

Imperfektionssensitivität und rechnerischer Nachweis der Beulsicherheit dünner Schalen

**T 2232**

T 2232

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

Vervielfältigung, auch auszugsweise,  
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69  
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12  
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00  
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

# **Imperfektionssensitivität und rechnerischer Nachweis der Beulsicherheit dünner Schalen**

von

**Dipl.-Ing. Walter Wagenhuber**

Bericht Nr. 89-59

aus dem Institut für Statik  
der Technischen Universität Braunschweig  
Direktor: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h.H. Duddeck

Braunschweig 1989

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>1</b>
1.1	Problemstellung . . . . .	1
1.2	Lösungsansätze des Stabilitätsproblems der Rotationsschalen	7
<b>2</b>	<b>Das Berechnungsmodell und seine numerische Handhabung</b>	<b>13</b>
2.1	Die Theorie endlicher Verschiebungen . . . . .	13
2.2	Anwendung auf Schalentragwerke . . . . .	16
2.3	Die numerische Übersetzung . . . . .	24
2.4	Berechnungsverfahren für nichtlineare Probleme . . . . .	28
2.4.1	Newton-Raphson-Verfahren . . . . .	29
2.4.2	Berechnungsverfahren mit quasi viskosem Ansatz . .	30
<b>3</b>	<b>Stabilitätsuntersuchungen mit Hilfe des elastischen Potentials</b>	<b>34</b>
<b>4</b>	<b>Verfahren zur Erkundung kritischer Zustände und zur Be- rechnung von Nachbeulpfaden</b>	<b>41</b>
4.1	Lineare Eigenwertprobleme . . . . .	41
4.2	Störverfahren . . . . .	44
4.2.1	Imperfektionen als Störung . . . . .	44
4.2.2	Das Verfahren von Argyris . . . . .	45
4.2.3	Störverfahren als Nebenbedingung . . . . .	45
<b>5</b>	<b>Direkte Berechnung benachbarter Gleichgewichtszustände und kritischer Zustände im Lösungsraum</b>	<b>47</b>
5.1	Berechnung der im Tragwerk gespeicherten Energie bei Be- lastungen, Störungen und Imperfektionen . . . . .	47
5.2	Die nichtlineare Eigenwertanalyse zur Bestimmung benachbarter Gleichgewichtslagen . . . . .	50
5.3	Die nichtlineare Eigenwertanalyse zur Bestimmung von kritischen Zuständen . . . . .	53
5.4	Störung durch Addition von nichtlinear ermittelten Diffe- renzvektoren zur benachbarten Gleichgewichtslage . . . . .	60

<b>6</b>	<b>Anwendungsbeispiele zur nichtlinearen Eigenwertanalyse</b>	<b>61</b>
6.1	Kreisbogen unter mittiger Einzellast . . . . .	61
6.2	Kreiszynderschalen unter Axiallast . . . . .	68
6.2.1	Zylinderschale mit $\frac{r}{t} = 100$ . . . . .	68
6.2.2	Zylinderschale mit $\frac{r}{t} = 500$ . . . . .	80
6.2.3	Zylinderschale mit $\frac{r}{t} = 1000$ . . . . .	83
6.3	Gestauchte Zylinderschale mit $\frac{r}{t} = 100$ . . . . .	86
6.4	Kegelschale unter Axiallast und zusammengesetzte Kegel-Zylinderschale unter Axiallast . . . . .	88
<b>7</b>	<b>Ein Sicherheitskonzept zur rechnerischen Beulbemessung von Schalen</b>	<b>95</b>
7.1	Die Störenergie als Grundlage für die rechnerische Berücksichtigung der Imperfektionsempfindlichkeit von Schalenträgwerken . . . . .	96
7.2	Vorschlag für ein Bemessungskonzept . . . . .	99
<b>8</b>	<b>Parameterstudie über den Einfluß von Imperfektionen auf das Tragverhalten axial belasteter Kreiszynderschalen</b>	<b>102</b>
8.1	Zylinderschale mit $\frac{r}{t} = 100$ und geometrischen Imperfektionen . . . . .	102
8.1.1	Sinus-Imperfektion . . . . .	103
8.1.2	Örtliche Imperfektion . . . . .	107
8.1.3	Imperfektion in der Form der ungünstigsten Störform der perfekten Schale . . . . .	110
8.1.4	Vergleich der Sinus-Imperfektion und der örtlichen Imperfektion mit der Störform-Imperfektion . . . . .	114
8.1.5	Vergleich der Störform-Imperfektion mit der Eigenform-Imperfektion . . . . .	117
8.2	Zylinderschale mit $\frac{r}{t} = 1000$ und geometrischen Imperfektionen . . . . .	118
8.2.1	Sinus-Imperfektion . . . . .	119
8.2.2	Örtliche Imperfektion . . . . .	120
8.2.3	Imperfektion in der Form der ungünstigsten Störform der perfekten Schale . . . . .	121
8.2.4	Vergleich der Sinus-Imperfektion und der örtlichen Imperfektion mit der Störform-Imperfektion . . . . .	122

### III

8.2.5	Vergleich der Störform-Imperfektion mit der Eigenform-Imperfektion . . . . .	124
8.3	Zylinderschale mit $\frac{r}{t} = 100$ und einer Störlast-Imperfektion . . . . .	126
8.4	Zylinderschale mit $\frac{r}{t} = 1000$ und einer Störlast-Imperfektion . . . . .	127
8.5	Vergleich der Traglasten von Schalen mit fest vorgegebenen Imperfektionen mit den Bemessungstraglasten nach der DAST-Ri013 . . . . .	129
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>132</b>