

Inhaltsverzeichnis

Bezeichnungen	XV
1 Einführung	1
1.1 Fragen und Erwartungen an eine Konstruktionslehre	2
1.2 Das Problemfeld der Leichtbaukonstruktion	8
1.3 Zum Inhalt des Buches	10
2 Strukturentwurf	15
2.1 Zielmodell und Entscheidungsparameter	16
2.1.1 Kostenmodell	18
2.1.1.1 Kenngrößen des Entwurfs, Variationsebenen	18
2.1.1.2 Flächen-, Volumen- und Gewichtsfunktionen	19
2.1.1.3 Ansatz für ein Kostenmodell, Einfluß des Gewichtes	21
2.1.1.4 Gewichts- und Kostenmodell eines Fachwerks	21
2.1.1.5 Werkstoff- und Topologieentscheidung am Beispiel Fachwerk	23
2.1.2 Vergrößerungsfaktor der Zusatzgewichte	24
2.1.2.1 Eigenbelastete Strukturen, Gesamtgewicht über Nutzlast	24
2.1.2.2 Definition und Bestimmung des Vergrößerungsfaktors	26
2.1.2.3 Vergrößerungsfaktoren mehrstufiger Systeme	26
2.1.2.4 Der Vergrößerungsfaktor als Entscheidungsparameter	28
2.2 Beispiel Tragflügelstruktur Bauteilfunktionen	29
2.2.1 Resultierende Schnittlasten am schlanken Tragflügel	30
2.2.1.1 Lastvielfaches und Sicherheitsfaktor	30
2.2.1.2 Verteilung der Luft- und Massenkräfte am Tragflügel	31
2.2.1.3 Bestimmung der resultierenden Schnittlasten	33
2.2.2 Strukturkonzept des Biegetorsionsträgers	33
2.2.2.1 Elementare Kraftflüsse im Kastenquerschnitt	34
2.2.2.2 Wahl der Bauweise, Vordimensionierung der Kastenwände	35
2.2.2.3 Strukturkennwerte als Ähnlichkeitskennzahlen	38
2.2.3 Spezielle Funktionen einzelner Bauteile	39
2.2.3.1 Tragende Funktionen, Kraftwege im Explosionsbild	39
2.2.3.2 Funktionen der Kräfteinteilung und der Kräfteumleitung	42
2.2.3.3 Stützende und stabilisierende Funktionen	44
3 Werkstoffe und Bauweisen	46
3.1 Metallische Werkstoffe	47
3.1.1 Spannungs-Dehnungs-Verhalten	48
3.1.1.1 Charakteristisches Werkstoffverhalten im Zugversuch	48

VIII Inhaltsverzeichnis

3.1.1.2 Elastisch-plastisches Verhalten von Aluminiumlegierungen	50
3.1.1.3 Elastisch-plastisches Verhalten anderer Metalle	51
3.1.1.4 Verhalten bei zweiachsiger Beanspruchung	52
3.1.2 Einflüsse der Plastizität auf das Bauteilverhalten	54
3.1.2.1 Plastische Biegung, bleibende Krümmung und Restspannungen	54
3.1.2.2 Plastischer Abbau von Kerbspannungsspitzen	56
3.1.2.3 Einfluß der Plastizität auf Knicken und Beulen	57
3.1.2.4 Plastische Arbeitsaufnahme bei Knautschelementen	58
3.1.3 Verhalten bei dynamischer und bei thermischer Beanspruchung	60
3.1.3.1 Wechsel- und Schwellfestigkeit über der Lastspielzahl	60
3.1.3.2 Statische und dynamische Warmfestigkeit	62
3.2 Verbundbauweisen	64
3.2.1 Faserkunststoffverbunde	65
3.2.1.1 Mechanische Eigenschaften der Fasern und der Matrix	66
3.2.1.2 Unidirektionale Faserlamine	68
3.2.1.3 Steifigkeiten und Festigkeiten einiger Schichtlamine	71
3.2.1.4 Viskoelastizität der Faserkunststoffe	73
3.2.1.5 Herstellung von Fasern und Faserlamine	74
3.2.2 Hybridbauweisen	75
3.2.2.1 Aufbau von Hybridlamine und Hybridverbunden	76
3.2.2.2 Tragverhalten unidirektionaler Hybridverbunde	77
3.2.2.3 Thermische Eigenspannungen und Verformungen	78
3.2.3 Sandwichbauweise	79
3.2.3.1 Aufbau und Herstellung des Sandwichverbundes	80
3.2.3.2 Besondere Festigkeits- und Konstruktionsprobleme	82
3.2.3.3 Vergleichende Beurteilung der Sandwichbauweise	83
3.3 Gewichtsbezogene Bewertungen	84
3.3.1 Gewichtsbezogene Materialkenngrößen	85
3.3.1.1 Festigkeiten	86
3.3.1.2 Steifigkeiten	88
3.3.1.3 Arbeitsaufnahme	90
3.3.2 Bewertung schichtspezifisch differenzierter Verbunde	91
3.3.2.1 Steife und feste Sandwichverbunde	91
3.3.2.2 Hybrid-Schichtverbunde hoher elastischer Arbeitsfähigkeit	92
3.3.3 Einfluß von Lastverhältnis, Geometrie und Strukturkennwert	93
3.3.3.1 Festigkeitswertung bei Druckbehältern	94
3.3.3.2 Steifigkeitswertung bei gekrümmten Platten	95
3.3.3.3 Steifigkeits- und Festigkeitswertung als Strukturproblem	96
4 Bauteiloptimierung über den Strukturkennwert	97
4.1 Der Strukturkennwert und seine Funktionen	99
4.1.1 Definition des Strukturkennwertes	100
4.1.1.1 Punktbelastete Tragwerke	101
4.1.1.2 Linienbelastete Tragwerke	102
4.1.1.3 Flächenbelastete Tragwerke	103
4.1.1.4 Volumenbelastete Tragwerke	104
4.1.2 Funktionen des Strukturkennwertes	105
4.1.2.1 Gewöhnliche Kennwertfunktionen in Potenzform	106
4.1.2.2 Logarithmische Darstellung der Zielfunktionen	107
4.1.2.3 Abweichungen von der Potenzform	107
4.1.2.4 Materialwertung über den Strukturkennwert	109

4.2 Auslegung für Festigkeit und Steifigkeit	110
4.2.1 Festigkeitsauslegung von Zugträgern mit Anschlußelementen	111
4.2.1.1 Zugseil oder Zugstab mit Anschlußknoten	111
4.2.1.2 Zugmembran oder Zugscheibe mit Anschlußnaht	113
4.2.1.3 Materialbewertung für Zugelemente	113
4.2.2 Auslegung von Balken-Biegeträgern	114
4.2.2.1 Balken mit rechteckigem Vollquerschnitt	115
4.2.2.2 Balken mit I- oder Kastenquerschnitt	117
4.2.2.3 Balken mit einfachsymmetrischem T-Querschnitt	120
4.2.2.4 Vergleich der Profiltypen über den Strukturkennwert	123
4.2.3 Auslegung von Platten-Biegeträgern	124
4.2.3.1 Platte mit homogenem Vollquerschnitt	125
4.2.3.2 Integralplattenprofil mit einseitigen Längsstegen	125
4.2.3.3 Sandwichplatte mit schubstarrem Kern	128
4.2.3.4 Sandwichplatte mit schubweichem Kern	132
4.2.3.5 Vergleich der Plattenbauweisen über den Kennwert	134
4.2.3.6 Vorteile des Trägers gleicher Festigkeit	134
4.3 Auslegung gegen Knicken und Beulen	137
4.3.1 Auslegung von Druckstäben	139
4.3.1.1 Druckstab mit rundem oder rechteckigem Vollquerschnitt	139
4.3.1.2 Druckstab mit Hohlquerschnitt	141
4.3.1.3 Druckstab mit Füllquerschnitt	143
4.3.1.4 Druckstab mit I-Profil	145
4.3.1.5 Vergleich der Bauweisen über den Stabkennwert	147
4.3.1.6 Druckstab mit längs veränderlichem Radius	148
4.3.2 Auslegung längsgedrückter Plattenstäbe	149
4.3.2.1 Platte mit homogenem Vollquerschnitt	150
4.3.2.2 Sandwichplatte mit schubstarrem Kern	151
4.3.2.3 Sandwichplattenstab mit schubweichem Kern	154
4.3.2.4 Integralplattenprofil mit einfachen Längsstegen	156
4.3.2.5 Plattenprofil mit geflanschten Stegen oder Stringern	159
4.3.2.6 Vergleich der Bauweisen über den Plattenstabkennwert	161
4.3.3 Auslegung längsgedrückter Plattenstreifen	162
4.3.3.1 Überkritische Auslegung isotroper Hautstreifen	164
4.3.3.2 Orthotroper Sandwichstreifen mit schubweichem Kern	165
4.3.3.3 Orthotroper Plattenstreifen mit Längsstegen	168
4.3.3.4 Orthotroper Plattenstreifen mit Kreuzverrippung	169
4.3.3.5 Plattenstreifen mit äquidistanten Einzelrippen	172
4.3.3.6 Vergleich der Bauweisen über den Plattenstreifenkennwert	179
4.3.4 Auslegung axial gedrückter Kreiszylinderschalen	180
4.3.4.1 Axialbelastete, unversteifte Schale mit Innendruck	181
4.3.4.2 Axial gedrückte Zylinderschale in Sandwichbauweise	184
4.3.4.3 Axial gedrückte Zylinderschale mit Waffelverrippung	187
4.3.4.4 Längsgestringerte Schale mit äquidistanten Einzelspannen	188
4.3.4.5 Vergleich der Bauweisen über den Zylinderkennwert	189
4.3.4.6 Zylinderbauweisen für Druckstäbe	190
4.3.5 Auslegung ebener Schubwände	192
4.3.5.1 Isotrope Schubwand, homogen oder in Sandwichbauweise	193
4.3.5.2 Schubwand mit äquidistanten Einzelrippen	196
4.3.5.3 Überkritische Schubwand, Zugfeld mit Pfosten	199
4.3.5.4 Orthotrope Schubwand, Einfluß der Steifenorientierung	203
4.3.5.5 Symmetrische Fachwerkschubwand	204
4.3.5.6 Unsymmetrische Fachwerkschubwand	207
4.3.5.7 Vergleich der Bauweisen über den Schubwandkennwert	211
4.3.6 Längsgestringerte Platte unter Druck- und Schubbelastung	212
4.3.6.1 Längsgestringerte Platte aus isotropem Material	212

X Inhaltsverzeichnis

4.3.6.2 Längsgestringerte, optimierte CFK-Platte	213
4.3.6.3 Bauweisenvergleich	214
4.4 Einfluß des Eigengewichtes auf die Konstruktion	215
4.4.1 Eigenlasteinfluß bei Zug- oder Biegebeanspruchung	216
4.4.1.1 Zugkonstruktion unter Nutz- und Eigenlast	217
4.4.1.2 Homogene Biegeplatte unter Nutz- und Eigenlast	218
4.4.1.3 Kastenträger vorgegebener Höhe, Eigenlasteinfluß	220
4.4.2 Einfluß des Eigengewichtes bei Knicken und Beulen	222
4.4.2.1 Knicken senkrechter Masten bei Eigenlast	222
4.4.2.2 Beulen senkrechter Rohrschalen bei Eigenlast	222
4.4.2.3 Versagen horizontaler Kastenträger bei Eigenlast	224
4.5 Optimierung im vielfach begrenzten Entwurfsraum	225
4.5.1 Tragwerke für Einzellastfall (single-purpose)	226
4.5.1.1 Hohlstab unter Längsdruck	226
4.5.1.2 Füllstab unter Längsdruck	229
4.5.1.3 Sandwichplatte unter Querlastbiegung	231
4.5.1.4 Sandwichplatte unter Längsdruck	232
4.5.1.5 Längsversteifte Platte unter Querlastbiegung	232
4.5.1.6 Längsversteifte Platte unter Längsdruck	233
4.5.2 Tragwerke für mehrere Lastfälle (multi-purpose)	235
4.5.2.1 Sandwichplatte unter Biegung oder/und Längsdruck	235
4.5.2.2 Sandwichplatte unter Schub oder/und Längsdruck	237
4.5.2.3 Orthotrope Platte unter Schub oder/und Längsdruck	238
4.5.2.4 Sandwichkessel unter Innendruck oder/und Längsdruck	239
4.5.2.5 Orthotroper Kessel unter Innendruck oder/und Längsdruck	241
4.5.2.6 Orthotrope Kastenwand unter Längszug oder Längsdruck	241
5 Entwurf und Optimierung von Kräftepfaden	245
5.1 Grundlegende Entwurfstheorie für Stab- und Netzwerke	247
5.1.1 Theoreme über optimale Dehnungsfelder	249
5.1.1.1 Satz von Maxwell	249
5.1.1.2 Satz von Michell	251
5.1.1.3 Konstruktion kontinuierlicher Michellsysteme	253
5.1.2 Beispiele zugbeanspruchter Optimalstrukturen	255
5.1.2.1 Alternative Stabwerke zu Punktlastgruppen	255
5.1.2.2 Alternative Strukturen für Zentrifugalkräfte	257
5.1.2.3 Netzflächenelement bei positivem Hauptlastverhältnis	258
5.1.2.4 Druckbehälter als Maxwellstruktur	262
5.1.3 Beispiele gemischt zug- und druckbeanspruchter Strukturen	263
5.1.3.1 Schubwand als Netz- oder Fachwerkstruktur	264
5.1.3.2 Symmetrische Lastgruppe, Zweistützträger für Einzellast	266
5.1.3.3 Kragträger für Einzel- und Linienlast	270
5.2 Fachwerkentwurf durch Lineare Programmierung	273
5.2.1 Formulierung des LP-Problems, Leistung des Verfahrens	274
5.2.1.1 Vorgehensweise nach dem Michellprinzip	274
5.2.1.2 Annäherung eines Michellkragträgers	276
5.2.1.3 Einschränkung zulässiger Kräftepfade	278
5.2.1.4 Duale Formulierung des LP-Problems	280
5.2.1.5 Berücksichtigung des Stabknickens	281
5.2.2 Räumliche Fachwerke minimalen Volumens	283
5.2.2.1 Problemformat, Reduzierung des Rechenaufwandes	284
5.2.2.2 Möglichkeiten räumlicher Entwurfsrasterung	285
5.2.2.3 Mehrschichtiges Hallendach mit Kubusstruktur	287
5.2.2.4 Zweischichtiges Dach mit Oktaeder-Tetraeder-Struktur	289

5.2.2.5	Einschichtiges, tonnenförmiges Hallendach	290
5.2.2.6	Wert des Entwurfsverfahrens für die Konstruktion	291
5.2.3	Entwurfsoptimierung von Fachwerken nach Kostenkriterien	292
5.2.3.1	Definition der Kosten-Zielfunktion	293
5.2.3.2	Kostenminimaler Entwurf bei linearer Zielfunktion	294
5.2.3.3	Kostenminimale Entwürfe bei nichtlinearer Zielfunktion	296
5.3	Formentwicklung statisch bestimmter Fachwerke	298
5.3.1	Formulierung des Optimierungsproblems	299
5.3.1.1	Vorgaben und Variable der Formentwicklung	299
5.3.1.2	Restriktionen der Formentwicklung	301
5.3.1.3	Zielfunktion der Formentwicklung	302
5.3.2	Strategien der Formentwicklung	305
5.3.2.1	Direkte Suchverfahren	306
5.3.2.2	Evolutionsstrategische Verfahren	306
5.3.3	Ergebnisse reiner Formentwicklung ebener Fachwerke	308
5.3.3.1	Einfluß des Stabknickproblems	308
5.3.3.2	Einfluß des Knotenaufwandes	310
5.3.3.3	Einfluß des Eigengewichts als Zusatzlast	310
5.3.3.4	Einfluß wechselnder Lastfälle (Mehrzweckstruktur)	312
5.3.4	Formentwicklung mit Entwurfsoptimierung	313
5.3.4.1	Entwicklung nach alternativen Topologieentwürfen	314
5.3.4.2	Annäherung einer Michellstruktur	315
5.3.4.3	Topologievereinfachung durch zyklisches Verfahren	316
5.4	Optimierung statisch unbestimmter Fach- und Flächenwerke	317
5.4.1	Optimaldimensionierung statisch unbestimmter Fachwerke	319
5.4.1.1	Dreistabsystem als Demonstrationsbeispiel	319
5.4.1.2	Entwicklung zu optimaler Kragträgertopologie	321
5.4.2	Isotropes Scheibenkontinuum	323
5.4.2.1	Dickendimensionierung nach der Spannungsgrenze	323
5.4.2.2	Entwurfsstrategische Auslegung der Scheibe	325
5.4.2.3	Dickenoptimierung über Funktionsansätze	326
5.4.2.4	Formoptimierung über Funktionsansätze	328
5.4.3	Faserschichtlaminat als orthotropes Kontinuum	330
5.4.3.1	Innendruckbehälter aus Glasfaserkunststoff	330
5.4.3.2	Schubwand aus Glasfaserkunststoff	332
6	Krafteinleitung, Ausschnitte und Verbindungen	334
6.1	Einleitung und Umleitung von Scheibenkräften durch Gurte	336
6.1.1	Gurtauslegung zur Längskrafteinleitung in Rechteckscheibe	337
6.1.1.1	Einfluß des Gurtes auf die Mittragende Scheibenbreite	338
6.1.1.2	Auslegung eines Einleitungsgurtes konstanter Spannung	338
6.1.1.3	Einfluß der Scheibenorthotropie auf die Gurtabnahme	340
6.1.1.4	Scheibe mit bereichsweise unterschiedlicher Steifigkeit	341
6.1.1.5	Besondere Maßnahmen zur Festigkeit	342
6.1.2	Scheibenausschnitte bei Randgurten, Neutralisierung	343
6.1.2.1	Elliptischer Ausschnitt mit konstant steifem Randgurt	344
6.1.2.2	Form- und Steifigkeitsgesetz des Neutralen Ausschnitts	345
6.1.2.3	Realisierung Neutraler Ausschnitte, Segmentbauweise	347
6.1.2.4	Quasi neutrale Konstruktionen für Rechteckausschnitte	349
6.2	Klebeverbindungen zur Übertragung von Zug und Schub	350
6.2.1	Spannungsverteilungen nach elastischer Theorie	351
6.2.1.1	Analogie zum Sandwich- und zum Längsgurtmodell	352

XII Inhaltsverzeichnis

6.2.1.2 Überlappungsverbindung zur Zugübertragung	353
6.2.1.3 Durchlaufende Scheibe mit Querstreifenpflaster	355
6.2.1.4 Überlappungen und Pflaster bei Schubübertragung	356
6.2.1.5 Schubspannungsspitzen bei Zug- und Schubübertragung	358
6.2.1.6 Schälspannungen in zugübertragenden Überlappungen	358
6.2.1.7 Einfluß der Blechbiegung auf die Kleberschubspannung	359
6.2.2 Auslegen und Gestalten von Klebeverbindungen, Tragfähigkeit	360
6.2.2.1 Verhalten, Modul und Festigkeit des Klebers	361
6.2.2.2 Elastizitätstheoretische Auslegung einfacher Überlappungen	362
6.2.2.3 Geschäftete oder mehrschichtig gestufte Verbindungslaschen	363
6.2.2.4 Tragfähigkeit nach Versuchen, Plastizitätseinfluß	365
6.2.3 Zeitverhalten überlappter Klebeverbindungen	366
6.2.3.1 Schwingfestigkeit der Klebeverbindung	366
6.2.3.2 Festigkeitsverlust durch Langzeitbelastung und Alterung	367
6.2.3.3 Kriechen der Klebeverbindung unter Langzeitbelastung	367
6.3 Niet- und Schraubverbindungen	369
6.3.1 Statische Dimensionierung, Kräfteverteilung auf Nietreihen	369
6.3.1.1 Dimensionierung und Wirkungsgrad bei plastischem Ausgleich	370
6.3.1.2 Statisch unbestimmte Kraftverteilung auf Nietreihen	371
6.3.1.3 Maßnahmen zum Kräfteausgleich	373
6.3.2 Zugspannungsspitzen an Bohrungsrändern, Ermüdungsfestigkeit	374
6.3.2.1 Dimensionierungsaspekte bei elastischen Spannungsspitzen	374
6.3.2.2 Ermüdungsfestigkeit von Nietverbindungen	376
6.3.2.3 Vergleich zwischen Niet-, Punkt- und Klebeverbindungen	378
6.4 Flache Verstärkungen, Pflaster, Laschen und Winkel	379
6.4.1 Analyse und Auslegung flächenhafter Verstärkungen	380
6.4.1.1 Spannungsanalyse an elliptischen Verstärkungen ohne Loch	381
6.4.1.2 Kreissymmetrischer Lastfall, Neutralisierung des Loches	382
6.4.1.3 Lochverstärkungen für verschiedene Scheibenbelastungen	383
6.4.1.4 Versuchsergebnisse an GFK-Laminaten	384
6.4.2 Einfluß der Klebung bei Pflastern und Laschen	386
6.4.2.1 Verstärkendes Rundpflaster (Ring) um eine Bohrung	387
6.4.2.2 Deckendes Rundpflaster über einer Bohrung	387
6.4.2.3 Rechteckiges Pflaster über einem Riß	388
6.4.2.4 Rechteckige Lasche zur Kräfteeinleitung	390
6.4.3 Fügung profiliertter Platten, Rippen- und Spantanschlüsse	392
6.4.3.1 Querstoße längsversteifter Platten	392
6.4.3.2 Anschluß von Rippen oder Spanen an gestringerte Flächen	394
7 Sicherheit und Zuverlässigkeit	396
7.1 Zuverlässigkeit bei Normalverteilungen	398
7.1.1 Zuverlässigkeit von Bauteilen und Tragsystemen	399
7.1.1.1 Häufigkeitsverteilung und Wahrscheinlichkeitsintegral	400
7.1.1.2 Ermittlung einer Häufigkeitsverteilung	402
7.1.1.3 Zuverlässigkeit von Funktionsketten	402
7.1.1.4 Zuverlässigkeit von Funktionsgruppen (Parallelsystemen)	404
7.1.2 Sicherheitsfaktor, Streufaktoren und Zuverlässigkeit	407
7.1.2.1 Sicherheit bei streuender Festigkeit und streuender Last	407
7.1.2.2 Optimierung der Sicherheitsfaktoren in Funktionsketten	410
7.2 Schwingfestigkeit und Lebensdauer	413
7.2.1 Schwingfestigkeit bei Einstufenbelastung	414
7.2.1.1 Kurzzeitfestigkeit, Zeitfestigkeit und Dauerfestigkeit	414

7.2.1.2 Kerbwirkung, Einfluß der Formzahl	416
7.2.1.3 Einfluß des Spannungsverhältnisses und der Mittelspannung	418
7.2.1.4 Streuung der Schwingfestigkeit	420
7.2.1.5 Ermüdung von Faserlaminaten	421
7.2.2 Schwingfestigkeit bei Betriebsbelastung	422
7.2.2.1 Zählverfahren zur Aufstellung von Lastkollektiven	423
7.2.2.2 Typische Formen des Lastkollektivs	424
7.2.2.3 Ergebnisse mehrstufiger Programmversuche	425
7.2.2.4 Hypothese der linearen Schadensakkumulation	426
7.3 Schadenstolerante und ausfallsichere Konstruktionen	428
7.3.1 Spannungsintensität und Rißfortschritt	429
7.3.1.1 Rißausbreitung unter zunehmender Last, Restfestigkeit	429
7.3.1.2 Rißfortschritt unter konstant schwingender Last	431
7.3.1.3 Rißfortschritt bei veränderlich schwingender Last	432
7.3.2 Behinderte Rißausbreitung, Maßnahmen und Wirkungen	433
7.3.2.1 Rißverzögerung durch Parallelemente	434
7.3.2.2 Spannungsintensität des angerissenen Bleches mit Längssteifen	435
7.3.2.3 Restfestigkeit des angerissenen Bleches mit Längssteifen	436
7.3.2.4 Blechrißfortschritt und Stringerbruch bei schwingender Last	437
7.3.3 Ausfallsichere unterteilte Konstruktion	438
7.3.3.1 Ausfallsicherheit einer Gruppe ausdimensionierter Elemente	440
7.3.3.2 Ausfallsicherheit eines nicht ausdimensionierten Stabwerks	441
7.3.3.3 Ausfallsicherheit eines Faser-Hybridverbundes	443
7.3.3.4 Ausfallsicherheit einer zweifach geschlossenen Torsionsröhre	444
7.3.3.5 Hilfsstrukturen zur Kräfteumleitung bei Teilausfällen	446
Literatur	448
Sachverzeichnis	455