

**Dipak Dutta**

# **Hohlprofil- Konstruktionen**

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Herstellungsverfahren für Stahlhohlprofile</b> .....	<b>19</b>
2.1	Allgemeines .....	19
2.2	Herstellungsverfahren nahtloser Rohre .....	19
2.2.1	Schrägwalz-/Pilgerschrittverfahren .....	21
2.2.2	Stoßbankverfahren .....	22
2.2.3	Stopfenwalzverfahren .....	22
2.2.4	Strangpreßverfahren .....	22
2.2.5	Rohrkonti-Walzverfahren .....	23
2.3	Herstellungsverfahren geschweißter Rohre .....	23
2.3.1	Unter-Pulver-Schweißverfahren .....	23
2.3.2	Schutzgasschweißverfahren .....	25
2.3.3	Feuerpreßschweißverfahren (Fretz-Moon) .....	25
2.3.4	Elektrisches Preßschweißverfahren .....	26
2.4	Streckreduzier- oder Reduzierverfahren .....	26
2.5	Herstellung rechteckiger und quadratischer Hohlprofile .....	26
2.6	Herstellung anderer Hohlprofilformen .....	27
2.7	Prüfungen von Stahlhohlprofilen .....	27
<b>3</b>	<b>Stähle für Hohlprofile</b> .....	<b>29</b>
3.1	Allgemeines .....	29
3.2	Auswahl der Stahlsorten für die Bemessung von Bauteilen .....	35
<b>4</b>	<b>Abmessungen, Toleranzen und statische Werte kreisförmiger, quadratischer und rechteckiger Hohlprofile</b> .....	<b>39</b>
4.1	Allgemeines .....	39
4.1.1	Kreisförmige Hohlprofile .....	39
4.1.2	Quadratische und rechteckige Hohlprofile .....	41
4.2	Geometrische und statische Kennwerte der Hohlprofile .....	43
4.2.1	Kreisförmige Hohlprofilquerschnitte .....	43
4.2.2	Rechteckige bzw. quadratische Hohlprofilquerschnitte .....	44
4.2.3	Größere Abmessungen der Rechteck-(Quadrat-)hohlprofile .....	45
<b>5</b>	<b>Grundlagen zur Berechnung und Bemessung von Hohlprofilen in Stahlbaukonstruktionen</b> .....	<b>47</b>
5.1	Allgemeines .....	47
5.2	Teilsicherheitsfaktoren .....	48
5.2.1	Einwirkungen und ihre Teilsicherheitsfaktoren .....	48
5.2.2	Widerstände und ihre Teilsicherheitsfaktoren .....	50
5.3	Beanspruchbarkeit der Querschnitte .....	50
5.3.1	Hohlprofile unter Normalkraft .....	51

5.3.2	Hohlprofile unter Biegung und Schub .....	52
5.3.2.1	Tragfähigkeitsermittlung bei reiner Biegung .....	52
5.3.2.2	Einachsige Biegung mit Normalkraft (ohne Querkraftberücksichtigung) .....	53
5.3.2.3	Zweiachsige Biegung mit Normalkraft (ohne Querkraftberücksichtigung) .....	53
5.3.2.4	Ermittlung der Schubspannungen in Hohlprofilen .....	54
5.3.2.5	Tragfähigkeitsermittlung bei Biegung (mit Querkraftberücksichtigung) .....	54
5.3.2.6	Vergleichsspannung bei Normalkraft und Schub .....	56
5.3.3	Stabilitätsfälle – Knicken und Beulen von Hohlprofilen .....	56
5.3.3.1	Nachweis gegen Biegeknicken .....	56
5.3.3.2	Örtliches Beulen .....	61
5.3.3.3	Hohlprofile unter zusammengesetzter Beanspruchung aus Druck und Biegung .....	71
5.3.3.4	Knicklänge .....	76
5.3.3.5	Beispielberechnungen .....	80
5.3.4	Torsionsbeanspruchte Hohlprofile .....	82
5.3.5	Symbolerklärungen .....	84
<b>6</b>	<b>Bauteile und Konstruktionen aus Hohlprofilen unter vorwiegend ruhender Beanspruchung</b> .....	<b>87</b>
6.1	Vollwandträger aus Einzelhohlprofilen .....	88
6.2	Stützen .....	88
6.2.1	Binderauflager auf Stützen .....	90
6.2.2	Verbindungen zwischen Balken und Stützen .....	92
6.3	Bogenträger .....	96
6.4	Rahmenecken .....	97
6.4.1	Rahmenecken aus kreisförmigen Hohlprofilen .....	101
6.5	Längsstoßverbindungen .....	102
6.5.1	Mittelbare Schraubenverbindungen .....	102
6.5.2	Mittelbare Schweißverbindungen .....	115
6.5.3	Unmittelbare Schweißverbindungen .....	115
6.6	Fachwerkträger .....	120
6.6.1	Ebene Fachwerkformen aus Hohlprofilen .....	122
6.6.1.1	Wirtschaftliche Aspekte bei der Wahl der Fachwerkformen .....	124
6.6.2	Knotengestaltung in Fachwerkträgern aus unmittelbar zusammengeschweißten Füll- und Gurtstäben .....	124
6.6.3	Schweißnähte in Fachwerkträgern aus unmittelbar geschweißten Füll- und Gurtstäben .....	129
6.6.3.1	Schweißnahtausführungen in Knotenpunkten von Hohlprofilfachwerken .....	133
6.6.3.2	Schweißabfolge in Hohlprofil-Fachwerkknoten .....	136
6.6.3.3	Schweißnähtlängen in Fachwerkknoten .....	136
6.6.4	Analyse des Tragverhaltens eines Fachwerkträgers aus Hohlprofilen .....	138
6.6.4.1	Tragfähigkeit von Fachwerkknoten aus unmittelbar geschweißten Gurt- und Füllstäben .....	141
6.6.4.2	Tragfähigkeit ausgesteifter Hohlprofilknoten unter vorwiegend ruhender Beanspruchung .....	172
6.6.4.3	Bemessung von Fachwerkknoten mit abgeknicktem Gurtstab .....	177
6.6.4.4	Traglasten geschweißter, ebener Knoten aus Hohlprofilstreben und I-Profilen als Gurtstäbe .....	177
6.6.4.5	Traglasten geschweißter, ebener Knoten aus Hohlprofilstreben und U-Profilen als Gurtstäbe .....	181
6.6.5	Bemessung ebener Fachwerkträger mit unmittelbar verschweißten Hohlprofilen ..	185

6.6.6	Traglasten besonderer ebener KHP-Knoten	188
6.6.7	Traglasten geschweißter, räumlicher Knoten	191
6.6.8	Hohlprofilknoten aus KHP-Füllstäben mit abgeflachten Enden	195
6.6.9	RHP-Knoten eines Doppelgurt-Fachwerkträgers	207
6.7	Hohlprofilknoten unter Momentenbeanspruchung bei Vierendeelträgern	209
6.7.1	T-Knoten aus RHP unter $M_{ip}$	210
6.7.2	X-Knoten aus RHP unter $M_{ip}$	214
6.7.3	Interaktion von Normalkraft $N_i$ und ebenem Biegemoment $M_{ip}$ in T- und X-Knoten aus RHP	214
6.7.4	Bemessung T-förmiger, geschweißter RHP-Knoten unter Normalkraft $N_i$ und Biegemoment $M_{ip}$ mit Hilfe von Bemessungsdiagrammen	214
6.7.5	T-, Y- und X-Knoten aus KHP unter $M_{ip}$	216
6.7.6	T-Knoten in Vierendeelträgern aus RHP	218
6.7.7	Traglasten für Momente aus der Ebene $M_{op,i,Rd}$ in KHP- und RHP-Knoten	221
6.7.7.1	Momentenbeanspruchbarkeit aus der Ebene $M_{op,i,Rd}$ für RHP-Knoten	221
6.7.7.2	Momentenbeanspruchbarkeit aus der Ebene $M_{op,i,Rd}$ für KHP-Knoten	221
6.8	T- und X-Verbindungen von Blechen, I-Profilen oder RHP-Querschnitten mit KHP bzw. RHP	222
6.8.1	T- und X-Verbindungen aus KHP-Gurtstäben	222
6.8.2	T-Verbindungen aus RHP-Gurtstäben	225
6.9	Hinweise zur Bemessung von Balken-Stützen-Verbindungen	225
6.9.1	RHP-Stütze mit I-Balken	225
6.9.2	I-Stütze mit RHP-Balken	227
6.10	Sonderverbindung aus RHP mit schnabelförmigen RHP-Füllstabenden	228
6.11	Symbolerklärungen	229
<b>7</b>	<b>Zeit- und Dauerfestigkeit geschweißter Hohlprofilverbindungen</b>	<b>233</b>
7.1	Allgemeines zur Schwingfestigkeit	233
7.2	Betriebsfestigkeit unter einem Beanspruchungskollektiv	237
7.3	Einfluß der Eigenspannungen auf die Schwingfestigkeit von Hohlprofilknoten	238
7.4	Einfluß der korrosiven Umgebung auf die Schwingfestigkeit von Hohlprofilknoten	239
7.5	Spannungs- bzw. Dehnungsverteilung in Hohlprofilverbindungen	239
7.5.1	Spannungskonzentrationsfaktor SCF (Stress Concentration Factor) und Dehnungskonzentrationsfaktor SNCF (Strain Concentration Factor)	244
7.5.1.1	Experimentelle Messung der Dehnungen mit Dehnungsmeßstreifen (DMS)	244
7.5.1.2	Theoretische Bestimmung der Spannungen bzw. Dehnungen mit Hilfe der „Finite-Elemente“-Methode	246
7.5.1.3	Bestimmung des Spannungs- bzw. Dehnungskonzentrationsfaktors (SCF bzw. SNCF)	248
7.5.1.4	Bestimmung der Gesamtspitzen Spannungsschwingbreite $S_{r,hs,ges}$ mit Hilfe der Spannungskonzentrationsfaktoren	250
7.5.1.5	Parametrische Formeln zur Bestimmung der Spannungskonzentrationsfaktoren SCF in Hohlprofilknoten	250
7.6	Einflüsse sekundärer Biegemomente in geschweißten K- und N-förmigen Fachwerkknoten aus QHP und KHP	277
7.7	Basis-„ $S_{r,hs}-N_B$ “-Linien für ebene KHP- und QHP-Knoten (T, X, K, N und KT)	278
7.7.1	Korrektur-Faktoren für Wanddicken des Gurt- und Füllstabes und Bemessungskurven „ $S_{r,hs}-N_B$ “	280
7.7.2	Einsatz hochfester Stahlsorten	282

7.8	Basis-„ $S_{r,hs}-N_B$ “-Linien für räumliche KHP- und QHP-Knoten (TT, XX und KK) . . . . .	284
7.9	Bemessungsverfahren für Ermüdungsfestigkeit ebener bzw. räumlicher Fachwerkknoten aus KHP oder QHP . . . . .	287
7.10	Bemessungsverfahren für Ermüdungsfestigkeit bei Hohlprofilverbindungen und -fachwerkknoten nach der „Klassifikations“-Methode . . . . .	288
7.10.1	Laschen-Verbindungen mit KHP . . . . .	292
7.10.2	Modifizierungsempfehlung der Kerbgruppennummern von Hohlprofilknoten nach EC 3 . . . . .	292
7.11	Einfluß örtlicher Verstärkungen durch Bleche auf die Schwingfestigkeit in RHP-Knoten . . . . .	294
7.12	Reparatur und Sanierung von Hohlprofilknoten im rißbruchkritischen Bereich . . . . .	297
7.12.1	Anbringen eines Rißstoppers in Form einer Bohrung . . . . .	300
7.12.2	Abschleifen bzw. Ausfugen des Risses und Nachweißen . . . . .	300
7.12.3	Anbringen einer Platte oder Schale auf dem Gurtflansch (Riß am Gurtoberflansch) . . . . .	300
7.12.4	Anbringen von Eckstücken aus Rechthohlprofilen . . . . .	300
7.13	Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit durch mechanische und thermische Verfahren . . . . .	301
7.13.1	Wärmebehandlung . . . . .	301
7.13.2	Kugelstrahlen und Hämmern . . . . .	303
7.13.3	Einmalige Zugbelastung des Bauteils . . . . .	303
7.13.4	Vibrationsentspannung . . . . .	303
7.13.5	Schleifen der Nahtübergänge . . . . .	303
7.13.6	WIG- oder Plasma-Nachbehandlung . . . . .	303
7.14	Symbolerklärungen . . . . .	304
<b>8</b>	<b>Herstellung, Zusammenbau und Transport von Hohlprofilkonstruktionen . . . . .</b>	<b>307</b>
8.1	Allgemeines . . . . .	307
8.2	Schneiden . . . . .	308
8.2.1	Brennschneiden . . . . .	308
8.2.1.1	Manuelles Brennschneiden . . . . .	309
8.2.1.2	Automatisches, maschinelles Brennschneiden . . . . .	310
8.2.2	Sägen . . . . .	312
8.2.3	Plasma-Schmelzschnitten . . . . .	315
8.2.4	Laserschneiden . . . . .	315
8.3	Schlitzten . . . . .	315
8.4	Flach- und Andrücken von Hohlprofilenden . . . . .	317
8.5	Biegen von Hohlprofilen . . . . .	317
8.5.1	Kaltbiegen von KHP . . . . .	318
8.5.1.1	Kaltes Biegepressen . . . . .	318
8.5.1.2	Kaltbiegen mit Biegekasten . . . . .	318
8.5.1.3	Biegen mit Dreiwalzenbiegemaschine . . . . .	319
8.5.1.4	Bogen, erzeugt durch Gehrungsschnitte oder „V“-förmige Ausschnitte . . . . .	319
8.5.2	Kaltbiegen von RHP . . . . .	320
8.5.2.1	Kaltes Biegepressen . . . . .	320
8.5.2.2	Bogen, erzeugt durch Gehrungsschnitte oder „V“-förmige Ausschnitte . . . . .	320
8.5.2.3	Biegen mit Dreiwalzenbiegemaschine . . . . .	320
8.5.3	Warmbiegen von Hohlprofilen . . . . .	320
8.5.3.1	Warmbiegen von Hohlprofilen mit Sandfüllung . . . . .	320
8.5.3.2	„Hamburger Rohrbogen“ (nur für KHP) . . . . .	321
8.5.3.3	Biegen durch induktive Erwärmung . . . . .	321

8.5.3.4	Warmbiegen mit Dreiwalzenbiegemaschine .....	322
8.5.3.5	Wölbung .....	322
8.6	Verschrauben .....	322
8.6.1	Blindschrauben .....	323
8.6.1.1	Flowdrill .....	323
8.6.1.2	Lindapter „HolloFast“ .....	323
8.7	Schweißen .....	324
8.7.1	Hohlprofil-Werkstoffe und deren Schweißbeignung .....	324
8.7.2	Schweißverfahren zum Verbindungsschweißen von Hohlprofilen .....	325
8.7.2.1	Elektro-Lichtbogenhandschweißen mit umhüllten Elektroden .....	325
8.7.2.2	Schutzgasschweißen .....	326
8.7.2.3	Schweißen mit Fülldrahtelektroden .....	327
8.7.2.4	Unterpulverschweißen .....	327
8.7.3	Schweißnahtvorbereitung für Hohlprofilkonstruktionen .....	327
8.7.4	Schweißlagen und -reihenfolge .....	328
8.7.5	Heftschweißen .....	328
8.7.6	Wärmebehandlung nach dem Schweißen .....	328
8.7.7	Schweißelgenschaften und Verformungen sowie Abbaumaßnahmen .....	328
8.7.8	Schweißfehler und deren Reparatur .....	331
8.7.9	Schweißnahtprüfungen .....	331
8.7.9.1	Sichtkontrolle .....	331
8.7.9.2	Magnetpulverprüfung .....	333
8.7.9.3	Farbeindringverfahren .....	333
8.7.9.4	Ultraschallprüfung .....	333
8.7.9.5	Durchstrahlungsprüfung (Röntgen- und $\gamma$ -Strahlen) .....	334
8.7.10	Eignungsprüfung der Schweißer und Schweißbetriebe .....	334
8.7.11	Schweißen kaltgefertigter Hohlprofile .....	335
8.7.12	Bolzenschweißen .....	335
8.7.13	Laserschweißen .....	336
8.7.14	Allgemeine Empfehlungen zum Schweißen .....	336
8.8	Nageln .....	337
8.9	Anwendung von Gußteilen in Hohlprofilkonstruktionen .....	338
8.10	Zusammenbau .....	339
8.11	Transport von Hohlprofilen und Hohlprofilkonstruktionen .....	341
8.12	Symbolerklärungen .....	343
<b>9</b>	<b>Raumfachwerke .....</b>	<b>345</b>
9.1	Allgemeines .....	345
9.2	Hinweise zur Berechnung von Raumfachwerken .....	348
9.3	Konstruktionsteile von Raumfachwerken .....	349
9.4	Wirtschaftlich optimierte Raumfachwerke .....	350
<b>10</b>	<b>Einspannung rechteckiger Hohlprofile in Betonfundamente .....</b>	<b>353</b>
<b>11</b>	<b>Hohlprofile im Verbundbau .....</b>	<b>357</b>
11.1	Hohlprofil-Verbundstützen .....	357
11.1.1	Berechnung der Tragfähigkeit von Hohlprofil-Verbundstützen .....	358
11.1.1.1	Allgemeines .....	358
11.1.1.2	Planmäßig mittiger Druck .....	358

11.1.1.3	Einfluß des Langzeitverhaltens des Betons auf die Tragfähigkeit schlanker Stützen .....	360
11.1.1.4	Erhöhte Tragfähigkeit bei gedrunenen betongefüllten KHP .....	360
11.1.1.5	Druck und einachsige Biegung .....	360
11.1.1.6	Grenztragfähigkeit der Querschnitte bei Druck und Biegung .....	361
11.1.1.7	Druck und zweiachsige Biegung .....	368
11.1.1.8	Näherungsberechnung für M-N-Interaktion bei betongefüllten Hohlprofilen .....	368
11.1.1.9	Nachweis der Schubübertragung .....	369
11.1.1.10	Lasteinleitung .....	371
11.2	Hohlprofil (RHP oder QHP)-Fachwerkknoten mit betongefülltem Gurtstab .....	373
11.3	Herstellung von betongefüllten Hohlprofilstützen .....	374
11.3.1	Bauteilkomponenten .....	374
11.3.1.1	Hohlprofile .....	374
11.3.1.2	Beton .....	374
11.3.1.3	Bewehrungen .....	375
11.3.2	Ausführung der Betonfüllung bei Hohlprofilstützen .....	376
11.3.2.1	Geschoßweise Verbindung betongefüllter Hohlprofilstützen .....	379
11.4	Symbolerklärungen .....	379
<b>12</b>	<b>Korrosionsverhalten und Korrosionsschutz von Stahlhohlprofilen und -konstruktionen .....</b>	<b>381</b>
12.1	Allgemeines .....	381
12.2	Innenkorrosion von Hohlprofilen und Hohlprofilbauteilen .....	381
12.3	Außenkorrosion von Hohlprofilen und Hohlprofilbauteilen .....	383
12.4	Korrosionsschutzmaßnahmen .....	384
12.4.1	Korrosionsschutzbeschichtungen .....	384
12.4.1.1	Fertigungsbeschichtungen .....	385
12.4.2	Metallspritzüberzüge .....	385
12.4.2.1	Feuerverzinken .....	385
12.4.2.2	Elektrolytische Zinküberzüge .....	386
12.4.3	Elektrochemische Polarisierung .....	387
12.4.4	Einsatz von Hohlprofilen aus wetterfesten Stählen .....	387
<b>13</b>	<b>Bauelemente aus Hohlprofilen unter Brandbeanspruchung .....</b>	<b>389</b>
13.1	Allgemeines .....	389
13.2	Ungeschützte Hohlprofile unter Brandbeanspruchung .....	392
13.3	Brandschutz von Hohlprofilen durch äußere Brandschutzisolierung .....	393
13.3.1	Brandschutzummantelungen .....	393
13.3.2	Brandschutzbeschichtungen .....	394
13.3.3	Bemessung der äußeren Brandschutzisolierung .....	394
13.4	Brandschutz von Stahlhohlprofilen durch Wasserkühlung .....	394
13.4.1	Grundsätzliches zu den Wasserkühlungssystemen .....	394
13.4.2	Bemessungsmethoden für Wasserkühlungsanlagen .....	398
13.5	Brandschutz von Stahlhohlprofilstützen mit Betonfüllung .....	398
13.5.1	Grundsätzliches .....	399
13.5.2	Brandschutztechnische Bemessung betongefüllter Hohlprofile ohne Außenisolierung .....	401
13.5.2.1	Bemessungsstufe 1: Tabellierte Werte .....	401
13.5.2.2	Bemessungsstufe 2: Vereinfachte Bemessungsdiagramme .....	402
13.5.2.3	Bemessungsstufe 3: Allgemeine Berechnungsverfahren .....	402

13.5.3	Brandschutz von betongefüllten Hohlprofilstützen mit Stahlfaser-Bewehrung	432
13.6	Brandschutz von Hohlprofilstützen/Träger-Verbindungen	432
13.6.1	Ungefüllte Hohlprofilstützen mit oder ohne Außenisolierung	432
13.6.2	Betongefüllte Hohlprofilstützen	432
13.6.3	Wassergekühlte Hohlprofilstützen	433
13.7	Symbolerklärungen	434
<b>14</b>	<b>Windwiderstände kreisförmiger und rechteckiger Hohlprofile und Fachwerke</b>	<b>437</b>
14.1	Allgemeines	437
14.2	Windwiderstand des einzelnen kreiszylindrischen Stabes	437
14.3	Windwiderstand des einzelnen Quadratprofilstabes mit Eckradien	439
14.4	Windwiderstand von Fachwerken	440
14.5	Windwiderstandsbeiwerte kreiszylindrischer Hohlprofile und Fachwerke nach DIN 1055-4 Ausg. 8/86	444
14.6	Windkräfte auf ebene und räumliche Fachwerke aus Quadrathohlprofilen nach Lit. [16]	446
14.6.1	Ebene Fachwerke	446
14.6.2	Räumliche Fachwerke mit rechteckigem und quadratischem Grundriß	447
14.6.3	Berechnungsbeispiel	448
14.7	Windwiderstände nach Eurocode 1	449
14.7.1	Windbelastung	449
14.7.1.1	Windkraftbeiwert $C_f$ für rechteckige Hohlprofile mit abgerundeten Ecken	450
14.7.1.2	Windkraftbeiwert $C_f$ für kreiszylindrische Stäbe mit $\lambda = l/d$	451
14.7.1.3	Windkraftbeiwert $C_f$ für Fachwerke und Gerüste	451
14.8	Symbolerklärungen	453
	Anlagen I–III: Nennabmessungen und statische Werte von Hohlprofilen	455
	Anlage IV: Neuere Traglastformeln für ebene und räumliche Knoten aus kreisförmigen Hohlprofilen	499
	Literaturverzeichnis	503
	Register	525