
Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung und Zielsetzung	1
1.2	Stand der Forschung	5
1.3	Bezeichnungen, Annahmen und Voraussetzungen	8
1.4	Grundlegende Beziehungen	10
2	Schubspannungen und Querschnittsverwölbungen	14
2.1	Vorbemerkungen	14
2.2	Primäre Torsion	14
2.2.1	Beliebige Querschnitte	14
2.2.2	Dünnwandige Querschnitte	17
2.3	Querkraft und sekundäre Torsion	21
3	Virtuelle Arbeit ausgewählter Spannungszustände	24
3.1	Vorbemerkungen	24
3.2	Allgemeine Formulierung	24
3.3	Primärer Zustand	27
3.3.1	Beliebige Querschnitte	27
3.3.2	Dünnwandige Querschnitte	28
3.4	Sekundärer Zustand	29
3.4.1	Beliebige Querschnitte	29
3.4.2	Dünnwandige Querschnitte	31
4	Finite-Elemente-Methode für dünnwandige Querschnitte	33
4.1	Vorbemerkungen	33
4.2	Elementgeometrie	34
4.3	Verschiebungsansätze	35
4.4	Diskretisierung	36
4.4.1	Verwölbungen der primären Torsion – Normierte Wölbordinate	36
4.4.2	Verwölbung infolge Schub aus Querkraft und sekundärer Torsion	39
4.5	Berechnung von Querschnittskennwerten und Schubspannungen	42

4.5.1	Wölbflächenmoment 2. Grades	42
4.5.2	Torsionsträgheitsmoment	42
4.5.3	Schubspannungen aus primärer Torsion	44
4.5.4	Schubspannungen aus Querkraft und sekundärer Torsion	44
4.5.5	Schubmittelpunkt unter Verwendung des Querkraftschubes	46
4.6	Vorgehensweise und Anwendungsbeispiel	47
5	Finite-Elemente-Methode für beliebige Querschnitte	54
5.1	Vorbemerkungen	54
5.2	Elementgeometrie und Transformationsbeziehungen	55
5.3	Ansatzpolynome	57
5.4	Numerische Integration	58
5.5	Diskretisierung	60
5.5.1	Verwölbungen der primären Torsion – Normierte Wölbordinate	60
5.5.2	Verwölbung infolge Schub aus Querkraft und sekundärer Torsion	62
5.6	Berechnung von Querschnittskennwerten und Schubspannungen	63
5.6.1	Wölbflächenmoment 2. Grades	63
5.6.2	Torsionsträgheitsmoment und Schubspannungen der primären Torsion	63
5.6.3	Schubspannungen aus Querkraft und sekundärer Torsion	65
5.6.4	Hinweise zum Hauptachsensystem	65
5.7	Rechteckige Elemente	67
5.7.1	Einführung	67
5.7.2	Hinweise zur Elementgeometrie	67
5.7.3	Elementmatrizen	68
5.7.4	Berechnung von Querschnittskennwerten und Schubspannungen	71
5.8	Vorgehensweise	74
6	Numerische Umsetzung	76
6.1	Vorbemerkungen	76
6.2	Das Programm <i>QSW-FE ML</i>	76
6.3	Das Programm <i>QSW-FE</i>	80
6.3.1	Präprozessor	80
6.3.2	Haupt- und Postprozessor	82

7	Beispiele und Anwendungen	89
7.1	Vorbemerkungen	89
7.2	Rechteckige Vollquerschnitte	89
7.2.1	Genauigkeit und Konvergenzverhalten	89
7.2.2	Normierte Wölbordinate und Schubspannungen der Torsion	91
7.3	Näherungsverfahren zur Ermittlung von Wölbordinaten	93
7.3.1	Herleitung am rechteckigen Vollquerschnitt	93
7.3.2	Anwendung zur Bestimmung von $\max \omega$ für I- und U-Querschnitte	98
7.4	I-Querschnitte	99
7.4.1	Einfluss der Querschnittsmodellierung auf die Kennwerte	99
7.4.2	Diskussion der Schubspannungsverteilungen	106
7.5	U-Querschnitte	110
7.5.1	Normierte Wölbordinate und Schubspannungsverteilungen	110
7.5.2	Querschnittswerte für UPE-Profile	112
7.6	Beispiele zu Querschnitten mit Hohlzellen	117
7.6.1	Fußgängerbrücke mit Trapezsteifen	117
7.6.2	Zusammengesetzte Stützenquerschnitte	119
8	Zusammenfassung	124
	Literaturverzeichnis	127