

Ersatzimperfektionen für den numerischen Beulsicherheitsnachweis stählerner Schalentragswerke – State of the Art

Die Wirkung der unvermeidlichen Abweichungen von den Sollwerten des Widerstands muß wegen der großen Imperfektions-sensitivität stählerner Schalentragswerke in die Beurteilung der Tragfähigkeit einbezogen werden. Wegen des Unikatcharakters der Bauwerke fehlen repräsentative statistische Daten über die sich im Fertigungs-, Transport- und Montageprozeß ausbildenden Imperfektionen. Viele Imperfektionsannahmen der Regelwerke beruhen deshalb auf ingenieurmäßigen Überlegungen. Der neue Eurocode für stählerne Schalentragswerke gestattet die Beurteilung der Beulsicherheit auf der Grundlage numerischer Berechnungen unter expliziter Berücksichtigung der Wirkung von Imperfektionen. Die Qualität dieses numerisch gestützten Nachweises hängt entscheidend davon ab, ob die in das Rechenmodell eingeführten Ersatzimperfektionen die Wirkung der zufälligen Imperfektionen realer Schalentragswerke mechanisch äquivalent beschreiben. Im Beitrag wird ein Überblick über die Imperfektionsannahmen innerhalb der Philosophie des Eurocode gegeben. Noch bestehende Defizite werden am Beispiel der Kreiszyinderschale diskutiert. Hinweise für die Anwendung werden gegeben.

Equivalent Geometric Imperfections for the Numerical Buckling Strength Verification of Steel Shell Structures – State of the Art.

Steel shell structures are very imperfection-sensitive. Therefore, the inevitable deviations from the nominal data of the resistance parameters have to be included in a numerical calculation of the load-bearing capacity. Because steel shell structures are unique, representative statistical data about the arising imperfections during manufacturing, transport and erection are missing. Therefore, many imperfection assumptions of the codes are based on engineering considerations. The new Eurocode for steel shell structures allows a numerical buckling strength verification in explicit consideration of the effect of imperfections. The assumed imperfections are fundamental for the numerical buckling strength verification, because they have to cover the influence of all accidental imperfections of the structure in a consistent manner. In the contribution, an overview is given on the fundamental imperfection assumptions within the framework of the Eurocode. Still existing knowledge gaps are discussed at the example of the circular cylindrical shell. Hints for application are given.

1 Einführung

Die Vielzahl möglicher Beulformen bei nahezu gleichem Lastniveau bewirkt in Verbindung mit dem starken Lastabfall im Nachbeulbereich eine große Imperfektionssensitivität dünnwandiger Schalentragswerke. Die idealen Beul-

lasten sind hier wenig aussagekräftig für die Beurteilung der Tragfähigkeit. Zur wirklichkeitsnahen Simulation des Beulverhaltens muß man die unvermeidlichen Abweichungen von den Sollgrößen des Widerstandes einbeziehen.

Die Auswertung der experimentellen Daten ist ausgesprochen schwierig. Wegen des Unikatcharakters der Bauwerke liegen keine repräsentativen statistischen Werte über die Imperfektionen ausgeführter Tragwerke vor. Aus den stark streuenden experimentellen Daten kann man kaum Aussagen über die Wirkung einzelner Imperfektionsparameter gewinnen, da sich im Experiment stets der Einfluß verschiedener Imperfektionsparameter überlagert.

Die neuen Möglichkeiten numerischer Berechnungen haben die Situation inzwischen grundlegend verbessert, weil jetzt auch systematische Untersuchungen des Einflusses einzelner Imperfektionsparameter möglich sind. Wegen des nichtlinearen Verhaltens bereits im Vorbeulbereich, der hohen Imperfektionssensitivität und der multimodalen Versagensmöglichkeiten ist die numerische Untersuchung dünnwandiger Schalentragswerke weiterhin anspruchsvoll und zeitaufwendig.

Neben dem spannungsbasierten Beulsicherheitsnachweis, der sich auf die bei den Grundbeulfällen gewonnenen experimentellen Daten stützt, gestattet der Eurocode für stählerne Schalentragswerke zwei numerische Beulsicherheitsnachweise unterschiedlicher Modellierungsschärfe: MNA/LBA-Berechnung und GMNIA-Berechnung (s. u.). Ziel dieser numerischen Verfahren ist es, die Beulsicherheit auch für experimentell nicht ausreichend erforschte Beulfälle zu beurteilen (s. den Überblick über die numerischen Verfahren in [1] bis [4]).

Der MNA/LBA-Beulsicherheitsnachweis (materiell nichtlineare Analyse und lineare Beulanalyse) ist eng an den spannungsbasierten Beulsicherheitsnachweis angelehnt. Die beiden Referenzgrößen der perfekten Struktur Fließspannung und ideale Beulspannung werden dabei durch die entsprechenden numerisch ermittelten globalen Beulwiderstände ersetzt. Die Anwendung des MNA/LBA-Näherungsnachweises für nicht ausreichend experimentell untersuchte Lastfälle und Geometrien ist ebenso wie beim spannungsbasierten Beulsicherheitsnachweis problematisch. Umstritten ist dafür die Bildung der Beulabminderungsfaktoren χ aus den experimentell für die Grundbeulfälle ermittelten Werten. Verschiedene Möglichkeiten werden in [5] vorgestellt. Für die Ermittlung des in die Beulabminderungsfaktoren χ eingehenden elastischen Im-

perfektionsfaktors α_{el} ist eine geometrisch nichtlineare Analyse der imperfekten Struktur erforderlich, was wiederum konsistente geometrische Ersatzimperfectionen erfordert (s. u. bei GMNIA). Ebenso diskussionswürdig ist es, ob als plastischer Referenzwiderstand R_{pl} in jedem Fall das Resultat einer lediglich materiell nichtlinearen Berechnung (MNA) angenommen werden darf. Man muß sich dabei vor Augen halten, daß die den Beulabminderungsfaktoren zu Grunde liegenden Beulversuche hauptsächlich für die Grundbeulfälle mit jeweils konstanten Membranspannungen einer Art durchgeführt wurden. Bei diesen Experimenten fällt das Erreichen von R_{pl} mit dem Erreichen der Fließgrenze im Bereich des Beulmusters zusammen. Bei anderen Lastfällen ist das nicht immer der Fall. Bei biegebeanspruchten schlanken Schalen ist die Fließgrenze z. B. im Bereich der größten Druckkraft eher erreicht als das vollplastische Grenzmoment, das sich als Resultat einer MNA-Berechnung ergibt. Zur Beurteilung der ggf. nur lokalen Beulgefährdung muß für R_{pl} diejenige Last gewählt werden, bei der im beulgefährdeten Bereich die Fließgrenze erreicht wird (so auch in [4]), wenn man den Beulwiderstand nicht überschätzen will [6].

Wegen der genannten Probleme des MNA/LBA-Beulsicherheitsnachweises ist es perspektivisch erforderlich, die Imperfectionen nicht lediglich über an den Grundbeulfällen empirisch ermittelte Abminderungsfaktoren, sondern explizit in die Berechnung einzubeziehen.

Dies erlaubt der anspruchsvollste numerische Beulsicherheitsnachweis, eine geometrisch und materiell nichtlineare Analyse des imperfekten Schalentragwerkes (GMNIA). Dieses Verfahren erreicht die größte Wirklichkeitsnähe, wenn die unvermeidlichen und zufälligen Abweichungen realer Schalentragwerke von den Sollgrößen durch die angesetzten Ersatzimperfectionen äquivalent beschrieben werden. Trotz intensiver Forschungsarbeiten in den vergangenen Jahren sind viele Probleme noch nicht gelöst, um diese Möglichkeit auf experimentell nicht ausreichend untersuchte Schalenbeulfälle anwenden zu können. Deshalb ist gegenwärtig eine durchgängig sichere, wirtschaftliche und anwenderfreundliche Nutzung in der Bemessungspraxis für viele Anwendungsfälle noch nicht möglich. Wegen der großen Perspektiven des Verfahrens sind erhebliche Forschungsanstrengungen erforderlich und wünschenswert, um die GMNIA-Berechnung in der Ingenieurpraxis etablieren zu können. Der vorliegende Beitrag gibt einen Überblick über die Grundannahmen der GMNIA-Berechnung, diskutiert die noch bestehenden Defizite und gibt Hinweise für die Anwendung des Verfahrens.

2 Mechanisch äquivalente geometrische Ersatzimperfectionen – Problemstellung

2.1 Allgemeines

Wegen der geringen Kenntnisse über die Größe struktureller Imperfectionen und die einfachere Implementierung in das FE-Modell soll die Wirkung der verschiedenen Imperfectionen gem. Eurocode [7] allein durch geometrische Ersatzimperfectionen erfaßt werden. Die Wirkung der zufälligen Imperfectionen realer Schalentragwerke wird mechanisch äquivalent modelliert, wenn die numerische

Analyse mit diesen Ersatzimperfectionen zu den experimentell gesicherten Mindesttragfähigkeiten führt. Solche Imperfectionen werden in der vorliegenden Arbeit auch als konsistente Ersatzimperfectionen bezeichnet. Aus dem bisher Gesagten ergeben sich folgende Grundaussagen über konsistente geometrische Ersatzimperfectionen:

- Geometrische Ersatzimperfectionen können nicht aufgemessen werden. Sie müssen größer sein als die aufgemessenen Imperfectionen, da sie auch die Wirkung struktureller Imperfectionen abdecken müssen. Als Ersatzimperfectionen müssen sie nicht real vorkommen.
- Die Imperfectionssensitivität bezüglich der Parameter der gewählten Imperfectionsform muß monoton verlaufen, um eine eindeutige Zuordnung von Tragfähigkeit und Imperfectionsparameter zu gewährleisten.
- Die Größe konsistenter Imperfectionen hängt von der gewählten Form ab.
- Die Ersatzimperfectionen sollen anwenderfreundlich in ein FE-Modell implementierbar sein. Ihre Wirkung soll möglichst wenig durch geringe Änderungen der Modellierung von Randbedingungen und der Diskretisierung beeinflusst werden.

Das Problem konsistenter geometrischer Ersatzimperfectionen gliedert sich auf in die Fragen nach deren Form und deren Größe.

2.2 Imperfectionsform

Die ungünstigste Imperfectionsform beschäftigt die Schalenforscher bereits seit mehr als einhundert Jahren (vgl. die Übersicht in [3], [8], [9]). Sie ist die „Blaue Blume“ der Schalenforscher: beflügelnd und unerreichbar [10]. Inzwischen hat sich nämlich herausgestellt, daß es **die** ungünstigste Imperfectionsform bei Schalentragwerken nicht gibt, sondern von der Vorbeulamplitude abhängige unterschiedliche ungünstigste Muster [11].

Eine in [7] vorgeschlagene Möglichkeit für die ungünstigste Imperfectionsform sind eigenformaffine Muster. Für den Fall, daß die Instabilität durch geometrische Nichtlinearitäten verursacht wird und das Vorbeulverhalten nahezu linear ist, haben sich Imperfectionsmuster, die sich aus einer linearen Eigenwertanalyse auf dem Vorbeulpfad ergeben, als geeignet erwiesen. Sind jedoch wie bei stählernen Schalentragwerken Einflüsse aus materiellen Nichtlinearitäten mitwirkend oder liegt eine Clusterung von Eigenwerten und Pfadverzweigungen im Nachbeulbereich vor oder entstehen imperfectionsbedingt zusätzliche lokale Instabilitäten, sind eigenformaffine Imperfectionen oft keine ungünstigsten Muster. Bild 1 zeigt die bezogene Versagenslast einer mittellangen axial gedrückten Kreiszyinderschale mit $r/t = 400$ (r Radius, t Wanddicke) in Abhängigkeit von der bezogenen Imperfectionsamplitude w_0/t für eine Imperfection affin zur ersten Eigenform („Schachbrettbeulmuster“) und für eine axialsymmetrische Ringvorbeule. Problematisch an der eigenformaffinen Imperfection, die der Regelfall nach [7] ist, ist nicht nur, daß sie die Tragfähigkeit geringer reduziert als die einzelne axialsymmetrische Ringvorbeule, sondern daß die Ableitung der Sensitivitätskurve nicht mehr monoton verläuft.

Beim Basisbeulfall konstanter Umfangsdruck entstehen mit eigenformaffinen Imperfectionen in weiten Geometriebereichen sogar kritische Beullasten R_{GMNIA} , die

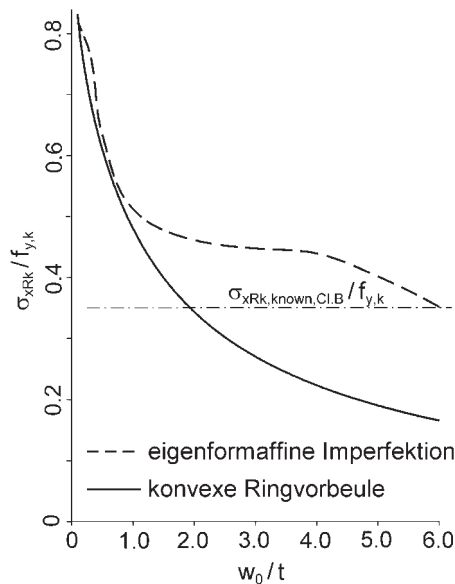


Bild 1. Normierte Tragfähigkeit in Abhängigkeit von der bezogenen Vorbeulamplitude; mittellange axial gedrückte Zylinderschale, $r/t = 400$, Kopfringsteife; konvexe Ringvorbeule mit $l_{0x} = 3,46 (r \cdot t)^{1/2}$ und eigenformaffine Imperfektion

Fig. 1. Dimensionless carrying capacity depending on dimensionless imperfection amplitude; medium-length axially compressed cylindrical shell, $r/t = 400$, ring stiffened top; convex ring-shaped imperfection with $l_{0x} = 3.46 (r \cdot t)^{1/2}$ and eigenmode-affine imperfection

deutlich oberhalb der idealen Beullasten liegen [12]. Besser sind i. allg. kollapsaffine Imperfektionsmuster geeignet, die sich am Versagensmuster der perfekten Schale orientieren. Wenn es auch nicht sicher möglich ist, die ungünstigste Imperfektionsform bei vorgegebener Imperfektionsamplitude zu bestimmen, so gelingt doch in vielen Fällen mit der Methode quasi-kollapsaffiner Imperfektionen eine begründete Annäherung an dieses Ziel [11]. Im Gegensatz zu den eigenformaffinen Beulformen spiegeln die kollapsaffinen Imperfektionen sowohl die geometrischen als auch die materiellen Nichtlinearitäten wider, die sich auf dem Lösungspfad einstellen.

Erster Grundgedanke des Konzeptes quasi-kollapsaffiner Imperfektionen ist es, von der Versagensform der perfekten Schale auszugehen, wie sie sich als Ergebnis einer geometrisch und materiell nichtlinearen Analyse zeigt (Analyse Typ GMNA gem. [7]). Das beulauslösende Muster („stimulating“ pattern, [3]) ist die Versagensform im Initialstadium. Es offenbart die „Schwachstellen“ der Struktur und dient deshalb als Ausgangsform für die Imperfektion. Der zweite Grundgedanke besteht darin, nicht nur die sich bei der perfekten Schale realisierenden Versagensformen zu berücksichtigen, sondern auch solche von möglichen Versagensvorgängen, die mit einer höheren Versagenslast verbunden sind und sich deshalb bei der präzisen statischen Analyse nicht einstellen (zu Details vgl. [11]).

2.3 Imperfektionsgröße

In [7] werden Amplituden von Ersatzimperfektionen angegeben, die bei der numerischen Ermittlung von Beulwiderständen anzunehmen sind. Allerdings beziehen sich die

Regelungen nur auf die Vorbeulamplitude, weil von eigenformaffinen Imperfektionsmustern ausgegangen wird. Außerdem konnten die in [7] angegebenen Amplituden der anzusetzenden Ersatzimperfektionen wegen einer zu schmalen Datenbasis in vielen Geometriebereichen nicht auf Aufmaße realer Schalenträgerwerke gegründet werden. Mit den gegenwärtig anzunehmenden Vorbeulamplituden entstehen bereits bei den Basisbeulfällen z. T. deutliche Differenzen zwischen den Ergebnissen einer GMNIA-Analyse und den experimentell gesicherten Fraktilwerten der Tragfähigkeit (s. Abschn. 3 und [12], [13], [14], [15]).

Zur Korrektur von Unzulänglichkeiten des FE-Modells und der Imperfektionsannahmen ist in [7] ein Kalibrierungsfaktor für die Resultate der GMNIA-Analyse definiert. Erheblich von 1,0 abweichende Kalibrierungsfaktoren stellen eine systematische Fehlerquelle beim numerisch gestützten Beulsicherheitsnachweis nicht ausreichend experimentell erforschter Schalenbeulfälle dar. Deshalb ist in [7] eine Begrenzung des Kalibrierungsfaktors auf $0,8 \leq k_{GMNIA} \leq 1,2$ eingeführt. Durch diese Restriktion ist die Anwendung des GMNIA-Beulsicherheitsnachweises nicht in allen Geometriebereichen möglich. Sinnvoller ist es deshalb, konsistente Imperfektionsamplituden zu verwenden, mit denen man bei einer GMNIA-Berechnung die experimentell basierten Tragfähigkeiten erreicht.

Ein weiteres Problem stellt die Angabe der anzusetzenden Imperfektionsamplituden in Abhängigkeit von der Herstellqualitätsklasse dar. Bei der axial gedrückten Schale hat sich diese Vorgehensweise bewährt. Bei den Basisbeulfällen konstanter Umfangsdruck und Schub, bei denen dem globalen Versagen lokale Versagensvorgänge vorausgehen, ist dieses Konzept jedoch nur eingeschränkt anwendbar, weil sich bei größeren Imperfektionstiefen lokale Durchschlagpunkte in Spannungsprobleme umwandeln [12].

3 Mechanisch äquivalente Ersatzimperfektionen für die Grundbeulfälle

Die Entwicklung konsistenter Ersatzimperfektionen muß bei den Basisbeulfällen der Kreiszylinderschale einsetzen, weil nur hierfür eine Vielzahl experimentell ermittelter Vergleichslasten vorliegt.

Unter dem Gesichtspunkt der Praxisrelevanz, der einfacheren Handhabbarkeit und der besseren Vergleichbarkeit empfiehlt es sich, statt ausgedehnter Imperfektionsmuster Einzelvorbeulen aufzubringen. Das Konzept quasi-kollapsaffiner Imperfektionen führt dann bei der axialgedrückten Schale zu einer einzelnen Ringvorbeule [11], [14] und bei der Schale unter Umfangsdruck zu einer einzelnen Längsvorbeule [12] (vgl. Bild 6).

Verwendet man Einzelvorbeulen, stellt sich auch die Frage nach der Imperfektionslänge bzw. Imperfektionsbreite. Diese hat gegenüber der Imperfektionsamplitude einen größeren als bisher angenommenen Einfluß und muß deshalb explizit angegeben werden, um die Vergleichbarkeit der Resultate zu gewährleisten. Empfohlen wird, die Ausdehnung von Einzelvorbeulen in der Größe der Meßlänge für die zulässigen Geometrieabweichungen nach [7] zu wählen, weil diese Länge der „natürlichen“ Beullänge entspricht und Extremaleigenschaften besitzt [14]. Abweichend von [7] ist die Meßlänge in Umfangs-

richtung l_{90} für die Festlegung der geometrischen Ersatzimperfection nicht auf den Radius r zu begrenzen, um eigenformaffine Imperfectionen und Einzelvorbeulen mit „natürlichem“ Abklingverhalten in Ringrichtung (s. u.) konsistent zu bewerten.

Im folgenden wird die Problematik konsistenter geometrischer Ersatzimperfectionen am Beispiel der axialgedrückten Kreiszylinderschale exemplifiziert, während für die beiden anderen Grundbeulfälle auf weitere Arbeiten der Arbeitsgruppe des Verfassers hingewiesen wird (s. u.).

Bild 2 zeigt für die Herstell-Qualitätsklasse B die mit einer GMNIA-Berechnung ermittelten bezogenen Beulwiderstände im Vergleich zu den experimentell gewonnenen Werten des spannungsbasierten Beulsicherheitsnachweises, gekennzeichnet durch den Beulabminderungsfaktor χ . Als Imperfectionen werden die in [7] vorgeschlagene eigenformaffine Imperfection und eine konvexe sinusförmige Ringvorbeule verwendet, jeweils mit der nach [7] anzusetzenden Imperfectionsamplitude. Die nach außen gewölbte, d. h. konvexe Ringvorbeule ist gewählt, weil bei ihr die Imperfectionssensitivität monoton verläuft, während das bei der konkaven Ringvorbeule wegen verschiedener Versagensmodi nicht für alle Geometrien der Fall ist. Für kleine Imperfectionsamplituden entsteht bei der konkaven Ringvorbeule infolge der wirkenden Ringdruckkräfte ein in Ringrichtung mehrwelliges Beulmuster, während die Versagensform bei größeren Amplituden ebenso wie bei der konvexen Ringvorbeule affin zur Vorbeulform ist. Das Ringbeulmuster, das sich bei der konkaven Ringvorbeule für kleine Imperfectionsamplituden ausbildet, ist im Gegensatz zum Basisbeulfall Axialdruck stark abhängig von den Randbedingungen und von der Schalenhöhe, entspricht also den in Abschn. 2 genannten Grundanforderungen an Ersatzimperfectionen wesentlich schlechter als bei der konvexen Ringvorbeule.

Bild 2 zeigt zum einen, daß die konvexe, quasi-kollapsaffine Ringvorbeule deutlich ungünstiger ist als die in [7] empfohlene eigenformaffine. Zum anderen wird deutlich, daß auch für die quasi-kollapsaffine Ringvorbeule mit den gegenwärtig anzunehmenden Vorbeulamplituden z. T. deutliche Differenzen zwischen den Ergebnissen einer GMNIA-Analyse und den experimentell gesicherten Fraktilwerten der Tragfähigkeit entstehen. Konsistente Imperfectionsamplituden, d. h. Amplituden, die bei einer GMNIA-Analyse zu den experimentell gesicherten Mindesttragfähigkeiten führen, sind für die konvexe Ringvorbeule und Herstell-Toleranzklasse B in [15] angegeben. Sie stimmen überein mit der in Bild 4 angegebenen Kurve für $\xi = 1,0$. Für die konvexe Ringvorbeule müßten die ebenfalls in Bild 4 angegebenen Werte des Eurocode [7] bei sehr dünnwandigen Schalen deutlich vergrößert werden, um die charakteristischen Beulwiderstände des spannungsbasierten Beulsicherheitsnachweises zu erhalten. Die Ursache liegt in dem sich abflachenden Verlauf der Imperfectionssensitivitätskurven bei großen Imperfectionen [15]. Für sehr dünnwandige Schalen ist es deshalb nur schwer möglich, die experimentell ermittelte Tragfähigkeitsminderung gegenüber der perfekten Schale allein durch geometrische Ersatzimperfectionen zu erreichen, weil durch die großen erforderlichen Imperfectionsamplituden die kinematische Konsistenz der numerischen Modelle verletzt würde. Um das Problem geeigneter Ersatzim-

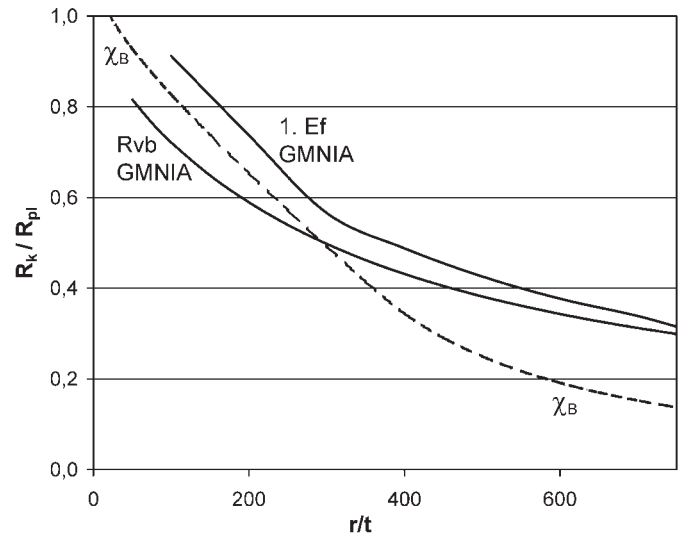


Bild 2. Bezogene Beulwiderstände gem. [7] in Abhängigkeit von r/t ; spannungsbasierter Beulsicherheitsnachweis und GMNIA-Beulsicherheitsnachweis; axial gedrückte Kreiszylinderschale, Qualitätsklasse B, $f_{y,k} = 235$ MPa; GMNIA mit konvexer Ringvorbeule (Rvb) mit $l_{0x} = 3,46 (r \cdot t)^{1/2}$ und mit eigenformaffiner Imperfection (1. Ef)

Fig. 2. Dimensionless buckling resistances accord. to [7] depending on r/t ; stress design and GMNIA; axially compressed cylindrical shell, quality class B, $f_{y,k} = 235$ MPa; GMNIA with convex ring-shaped imperfection (Rvb) with $l_{0x} = 3.46 (r \cdot t)^{1/2}$ and eigenmode affine imperfection (1. Ef)

perfectionen für dünnwandige Schalen zu lösen, bieten sich zwei Möglichkeiten an. Eine sehr aufwendige Variante ist die möglichst wirklichkeitsnahe Einbeziehung nicht nur geometrischer, sondern auch struktureller Imperfectionen. Die dafür erforderliche Datenerhebung stößt auf erhebliche Schwierigkeiten. Diese Variante kann deshalb nur im Einzelfall zur Nachrechnung bestehender Tragwerke Verwendung finden, nicht jedoch bei der Planung von zu errichtenden Schalenträgerwerken.

Sucht man nach Alternativen innerhalb des mit [7] gesteckten Rahmens, sämtliche Imperfectionseinflüsse allein durch geometrische Ersatzimperfectionen abzudecken, muß man bedenken, daß sich die unrealistisch großen Ersatzimperfectionen bei dünnwandigen Schalen ergeben, weil damit auch andere als geometrische Imperfectionseinflüsse sowie der Sicherheitsabstand abgedeckt werden müssen. Deshalb ist es denkbar, die Amplituden der geometrischen Imperfectionen so zu wählen, daß damit nur ein bestimmter Prozentsatz ξ der Tragfähigkeitsminderung gegenüber der plastischen Grenzlast bewirkt wird (Bild 3). Anschließend ist die berechnete Abminderung mit dem Faktor $1/\xi$ zu vergrößern, um den GMNIA-Beulwiderstand zu erhalten, bei dem strukturelle Imperfectionseinflüsse und der Sicherheitsabstand einbezogen sind.

Bild 4 zeigt, welche Amplituden bei der konvexen Ringvorbeule erforderlich sind, um einen bezogenen GMNIA-Beulwiderstand von $R_{GMNIA}/R_{pl} = 1 - \xi (1 - \chi_B)$ zu erhalten. Für $\xi = 1,0$ ergeben sich die bereits erwähnten konsistenten Imperfectionsamplituden, die die Abminderung auf den Wert des spannungsbasierten Beulsicherheitsnachweises χ_B bewirken. Man erkennt, daß sich der Charakter der Kurven für kleinere Werte ξ qualitativ ändert. Die in [7] angegebenen Imperfectionsamplituden bewirken bei

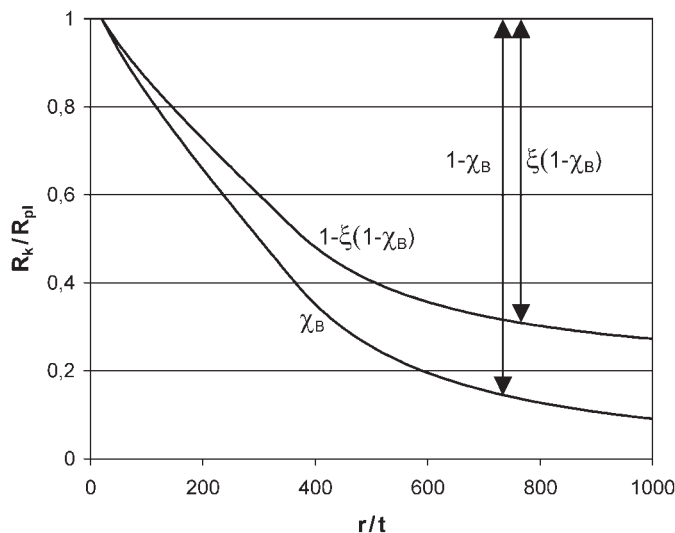


Bild 3. Tragfähigkeitsminderung für verschiedene Reduktionsfaktoren ξ in Abhängigkeit von r/t , mittellange axialgedrückte Kreiszylinderschale, Qualitätsklasse B; $C_x = 1,0$, $f_{y,k} = 235 \text{ MPa}$

Fig. 3. Stability reduction for several reduction factors ξ as a function of r/t ; medium-length cylinder subject to axial compression, quality class B, $C_x = 1,0$, $f_{y,k} = 235 \text{ MPa}$

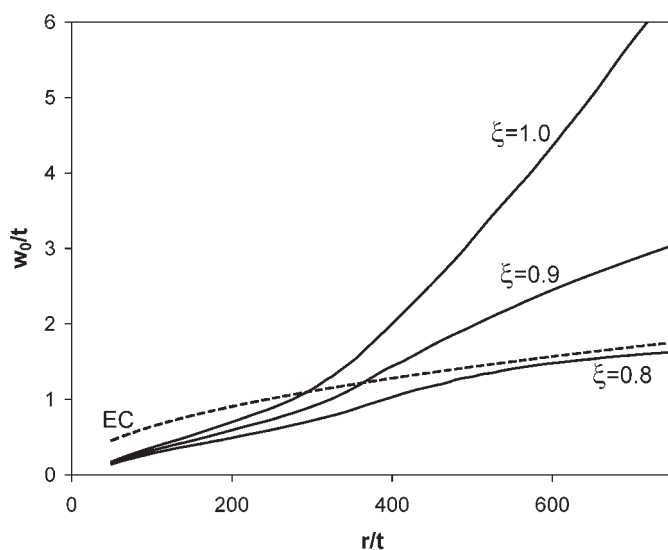


Bild 4. Erforderliche bezogene Vorbeultiefe w_0/t um bei einer GMNIA-Berechnung den bezogenen Beulwiderstand $R_{GMNIA}/R_{pl} = 1 - \xi(1 - \chi_B)$ zu erhalten sowie nach [7] anzusetzende Imperfektionsamplitude axialgedrückte Kreiszylinderschale Qualitätsklasse B, $f_{y,k} = 235 \text{ MPa}$; konvexe Ringvorbeule mit $l_{0x} = 3,46 (r \cdot t)^{1/2}$

Fig. 4. Required dimensionless imperfection amplitude w_0/t to obtain the dimensionless buckling resistance $R_{GMNIA}/R_{pl} = 1 - \xi(1 - \chi_B)$ within a GMNIA calculation as well as prescribed imperfection amplitude of [7]; axially compressed cylindrical shell, quality class B, $f_{y,k} = 235 \text{ MPa}$; convex ring-shaped imperfection, $l_{0x} = 3,46 (r \cdot t)^{1/2}$

dünnwandigen Schalen in etwa eine Abminderung der Tragfähigkeit gegenüber der plastischen Grenzlast auf 80 % der durch χ_B charakterisierten Tragfähigkeitsminderung. Die damit berechnete Tragfähigkeitsminderung müßte um den Faktor $1/0,80 = 1,25$ vergrößert werden, um den experimentell basierten charakteristischen Beulwiderstand des spannungsbasierten Beulsicherheitsnachweises zu erhalten. Mit dieser Vorgehensweise wäre sowohl der Grundsatz von

[7] beibehalten, allein geometrische Ersatzimperfectionen zu verwenden, als auch die kinematische Kompatibilität der Berechnungsmodelle gewährleistet.

Beim Grundbeulfall Umformsdruck führt die Anwendung des Konzeptes quasi-kollapsaffiner Imperfectionen zu einer konkaven Längsvorbeule als Imperfectionsform. Die konsequente Anwendung des Prinzips quasi-kollapsaffiner Imperfectionen würde beim Grundbeulfall Schub bzw. Torsionsschub zu einer schräg verlaufenden Längsvorbeule führen. Diese Art der Vorbeulform entspricht nicht der Grundanforderung an Ersatzimperfectionen, einfach in das FE-Modell implementierbar zu sein. Deshalb wird die Form weiter abstrahiert und eine konvexe Längsvorbeule gewählt [13]. Um möglichst wenige Formparameter zu erhalten und die Berechnung unempfindlich gegen numerische Probleme zu gestalten, ist es sinnvoll, bei den Lastfällen Manteldruck und Schub die zunächst verwendete „feste“ Längsvorbeule, bei der die Imperfektion auf der gesamten Vorbeulfläche fest vorgeschrieben ist, durch eine „natürliche“ Längsvorbeule zu ersetzen, bei der lediglich die Linie der maximalen Amplitude um einen definierten Wert verschoben wird und sich der übrige Bereich der Vorbeule gemäß dem natürlichen Abklingverhalten der Schale einstellt (Bild 5). Die natürliche Längsvorbeule bewirkt eine größere Tragfähigkeitsminderung und verbessert gleichzeitig die numerischen Lösungseigenschaften. Zu beachten ist, daß auf Grund des „Ausschwingens“ der Vorbeulform die eingeprägte Knotenverschiebung w_0^* nicht der Imperfektionsamplitude w_0 entspricht, wie sie mit Hilfe einer Meßlehre gemäß [7] ermittelt werden würde.

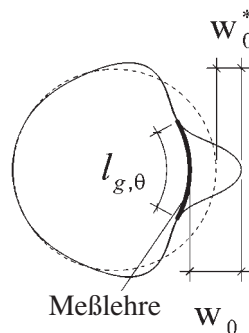


Bild 5. Querschnitt einer natürlichen Längsvorbeule (stark überhöht) mit Definition der Vorbeulamplituden und der Meßlänge $l_{g,\theta}$ gem. [7]

Fig. 5. Cross section of the natural longitudinal imperfection (scaled up) with definition of the imperfection amplitude and the gauge length $l_{g,\theta}$ acc. to [7]

Für den Lastfall Umformsdruck und Herstell-Qualitätsklasse B sind konsistente Imperfektionsamplituden für eine konkave feste Längsvorbeule in [12] angegeben. Für natürliche Längsvorbeulen werden sie gegenwärtig erarbeitet.

Für den Grundbeulfall Schub finden sich konsistente Imperfektionstiefen für natürliche Längsvorbeulen in [13].

4 Mechanisch äquivalente Ersatzimperfectionen für kombinierte Belastungsfälle

Deutlich schwieriger als bei den Grundbeulfällen ist die Situation bei Schalen unter kombinierter Belastung, da hierfür wesentlich weniger experimentelle Resultate vorliegen.

Bei kombinierter Belastung stellt sich die Frage, ob man eine vom Lastfall unabhängige Ersatzimperfectionsform wählen kann und soll. Wichtigstes Argument dafür ist, daß die Imperfektionen realer Schalenträgerwerke fertigungsbedingt und nicht lastbedingt sind.

Bei der Untersuchung verschiedener kombinierter Lastfälle zeigt sich dagegen, daß kombinierte Beulformen für kombinierte Belastungen weder notwendig noch sinnvoll sind [16]. Geeignet für kombinierte Belastungen sind stattdessen die o. g. konsistenten Ersatzimperfektionen der Basisbeulfälle, die man separat in verschiedenen Berechnungsgängen aufbringen muß. Die geringste der dabei berechneten Traglasten ist die maßgebende GMNIA-Beulast. Diese zunächst überraschende Vorgehensweise reflektiert die Tatsache, daß die experimentell basierten Mindesttragfähigkeiten an Schalen mit verschiedenen Imperfektionen ermittelt wurden. Bestimmt sind die experimentell ermittelten Mindesttragfähigkeiten durch die Versagenslasten von Schalen, deren Imperfektionen für den vorliegenden Lastfall besonders ungünstig sind. Dies bedeutet, daß die Beulabminderungskurven für verschiedene Belastungen durch unterschiedliche Imperfektionsformen bestimmt sind. Es wäre also nicht zielführend, bei kombinierten Lastfällen nur eine Imperfektionsform in Betracht zu ziehen.

Diese allgemeine Feststellung, bei kombinierten Lastfällen die Grundimperfectionsformen der maßgebenden Grundbeulfälle separat aufzubringen, wird abschließend an der Kragsschale mit Einzelquerlast am Schalenkopf exemplifiziert. Analoge Erörterungen für einen anderen wichtigen Schalenbeulfall mit kombinierter Belastung – die schlanke windbelastete Kragsschale – finden sich in [11] und [10].

Um das Tragverhalten der Kragsschale in Abhängigkeit der Geometrieparameter l/r (l Schalenhöhe) und r/t abschätzen zu können, werden zunächst geometrisch und materiell nichtlineare Berechnungen der perfekten Struktur (GMNA) durchgeführt. Unterhalb und rechts der in Bild 6 angegebenen GMNA-Abgrenzungskurve versagen die Schalen durch Axialdruckbeulen, oberhalb und links durch Schubbeulen. Besonders betont werden soll, daß der Übergang von der einen Beulform zur anderen nicht fließend verläuft, sondern der Wechsel zwischen den Beulformen schlagartig geschieht. Diese Tatsache hat einen entscheidenden Einfluß auf die vorgenommene Wahl der Ersatzimperfektion. In Bild 6 ist außerdem angegeben, wann welcher Einzelnachweis, also welche Versagensform, innerhalb des analytischen spannungsbasierten Beulsicherheitsnachweises („Stress Design“) gem. [7] maßgebend wird. Auffällig ist, daß die maßgebenden Versagensformen je nach Nachweis in einem großen Geometriebereich differieren. Die Berechnung der imperfekten Schale (zu Details vgl. [13]) verdeutlicht, daß die entstehende Diskrepanz zwischen den maßgebenden Beulformen bzw. -nachweisen der GMNA-Berechnung und dem Stress Design in der unterschiedlichen Imperfektionssensitivität der enthaltenen Beulfälle begründet liegt: Nach dem Konzept der quasi-kollapsaffinen Imperfektionen werden die Imperfektionsformen der Grundbeulfälle Axialdruck und Schub – konvexe Ringvorbeule und konvexe Längsvorbeule – mit den o. g. konsistenten Imperfektionsamplituden in getrennten Rechengängen bei allen Geometrien aufgebracht. Die niedrigste Tragfähigkeit markiert dann die maßgebende Imperfektions- und Versagensform. Da der Basisbeulfall

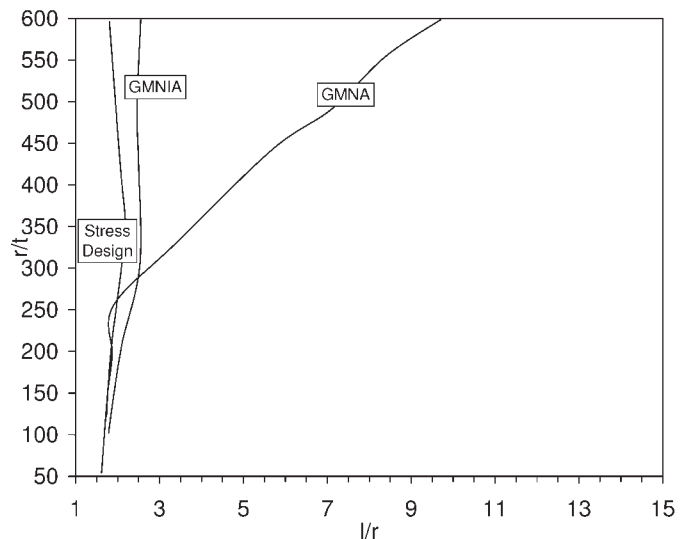


Bild 6. Grenzlinien der maßgebenden Beulformen bzw. -nachweise nach Stress Design, GMNA und GMNIA, Kragzylinder unter Einzelquerlast am Schalenkopf, $f_{yk} = 235$ MPa, Randbedingungen BC1r-BC1f, GMNIA mit konsistenten quasi-kollapsaffinen Imperfektionen

Fig. 6. Boundary of decisive buckling shapes and verifications according to stress design, GMNA and GMNIA, cantilevered shell subject to transverse top load, $f_{yk} = 235$ MPa, boundary conditions BC1r-BC1f, GMNIA with consistent quasi-collapse-affine imperfections

Axialdruck imperfektionssensitiver ist als der Beulfall Schub, vergrößert sich bei Berücksichtigung von Imperfektionen der Bereich, in dem Versagen unter Axialdruck maßgebend wird. Werden Imperfektionen in der angegebenen Weise berücksichtigt, werden durch den numerischen GMNIA-Beulsicherheitsnachweis die gleichen Versagensformen identifiziert wie durch das experimentell begründete Stress Design – zu erkennen an den nahezu deckungsgleichen Maßgeblichkeitsgrenzen.

5 Schlußfolgerungen

Erstens: Die Nachweisqualität des anspruchsvollsten numerischen Beulsicherheitsnachweises gem. Eurocode (GMNIA) hängt entscheidend von den angenommenen Ersatzimperfektionen ab. Hierbei bestehen noch gewichtige Kenntnislücken.

Zweitens: Bei Schalenträgerwerken gibt es die ungünstigste Imperfektionsform nicht, sondern von der Vorbeulamplitude abhängige unterschiedliche ungünstigste Muster.

Drittens: Ungünstiger als eigenformaffine Imperfektionen sind i. allg. quasi-kollapsaffine Imperfektionen, die aus dem Kollapsmuster der perfekten Schale gewonnen werden.

Viertens: Für die quasi-kollapsaffinen Imperfektionsformen der Grundbeulfälle lassen sich konsistente Imperfektionen angeben, mit denen sich bei der numerischen Berechnung die experimentell ermittelten Mindesttragfähigkeiten ergeben.

Fünftens: Eine kombinierte Imperfektionsform ist für kombinierte Belastungen weder notwendig noch sinnvoll. Stattdessen sind die Grundimperfektionsmuster der Basisbeulfälle in separaten Berechnungsgängen zu verwenden. Maßgebend ist jeweils diejenige Imperfektionsform, die zur geringsten Versagenslast führt.

Danksagung

Der Verfasser dankt Dipl.-Ing. *Andreas Brede*, Dipl.-Ing. *Marco Gettel*, Dr.-Ing. *Karsten Höhn*, cand. Ing. *Stefan Schönfeld* und Dr.-Ing. *Ingo Timmel* für ihre Beiträge zur behandelten Imperfektionsproblematik sowie der DFG für die Förderung der Arbeiten innerhalb des Vorhabens SCHN 578/2.

Literatur

- [1] *Rotter, J. M.*: Development of Proposed European Design Rules for Buckling of Axially Compressed Cylinders. *Advances in Structural Engineering*, Vol. 1, No. 4 (1998), pp. 273–286.
- [2] *Rotter, J. M.*: The new philosophy for shell buckling design. Submitted to *Journal of Constructional Steel Research*, 2006.
- [3] *Schmidt, H.*: Stability of steel shell structures – General Report. *JCSR* 55 (2000), pp. 159–181.
- [4] *Schmidt, H.*: Stahlbaunormen; Beulsicherheitsnachweise für Schalen nach DIN 18 800 Teil 4, E-DAST-Richtlinie 017 und DIN V ENV 1993-1-6. In: *U. Kuhlmann* (Hrsg.): *Stahlbau-Kalender 2002*. Berlin: Ernst & Sohn, 2002, S. 291–342.
- [5] *Winterstetter, T. A.*: Zum Nachweis der Beulsicherheit von Platten- und Schalentragwerken aus Stahl bei mehrachsiger Beanspruchung. *Stahlbau* 71 (2002), H. 11, S. 816–822.
- [6] *Schneider, W., Höhn, K., Timmel, I., Thiele, R.*: Strukturanalyse und Bemessung stählerner Kamine. *Bauingenieur* 79 (2004), H. 4, S. 155–166.
- [7] EN 1993-1-6: Eurocode 3, Design of steel structures – Part 1–6: General rules – Supplementary rules for the shell structures. Brussels: CEN 2006.
- [8] *Knödel, P., Ummenhofer, T.*: Substitute Imperfections for the Prediction of Buckling Loads in Shell Design. In: *Proc. Int. Workshop Imperf. in Metal Silos*, INSA, Lyon, France 1996, pp. 87–101.
- [9] *Teng, G. J.*: Buckling of thin shells: Recent advances and trends. *Appl. Mech. Rev.*, Vol. 49 (1996), No. 4, 1996, pp. 263–274.
- [10] *Schneider, W.*: Die „ungünstigste“ Imperfektionsform bei stählernen Schalentragwerken – eine Fiktion? *Bauingenieur* 79 (2004), H. 10, S. 436–442.
- [11] *Schneider, W., Timmel, I., Höhn, K.*: The Conception of Quasi-Collapse-Affine Imperfections – A new Approach to Unfavourable Imperfections of Thin-Walled Shell Structures. *Thin-Walled Structures* Vol. 43/8 (2005), pp. 1202–1224.
- [12] *Schneider, W., Brede, A.*: Consistent equivalent geometric imperfections for the numerical buckling strength verification of cylindrical shells under uniform external pressure. *Thin-Walled Structures* Vol. 43/2 (2005), pp. 175–188.
- [13] *Gettel, M., Schneider, W.*: Numerical buckling strength verification of cantilevered shell subjected to transverse loads. *Proc. Int. Colloquium on Stability and Ductility of Steel Structures*, Lisbon, Portugal, 2006.
- [14] *Schneider, W.*: Stimulating Equivalent Geometric Imperfections for the Numerical Buckling Strength Verification of Axially Compressed Cylindrical Steel Shells. *Comput. Mech.* Vol. 37/6 (2006), pp. 530–536.
- [15] *Schneider, W.*: Konsistente geometrische Ersatzimperfectionen für den numerisch gestützten Beulsicherheitsnachweis axial gedrückter Schalen. *Stahlbau* 73 (2004), H.4, S. 262–269.
- [16] *Schneider, W., Gettel, M.*: Equivalent Geometric Imperfections for Steel Shell Structures Subject to Combined Loading. *Proc. ECCM-2006 – III European Conference on Computational Mechanics*, Lisbon, Portugal, 2006.

Autor dieses Beitrages:

Prof. Dr.-Ing. Werner Schneider,
Universität Leipzig, Bereich Bauingenieurwesen,
Institut für Statik und Dynamik der Tragstrukturen,
Marschnerstraße 31, 04109 Leipzig