

7 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird der Einfluss des Beulens auf die Tragfähigkeit hochfester Walzprofile erforscht. Eine Gliederung erfolgt in zwei Themenschwerpunkte. Diese werden zum einen durch die Untersuchung beulgefährdeter Einzelbleche und zum anderen durch die Übertragung der am Einzelblech gewonnen Erkenntnisse auf hochfeste Walzprofile gebildet.

Die linearisierte Beultheorie ist auch heute noch eine unverzichtbare Hilfe zur Berechnung realer Tragfähigkeiten beulgefährdeter Platten. Hierzu erfolgt eine Übersicht zur Ermittlung idealer Beulspannungen und eine Zusammenstellung, Visualisierung und Erläuterung maßgebender Phänomene. Im Einzelnen werden die Form der Beulen in Abhängigkeit von der Beanspruchung, – Druck oder Schub –, der Einfluss der Geometrie, die Auswirkung einer Einspannung im Vergleich zu einer gelenkigen Längsrandlagerung und der Unterschied zwischen dreiseitig und vierseitig gelagerten Platten veranschaulicht.

Versuche belegen, dass das Versagen schlanker Platten nicht unmittelbar nach einer ersten Beulenbildung erfolgt. Trotz zunehmender Verformungen ist häufig eine weitere erhebliche Laststeigerung möglich. Dieses Phänomen wird durch eine Versuchsnachrechnung mit dem FE-Programmsystem Abaqus untersucht. Eine Darstellung der Spannungsverteilungen im Traglastzustand demonstriert die Ausbildung eines zweiachsigen Spannungszustands und erklärt eine daraus resultierende Tragfähigkeitssteigerung. Ebenso wird der zugehörige Verlauf der Blechbiegung in Plattenlängs- und in Plattenquerrichtung visualisiert und erläutert. Weitere Untersuchungen folgen für dreiseitig gelagerte Bleche. Eine Zusammenstellung der Versagensmechanismen unterschiedlich gelagerter Bleche schließt die Analyse maßgebender Beulphänomene ab.

Beulkurven sind ein wichtiges Hilfsmittel zur Berechnung realer Tragfähigkeiten beulgefährdeter Bleche. Nach einer Sichtung bekannter Versuchs- und Forschungsergebnisse wird durch eine neue schnittgrößenorientierte Darstellungsform ein Beitrag zum besseren Verständnis geleistet, Widersprüche an Übergängen einzelner Regelungen aufgedeckt und missverständliche Bestimmungen erläutert. Eine einfache Näherung erweitert die Berechnungsmöglichkeiten allseitig gelagerter Platten bis zur plastischen Tragfähigkeit. Für dreiseitig gelagerte Platten wird gezeigt, dass die in der DIN 18800 T1, Tabelle 1, Zeile 4 und 5 vorgegebene Beschränkung auf ein Randspannungsverhältnis $\psi = 1$ nicht notwendig ist und eine Diskussion der Regelungen im Eurocode 3 deckt Probleme beim Ansatz wirksamer Breiten auf. Die fundamentalen Erkenntnisse bilden die Grundlage zur Herleitung elementarer Gleichungen zur Grenzschnittgrößenberechnung mit Beuleinfluss rechteckiger Bleche.

Eine Beulgefahr zusammengesetzter Querschnitte wird nach DIN 18800 T1 durch einen Vergleich der vorhandenen Schlankheit (b/t) mit dem Grenzwert der Schlankheit $g_{lim}(b/t)$ überprüft. Grenzwerte $g_{lim}(b/t)$ werden unter der Annahme gelenkig

gelagerter Einzelbleche hergeleitet. Zur Berücksichtigung der Ausrundungsradien von Walzprofilen erfolgt die Entwicklung eines Hohlkastenmodells. Eine anschließende Untersuchung aller stegbeulgefährdeten Profile mit den FE-Programmsystemen Abaqus und RUB-Beulen zeigt, dass die hohe Torsionssteifigkeit der Ausrundungsradien zu einer Einspannung beulgefährdeter Profilverteile führt. Die maximale Abweichung der idealen Beulspannung zur Volleinspannung beträgt 4,5 %. Ausnahmen sind die Profile HEAA 600 bis 1000 und UPE 300 – 400 mit einer Abweichung von 6 – 10 %. Profile mit beulgefährdeten Gurten sind ebenfalls mit dem Programm RUB-Beulen und mit dem Programmsystem Abaqus unter Ansatz des Hohlkastenmodells untersucht worden. Anders als bei beulgefährdeten Stegen liegt der Einspanngrad nur bei ca. 70 – 90 %. Die gleichzeitige Prüfung der Zusatzbeanspruchung einspannender Bauteile ergibt, dass der Einfluss bei druck- und biegebeanspruchten Walzprofilen vernachlässigt werden kann. Als Ergebnis kann im Vergleich zur DIN 18800 T1 eine größere Anzahl hochfester Walzprofile als nicht beulgefährdet eingestuft werden. Ebenso zeigt sich für die verbleibenden Profile, dass eine Beulgefahr nur für eine überwiegende Druckbeanspruchung auftritt.

Zur Untersuchung des Beuleinflusses auf die Tragfähigkeit von Walzprofilen aus hochfestem Stahl erfolgt eine Zusammenstellung und Darstellung möglicher Beulphänomene beulgefährdeter I- und U-Profile und eine Übersicht bekannter Berechnungsmethoden. Es zeigt sich, dass kein bekanntes Verfahren geeignet ist, Tragfähigkeiten mit Beuleinfluss für sämtliche N - M_y - M_z -Schnittgrößenkombinationen einfach und ausreichend wirtschaftlich zu ermitteln. Abgesehen von den vielfach sehr aufwändigen Iterationen sind in den meisten Fällen Lösungen für Einzelprobleme optimiert worden, ohne über den gesamten Tragfähigkeitsbereich sinnvolle Lösungen zu ergeben. Aktuell muss der in der Praxis tätige Ingenieur in Abhängigkeit von der Querschnittsgeometrie und der Beanspruchung das beste Verfahren herausfinden.

Durch die Entwicklung einer Teilschnittgrößenoptimierung für beulgefährdete I- und U-Profile wird diese Lücke geschlossen. Zuerst erfolgt eine Herleitung elementarer Grundgleichungen und nachfolgend werden für unterschiedliche Schnittgrößenkombinationen und wechselnde beulgefährdete Einzelelemente systematische Nachweisbedingungen unter Berücksichtigung erforderlicher Beschränkungen hergeleitet. Eine Unterscheidung in Nachweisverfahren oder Querschnittsklassen ist nicht mehr notwendig. Bei der Bemessung wird automatisch die rechnerisch größte Tragfähigkeit ermittelt. Beispielhaft wird an hochfesten Walzprofilen der Einfluss des Beulens auf die Tragfähigkeit durch Interaktionskurven der Grenzschnittgrößen veranschaulicht. Einen Vergleich der Ergebnisse mit bekannten Methoden, Versuchstraglasten und mit an Versuchen kalibrierten FE-Berechnungen verifizieren die gewonnenen Erkenntnisse. Im Hinblick auf eine praktische Anwendung kann eine Teilschnittgrößenoptimierung den Einfluss des Beulens auf die Tragfähigkeit von I- und U-Profilen auf einfache Art und Weise visualisieren und eine Optimierung der Profilgeometrie unterstützen. Durch die Untersuchung aller möglichen Kombinationen beulgefährdeter Profilverteile ist eine Übertragung der gewonnenen Erkenntnisse auf geschweißte oder gekantete Profile problemlos möglich.