwingend die Verwendung eines anderen Software-Produkts, sondern kann auch durch eine unabhängige Software-Lösung erreicht werden, d.h. auch mit demselben Programm, aber auf einem anderen Lösungspfad (z.B. Algorithmus, Elementtyp, Vernetzung).

4 Haftung

An der Frage der Haftung für konkrete, projektbezogene Tragwerksberechnungen soll sich mit Einführung der VDI 6201 gegenüber der bisherigen Rechtsauffassung nichts ändern. Die Verantwortung für Anwendbarkeit des bei der Tragwerksplanung verwendeten Softwareprodukts sowie für die Vollständigkeit und Richtigkeit seiner Berechnungs- und Bemessungsergebnisse verbleibt damit allein beim Tragwerksplaner respektive *Softwareanwender*: „Da der Softwarehersteller keine Möglichkeit hat, die konkrete Anwendung der Software zu überprüfen, beschränkt sich seine Haftung auf die im Allgemeinen übliche Sorgfalt bei der Entwicklung von Software und den individuell zugesicherten Eigenschaften. Die Angaben im Referenzhandbuch definieren daher noch keine zugesicherten Eigenschaften im juristischen Sinne, sondern nur solche Eigenschaften, die bei Nichterfüllung entsprechende Ansprüche auf Nachbesserung auslösen.“ [1]. Gleiches gilt für den prüfenden Softwareanwender: „... verbleibt die Verantwortung für die Anwendbarkeit des für die Prüfung verwendeten Softwareprodukts sowie für die Unabhängigkeit und Richtigkeit der Ergebnisse beim Prüfenden.“ [1].

5 Evaluierungsbeispiele

5.1 Allgemeines

VDI 6201 ist angelegt als VDI-Richtlinienreihe mit dem Hauptdokument VDI 6201 Blatt 1, in dem Grundlagen, Anforderungen und Modellbildung zur softwaregestützten Tragwerksberechnung geregelt werden. Der Richtlinienausschuss ist weiterhin beauftragt, ein Blatt 2 für Evaluierungsbeispiele zu erarbeiten. Hierfür haben die Mitglieder des Richtlinienausschusses bereits eine Vielzahl von Beispielen erarbeitet, wohl wissend der Modularität heutiger Software mit multipel verzweigbaren Lösungspfaden niemals ganz zu entsprechen.

Evaluierungsbeispiele sollten wie folgt strukturiert werden:

- Problembeschreibung (Struktur- und Mechanisches Modell) mit Abmessungen, theoretischen Grundlagen, Materialangaben, Einwirkungen, Randbedingungen.
- Referenzlösung (analytische Lösung, gesicherte numerische Vergleichslösung, gesichertes experimentelles Ergebnis) mit Angabe von Toleranzgrenzen.
- Darstellung der Ergebnisse in grafischer oder in Tabellenform
- Bewertung gegenüber Referenzlösung (Genauigkeit, Konvergenzverhalten).
- Quellenangaben und Literaturhinweise.

Grundanforderung an derartige Evaluierungsbeispiele ist, dass „der zu untersuchende Effekt bei einem einfachen System deutlich hervortritt“ [2]. Lösungen komplexer Systeme mit sich überlagernden Effekten, deren Einfluss auf die Gesamtlösung sich nicht identifizieren lassen, sollten vermieden werden. Referenzlösungen müssen dem allgemein anerkannten Stand der Technik entsprechen, d.h. es muss nicht zwingend die bestmögliche wissenschaftliche Theorie und damit die wirklichkeitsnächste Lösung zugrunde gelegt werden, sondern der dem anerkannten Stand der Technik entsprechende Berechnungsweg. Den *Softwareherstellern* und ihren *Softwareentwicklern* sollen die Evaluierungsbeispiele helfen, eigene konzeptionelle Fehler aufzudecken. Den *Softwareanwendern* sollen sie ermöglichen, die Eignung eines Software-Produktes für ihre konkrete Problemstellung festzustellen.

Neben detaillierten Anforderungen an den Aufbau der Beispiele in VDI 6201 Blatt 2 enthalten die Richtlinienanteile Blatt 2.1, Blatt 2.2, etc. Evaluierungsbeispiele, die den vorgenannten Anforderungen vorbildhaft genügen (Bild 1). Langfristig angedacht ist eine nutzerunterstützte Datenbank, in die sowohl die *Softwarehersteller* als auch die *Softwareanwender* weitere geeignete und „legitimierte“ Evaluierungsbeispiele einstellen können, analog zur Vorgehensweise bei Einstellung eigener Texte in die freie Enzyklopädie WIKIPEDIA. Allerdings ist noch unklar, in welcher Form diese „Legitimation“ erfolgen kann, ob durch andere Nutzer, wie z.B. nach Gegenrechnung durch mindestens zwei weitere Softwareanwender neben dem Verfasser des Beispiels, oder durch einen permanenten Ausschuss beim VDI.

Klasse			
Analytisches Evaluierungsbeispiel	☐	Normatives Evaluierungsbeispiel	☐
Numerisches Evaluierungsbeispiel	☐	Systemisches Evaluierungsbeispiel	☐
Experimentelles Evaluierungsbeispiel	☐		
Tragwerkstyp			
Ebenes Tragwerk	☐	Flächentragwerk	☐
Räumliches Tragwerk	☐	Scheibe	☐
Stahltragwerk	☐	Platte	☐
Mechanik			
Statik	☐	Dynamik	☐
geometrisch linear	☐	Frequenzbereich	☐
geometrisch nichtlinear	☐	Zeithereich	☐
Materialgesetz			
elastisch	☐	isotrop	☐
linear-elastisch	☐	anisotrop	☐
multilinear-elastisch	☐	Verfestigung	☐
Baustoff			
Allgemein	☐	Mauerwerk	☐
Beton, Stahl-, Spannbeton	☐	Boden, Erdstoffe	☐
Stahl, Aluminium	☐	Kunststoff	☐
Stahl-Beton-Verbund	☐	Glas	☐
Holz	☐	Sonstige	☐

Abb. 2 Konzept für die digitale Identifikation der Evaluierungsbeispiele [17].

Ein erster Vorschlag für eine Klassifizierung der Beispiele und damit für deren digitale Identifizierung in der Datenbank ist in Bild 2 dargestellt [17]. Dieser Vorschlag wurde im Richtlinienausschuss diskutiert und konzeptionell angenommen, war jedoch bei Drucklegung dieses Schriftbeitrags noch nicht im Detail verabschiedet.

Zumindest jedoch erfolgt eine Einteilung der Evaluierungsbeispiele in:

- analytische Verifikationsbeispiele
- numerische Verifikationsbeispiele
- experimentelle Validierungsbeispiele
- normenbasierte Validierungsbeispiele
- systemische Validierungsbeispiele

5.2 Analytisches Verifikationsbeispiel

Exemplarisch für den Aufbau eines Evaluierungsbeispiels wird hier das analytische Verifikationsbeispiel „Kreisförmige Platte“ gezeigt (Bild 3). Dieses ist für die Richtlinie VDI 6201 Blatt 2 [2] vorgesehen und an die Ausführungen in [5] angelehnt. Hier werden davon abweichend unter „Ergebnisse“ die eigenen Berechnungsergebnisse mit dem FE-Programm FEMAS 2000 [18] angegeben. Auf gleiche Weise können Softwarehersteller und -anwender die Genauigkeit und Eignung ihrer Softwareprodukte testen.

5.2.1 Beschreibung

Das System besteht aus einer kreisförmigen Platte mit Radius 5 m und konstanter Flächenlast. Die Platte ist am Rand gelenkig gelagert ($u_z = \text{starr}$) und wird als ebenes Problem mit drei Freiheitsgraden (φ_x , φ_y und u_z) pro FE-Knoten berechnet. Untersucht wird die Durchbiegung in der Mitte der Kreisplatte für unterschiedliche Plattendicken. Das Beispiel erlaubt die Überprüfung der Eignung der Software zur Berechnung von dicken Platten unter Ansatz einer Schubsteifen Plattentheorie nach KIRCHHOFF oder einer schubweichen Plattentheorie nach REISSNER-MINDLIN.

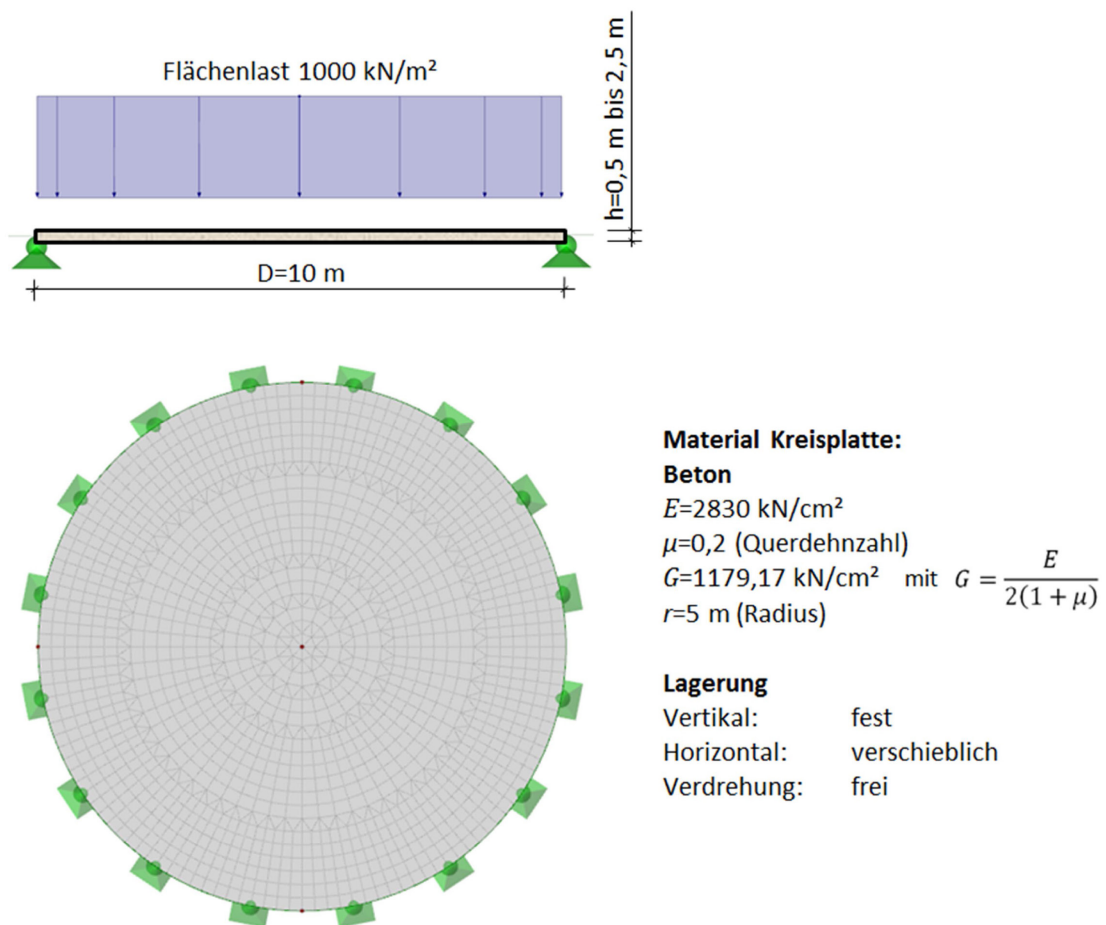


Abb. 3 Analytisches Verifikationsbeispiel: Dicke Platte

5.2.2 Referenzlösung

Die Aufgabenstellung lässt sich analytisch wie folgt lösen (siehe [19]). In Abhängigkeit der Dicke erhält man nach [5] für die maximale Durchbiegung der Plattenmitte:

$$w = w_B + w_S \quad \begin{array}{l} \text{mit } w_B - \text{Verschiebung infolge Biegung} \\ \text{und } w_S - \text{Verschiebung infolge Schubverzerrung} \end{array} \quad (1)$$

dabei beträgt:

$$w_B = \frac{p \cdot r^4}{64 \cdot K} \frac{(5 + \mu)}{(1 + \mu)} \quad \begin{array}{l} \text{mit } p - \text{Lastordinate} \\ r - \text{Radius und} \end{array} \quad (2)$$

$$K = \frac{E \cdot h^3}{12(1 - \mu^2)} \quad \begin{array}{l} \text{mit } E - \text{E-Modul} \\ h - \text{Plattendicke} \\ \mu - \text{Querdehnzahl} \end{array} \quad (3)$$

$$\text{und: } w_S = \frac{1,2 \cdot p \cdot r^2}{4 \cdot G \cdot h} \quad \text{mit } G - \text{Schubmodul} \quad (4)$$

5.2.3 Systeminformation

Als Systemparameter (Materialdaten und Abmessungen) wurden folgende Werte gewählt:

$$E = 2.830 \text{ kN/cm}^2$$

$$G = 1.179 \text{ kN/cm}^2$$

$$\mu = 0,2$$

$$r = 5,0 \text{ m}$$

Die Dicke h der Platte wird von 0,5 m bis 2,5 m variiert.

5.2.4 Belastung

Das Eigengewicht des Systems wird nicht automatisch berücksichtigt. Als Belastung wird eine konstante Flächenlast von $p = 1.000 \text{ kN/m}^2$ angesetzt.

5.2.5 Ergebnisse

Die analytisch ermittelten Ergebnisse für die Verformung werden den mit dem FEM-Programm FEMAS 2000 [18] ermittelten Ergebnissen gegenübergestellt. Die Berechnung erfolgt für unterschiedliche Plattendicken, um deren Einfluss auf die Berechnungsgenauigkeit beurteilen zu können.

Nach dimensionsgerechtem Einsetzen der Systemparameter in die oben angegebenen analytischen Formeln ergeben sich die Biege- und Schubanteile der Durchbiegung in Plattenmitte zu:

$$w = w_B + w_S = \frac{17,226}{h^3} + \frac{0,636}{h} \quad [\text{mm}] \quad \text{mit } h \text{ in } [\text{m}] \quad (5)$$

Weiterer Hinweis:

Das maximale Moment in Plattenmitte $M_x = M_y$ ist unabhängig von der Plattendicke h und beträgt in diesem Beispiel:

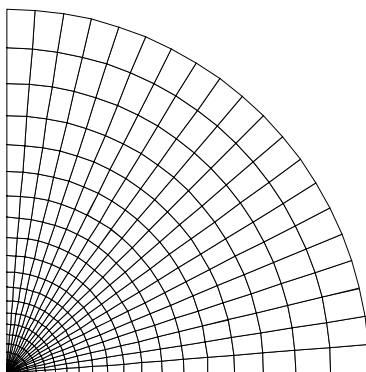
$$M_x = M_y = \frac{p \cdot r^2}{16} \cdot (3 + \mu) = 5.000,0 \text{ kNm/m} \quad (6)$$

Das Torsionsmoment M_{xy} ergibt sich zu Null.

Diskretisierung

Für die Berechnung wird das Schalenelement ASE4 verwendet. Es ist ein isoparametrisches, vierknotiges Element mit bilinearen Ansatzfunktionen, welches auf der schubweichen REISSNER-MINDLIN-Schubverzerrungstheorie finiter Rotationen basiert. Die gewählte Netzeinteilung ist Abb. 4 zu entnehmen. Es wird jeweils nur ein Viertel der Platte modelliert. In den Symmetrieachsen werden geeignete Symmetriebedingungen angesetzt, d.h. die Verschiebungen senkrecht zu den Symmetrieachsen werden gehalten und die Verdrehungen um die Achsen behindert. Bei Variante 1 wird eine einfache rotationssymmetrische Vernetzung vorgenommen, allerdings verbleibt im Inneren ein Loch von 0,1 mm. Diese Modellierung ist geeignet für symmetrische Beanspruchung, dagegen untauglich, wenn die Beanspruchung antisymmetrisch wirkt. Die auf dem Lochrand liegenden Knoten werden gekoppelt. Die Anzahl der Elemente ist 400. Bei Variante 2 ist die Kreisplatte vollständig geschlossen. Es werden 336 Elemente verwendet.

Variante 1



Variante 2

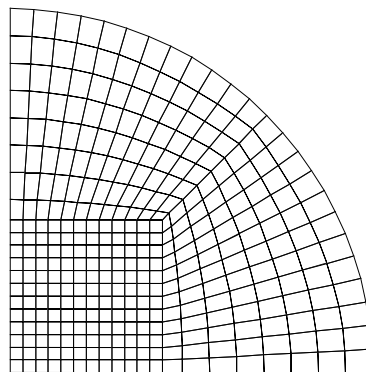


Abb. 4 Gewählte Diskretisierungsvarianten

Berechnung

Es wird eine linear-elastische Berechnung nach Theorie I. Ordnung mit der Plattentheorie nach REIBNER-MINDLIN durchgeführt.

Verformungen

Die berechneten Verformungen in Plattenmitte sind in Tab. 1 dargestellt. Darüber hinaus ist die prozentuale Abweichung zur analytischen Referenzlösung angegeben.

Tab. 1 Vergleich der Berechnungsergebnisse mit der analytischen Referenzlösung

Platten- dicke	Analytische Lösung	Variante 1		Variante 2	
		FEMAS 2000	Abweichung	FEMAS 2000	Abweichung
h [m]	[mm]	[mm]	[%]	[mm]	[%]
0,5	139,1	137,4	1,22	138,9	0,14
1,0	17,86	17,54	1,79	17,73	0,73
1,5	5,528	5,375	2,77	5,432	1,74
2,0	2,471	2,373	3,97	2,397	2,99
2,5	1,357	1,284	5,38	1,297	4,42

5.2.6 Zusammenfassung

Die analytisch und die numerisch ermittelten Verformungen zeigen hinreichende Übereinstimmung. Allerdings fällt auf, dass trotz der Verwendung einer Schubverzerrungstheorie die Güte der Lösung mit der Plattendicke nachlässt. Die Lösungen in [5] weisen geringere prozentuale Fehler auf. Das Beispiel kann durch weitere Variationen der Diskretisierung auch dazu verwendet werden, um die Leistungsfähigkeit der verwendeten FE-Elemente zu überprüfen und infolgedessen Rückschlüsse auf die erforderliche Netzdichte ziehen zu können.

6 Qualitätssicherung

Eine Zertifizierung eines Softwareherstellers ist aufgrund der Komplexität und des hohen Innovationsgrades der Prozessabläufe für die heute gebräuchlichen Zertifizierungssysteme nicht geeignet [1], [20]. Der Richtlinienausschuss hat sich zudem gegen eine generelle Zertifizierung der Software oder Softwareversion entschieden, da eine absolute Fehlerfreiheit nicht ausgeschlossen werden kann und darüber hinaus dem Softwareanwender nur die trügerische Sicherheit vermittelt würde, die Software könne bedenkenlos angewendet werden [1]. Dies soll unter allen Umständen vermieden werden.

Um dennoch ein Mindestmaß an Qualitätssicherung einzuführen, wurden in VDI 6201 Teil 1 Selbstverpflichtungserklärungen für die Hersteller und Anwender von Softwareprodukten

vorgesehen. Derartige Erklärungen umfassen vorrangig die Prozesse, die prüf- und messbar sind, wie herstellerseitig die Bereitstellung von Evaluierungsbeispielen und die Vorsehung geeigneter interner Qualitätssicherungssysteme sowie anwenderseitig der Nachweis der fachlichen Eignung und der geeigneten, beruflichen Weiterbildung. Aus diesen Selbstverpflichtungserklärungen geht insofern die erklärte Bereitschaft des Softwareherstellers bzw. Softwareanwenders hervor, geeignete Maßnahmen zur Einhaltung der VDI 6201 vorzusehen und sich ihnen zu unterwerfen. Form und Inhalt solcher Erklärungen sind beispielhaft in den Bildern 5 und 6 wiedergegeben.

7 Schlusswort und Ausblick

Dem Richtlinienausschuss VDI 6201 gehören ehrenamtliche Vertreter aus Softwarehäusern, Bauindustrie, Hochschulen, Ingenieurbüros und Prüfeinrichtungen an, um die individuellen Interessenlagen aller Berufsgruppen, die bei der softwaregestützten Tragwerksberechnung beteiligt sind:

Dipl.-Ing. *Jörg Duensing*, Hannover,
Michael Fritz, Celle,
Prof. Dr.-Ing. *Volker Gensichen*, Münster,
Univ.-Prof. Dr.-Ing. *Reinhard Harte*, Bochum/Wuppertal,
Dr.-Ing. *Stefan Heyde*, Berlin,
Dipl.-Ing. (FH) *Frank Jansen*, Willich,
Prof. Dr.-Ing. *Casimir Katz*, Oberschleißheim,
Dr.-Ing. *Stefan Kimmich*, Stuttgart,
Dipl.-Ing. *Gerhard Niehaus*, Hannover,
Univ.-Prof. Dr.-Ing. *Günter Rombach*, Hamburg,
M. Eng. Dipl.-Ing. (FH) *Walter Rustler*, Tiefenbach,
Univ.-Prof. Dr.-Ing. *Karl Schweizerhof*, Karlsruhe,
Dipl.-Ing. *Gerd von Spiess*, Dortmund,
Dr.-Ing. *Kirsten Stopp*, Wuppertal,
Dipl.-Ing. *Bernhard Tschonitsch*, Baden-Baden.

Es ist erklärtes Ziel des Richtlinienausschusses, nach dem im September 2014 erschienenen Gründruck von VDI 6201 Blatt 1 der Fachöffentlichkeit alsbald in 2015 auch Blatt 2 mit den ersten Teilen Blatt 2.1 etc. vorzustellen. Die Richtlinienreihe 6201 ist offen für eine Erweiterung um Blätter für die baustoffspezifischen Berechnungs- und Bemessungsmodelle im Massivbau, Stahlbau, Verbundbau etc. Hierzu wäre der jetzige Richtlinienausschuss ggf. mit geeigneten Fachleuten für die jeweiligen baustoffspezifischen Fachgebiete zu ergänzen. Diese Arbeit soll allerdings erst nach Vorstellung der Blätter 1 und 2 der VDI 6201 in der Fachöffentlichkeit angegangen werden.

Der Referent als Vorsitzender des Richtlinienausschusses hofft zudem, dass die VDI 6201 nicht als zusätzliche Reglementierung, sondern als Erleichterung und Hilfe für die Alltagsarbeit der softwaregestützt tätigen Tragwerksplaner verstanden wird, und dass sie schnell allgemeine Anerkennung und Anwendung finden wird. Denn immerhin soll sie der Fehlervermeidung bei softwaregestützter Tragwerksplanung dienen und hat damit die Sicherheit unserer Gebäude im Auge – die letztlich in unser aller Interesse liegen sollte.

Hinweis:

Dieser Vortrag wurde bereits beim 18. Dresdner Baustatik-Seminar am 17.10.2014 gehalten.

Selbstverpflichtungserklärung
Softwareherstellung
für die Tragwerksberechnung gemäß Richtlinie VDI 6201 Blatt 1

Die Richtlinie VDI 6201 Blatt 1 „Softwaregestützte Tragwerksberechnung“ fordert von Herstellern und Anwendern von Software in der Tragwerksberechnung besonderes Verantwortungsbewusstsein und liefert Maßnahmen, mit denen die Qualität sowohl bei der Entwicklung als auch bei der Anwendung der Software zur Tragwerksplanung und -prüfung sichergestellt werden soll.

Die Herstellung von Software für die Tragwerksberechnung bedarf wegen ihrer Komplexität und ihres hohen Innovationsgrades besonderer Maßnahmen zur Qualitätssicherung. Um ein möglichst hohes Maß an Qualität der Software zu erreichen, muss besonderer Wert auf die einzelnen Verfahren und Prozesse bei der Entwicklung und bei der Betreuung der Software gelegt werden. Dies erfordert die Einhaltung der in der Richtlinie VDI 6201 Blatt 1 vorgesehenen Maßnahmen.

Als verantwortungsbewusstes Unternehmen bekennen wir uns zu den in Abschnitt 4 der Richtlinie VDI 6201 Blatt 1 beschriebenen und geforderten Maßnahmen an die Herstellung von Software für die Tragwerksberechnung.

Wir erklären hiermit, dass wir die nachstehend markierten Maßnahmen einhalten:

- ☐ Darstellung der Grundlagen der Software
- ☐ Bereitstellung von Evaluierungsbeispielen für den Softwareanwender
- ☐ internes System für die Qualitätssicherung
- ☐ systematische Fehlerverfolgung und –berichterstattung
- ☐ Aus- und Weiterbildung der Mitarbeiter
- ☐ Einhaltung minimaler Ein- und Ausgabestandards
- ☐ Angebot von Schulungen und Anwenderberatung

Ort, Datum

Firmenname, Anschrift, Firmenstempel

Unterschrift Geschäftsführer,
verantwortliche Person

Abb. 5: Selbstverpflichtungserklärung für Softwarehersteller (Beispiel) – Auszug aus [1]

Selbstverpflichtungserklärung
Softwareanwendung
für die Tragwerksberechnung gemäß Richtlinie VDI 6201 Blatt 1

Die Richtlinie VDI 6201 Blatt 1 „Softwaregestützte Tragwerksberechnung“ fordert von Herstellern und Anwendern von Software in der Tragwerksberechnung besonderes Verantwortungsbewusstsein und liefert Maßnahmen, mit denen die Qualität sowohl bei der Entwicklung als auch bei der Anwendung der Software zur Tragwerksplanung und -prüfung sichergestellt werden soll.

Die Anwendung von Software für die Tragwerksplanung bedarf wegen ihrer Komplexität und ihres hohen Innovationsgrades zur Vermeidung von Fehlern und zur Minimierung der sich daraus ergebenden Gefahren besonderer Maßnahmen zur Qualitätssicherung. Die Organisation der Qualitätssicherung auf Anwenderseite mit Nachweis der fachlichen Eignung und der beruflichen Weiterbildung der Mitarbeiter liegt im Interesse der jeweiligen Geschäftsleitung, da die Verantwortung für die Vollständigkeit und Richtigkeit der Ergebnisse beim Anwender verbleibt. Dies erfordert die Einhaltung der in der Richtlinie VDI 6201 Blatt 1 vorgesehenen Maßnahmen.

Als verantwortungsbewusstes Unternehmen bekennen wir uns zu den in Abschnitt 5 der Richtlinie VDI 6201 Blatt 1 beschriebenen und geforderten Maßnahmen an die Anwendung von Software für die Tragwerksberechnung.

Wir erklären hiermit, dass wir die nachstehend markierten Maßnahmen einhalten:

- ☐ fachliche Eignung und berufliche Weiterbildung der Mitarbeiter
- ☐ Durchführung von Evaluierungsbeispielen
- ☐ Sicherstellung der Nachvollziehbarkeit des Nachweiswegs
- ☐ Reproduzierbarkeit der Ergebnisse
- ☐ Dokumentation und Kontrolle der Berechnungen

Ort, Datum

Firmenname, Anschrift, Firmenstempel

Unterschrift Geschäftsführer,
verantwortliche Person

Abb. 6: Selbstverpflichtungserklärung für Softwareanwender (Beispiel) – Auszug aus [1]

Literatur

- [1] VDI 6201 Blatt 1 – *Softwaregestützte Tragwerksberechnung; Grundlagen, Anforderungen; Modellbildung*. Entwurfsfassung September 2014, VDI e.V. Düsseldorf 2014
- [2] VDI 6201 Blatt 2 – *Softwaregestützte Tragwerksberechnung; Evaluierungsbeispiele*. Unveröffentlichte Entwurfsfassung 2014, VDI e.V. Düsseldorf 2014
- [3] VDI 1000 – *VDI-Richtlinienarbeit; Grundsätze und Anleitungen*. Ausg. 2010-6, VDI e.V. Düsseldorf 2010
- [4] VDI-Richtlinien-Redaktionshandbuch. Internes Arbeitspapier für die Richtlinienausschüsse. Ausg. 2012-12. VDI e.V. Düsseldorf 2012
- [5] Barth, Ch.; Rustler, W. *Finite Elemente in der Baustatik-Praxis*, Bauwerk-Verlag, Berlin 2000
- [6] Bischoff, M. *Nicht auf Knopfdruck – Computerstatik am Gesamtmodell*. Deutsches Ingenieurblatt, Heft 12, 2011, 18-22
- [7] Bischoff, M.; Kimmich, St. *Computerstatik am Gesamtsystem – Modellierung ohne Grenzen?* Baustatik-Baupraxis 11 – Universität Innsbruck / TU Graz. 2011, 29-40
- [8] Gensichen, V.; Lumpe G. *Zur Leistungsfähigkeit, korrekten Anwendung und Kontrolle von EDV-Programmen für die Berechnung räumlicher Stabwerke im Stahlbau*. Stahlbau 77 (2008), Heft 6, S. 447-453, Heft 7, S. 531-537, Heft 8, S. 608-613 u. Heft 12, S. 908
- [9] Gensichen, V. *Die Qualitätssicherung von EDV-Programmen und die Suche nach der Realität*. Der Prüfenieur, 2010, 40-49
- [10] Katz, C. *Einfluss der Modellbildung bei der Berechnung am Gesamtmodell*. Baustatik-Baupraxis 11 – Universität Innsbruck / TU Graz. 2011, 187-196
- [11] Rombach, G. *Probleme bei der Berechnung von Stahlbetonkonstruktionen mittels 3-dimensionalen Gesamtmodellen*. Beton- und Stahlbetonbau 102, 2007, Heft 4, 207–214
- [12] Rombach, G. *Risiken und Probleme beim Einsatz komplexer Gebäudemodelle von Stahlbetontragwerken in der Baupraxis*. Baustatik-Baupraxis 10 – Universität Karlsruhe 2008, 315–325
- [13] Wunderlich, W.; Kiener, G.; Ostermann, W. *Modellierung und Berechnung von Deckenplatten mit Unterzügen*. Bauingenieur 69, 1994, 381-390
- [14] Landesregierung NRW Gesetz zum Schutze der Berufsbezeichnung „Ingenieur/Ingenieurin“ (Ingenieurgesetz – IngG) vom 5.5.1970, zuletzt geändert am 15.06.2013

- [15] Ri-EDV-AP-2001 *Richtlinie für das Aufstellen und Prüfen EDV-unterstützter Standsicherheitsnachweise*. Ausg. 2001-04. Bundesvereinigung der Prüfeningenieure für Bautechnik VPI, Hamburg 2001
- [16] Landesregierung NRW *Verwaltungsvorschrift zur Verordnung über bautechnische Prüfungen – VV BauPrüfVO vom 8.3.2000*
- [17] Stopp, K. *Konzept für die digitale Identifikation der Evaluierungsbeispiele*. Unveröffentlichtes Manuskript. Bergische Universität Wuppertal, 2013
- [18] Harte, R.; Andres, M.; Wörmann, R. *FEMAS 2000 – Benutzerhandbuch zur nichtlinearen Analyse von Stahlbetonflächentragwerken*. Statik und Dynamik der Tragwerke, Bergische Universität Wuppertal, 2003
- [19] Mathiak, F. U. *Ebene Flächentragwerke Teil II, Grundlagen der Plattentheorie*. Hochschule Neubrandenburg, 2011
- [20] Funke, T.; Noll, R.; Niessen, S.; Weigl, B. *Softwareentwicklung in mittelständischen Unternehmen mit ISO 9000*, Springer; 2000