

|         |  |    |
|---------|--|----|
| 1       | <u>Begriffe</u> .....                          | 1  |
| 1.1     | Integrierte Bauweise.....                      | 1  |
| 1.2     | Verbundkonstruktionen.....                     | 2  |
| 1.3     | Sandwichtechnik.....                           | 7  |
| 1.4     | Stahlprofile und Stahlprofilbleche.....        | 12 |
|         | Literatur.....                                 | 25 |
| 2       | Einwirkungen.....                              | 26 |
| 2.1     | Schwergewichtslasten.....                      | 27 |
| 2.1.1   | Eigengewicht.....                              | 27 |
| 2.1.2   | Nutzlasten.....                                | 27 |
| 2.2     | Atmosphärische Einwirkungen.....               | 34 |
| 2.2.1   | Schneebelastung.....                           | 35 |
| 2.2.1.1 | Auswertung von Schneemessungen.....            | 35 |
| 2.2.1.2 | Bestimmung von Langzeitlastkollektiven.....    | 37 |
| 2.2.2   | Windbelastung.....                             | 42 |
| 2.2.2.1 | Der natürliche Wind und seine Störungen.....   | 43 |
| 2.2.2.2 | Windlastannahmen nach Normen.....              | 46 |
| 2.2.3   | Temperatureinwirkung.....                      | 52 |
| 2.2.3.1 | Klimatologische Grundlagen.....                | 52 |
| 2.2.3.2 | Temperatureinwirkung auf Sandwichbauteile..... | 56 |
| 2.3     | Katastrophale Einwirkungen.....                | 57 |
| 2.3.1   | Brand.....                                     | 57 |
| 2.3.1.1 | Bemessungskonzept für Industriebauten.....     | 57 |
| 2.3.1.2 | Brandbelastung.....                            | 60 |
| 2.3.1.3 | Erforderliche Feuerwiderstandsdauer.....       | 63 |

|         |  |     |
|---------|--|-----|
| 2.3.2   | Erdbeben.....  | 65  |
| 2.3.3   | Explosion.....   | 70  |
|         | Literatur.....   | 72  |
| 3       | <u>Entwurfsoptimierung</u> .....                                   | 74  |
| 3.1     | Der generelle Optimierungsbegriff.....                             | 74  |
| 3.2     | Sicherheitsanforderungen für Bauteile.....                         | 76  |
| 3.2.1   | Grundlagen deterministischer und probabilistischer Sicherheit..... | 76  |
| 3.2.2   | Sicherheitsnachweise nach Normen.....                              | 78  |
| 3.2.3   | Grenztragfähigkeit.....  | 79  |
| 3.3     | Baulicher Brandschutz.....   | 81  |
| 3.3.1   | Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen.....                   | 81  |
| 3.3.2   | Feuerwiderstand von Verbundstäben.....                             | 84  |
| 3.3.3   | Feuerwiderstand von Verbunddecken.....                             | 87  |
| 3.3.4   | Feuerwiderstand von Verbunddächern.....                            | 89  |
| 3.3.5   | Feuerwiderstand von Verbundwänden.....                             | 93  |
| 3.4     | Bauphysikalische Erfordernisse.....                                | 94  |
| 3.4.1   | Wärmeschutz.....   | 94  |
| 3.4.1.1 | Anforderungen, Begriffe.....                                       | 94  |
| 3.4.1.2 | Erhöhter Wärmeschutz nach gesetzlichen Bestimmungen                | 97  |
| 3.4.1.3 | Sommerlicher Wärmeschutz.....                                      | 98  |
| 3.4.2   | Schallschutz.....  | 99  |
| 3.4.2.1 | Anforderungen, Begriffe.....                                       | 99  |
| 3.4.2.2 | Luftschalldämmung.....   | 100 |
| 3.4.2.3 | Trittschalldämmung.....  | 102 |
| 3.4.3   | Feuchteschutz.....   | 104 |
| 3.4.3.1 | Anforderungen, Begriffe.....                                       | 104 |
| 3.4.3.2 | Luft- und Baustofffeuchte.....                                     | 105 |
| 3.4.3.3 | Dampfdiffusion und Kondensation bei Bauteilen.....                 | 106 |
|         | Literatur.....   | 108 |

|         |   |     |
|---------|---|-----|
| 4       | <u>Stahlprofil/Beton-Verbundstäbe.....</u>  | 110 |
| 4.1     | Der Profilverbund.....  | 110 |
| 4.2     | Grenztragfähigkeit von Verbundprofilen.....   | 116 |
| 4.2.1   | Biegemomente.....   | 116 |
| 4.2.2   | Querkräfte.....   | 118 |
| 4.2.3   | Längskräfte.....  | 120 |
| 4.3     | Schnittkraft-Interaktion.....   | 121 |
| 4.3.1   | Biegemoment und Querkraft.....  | 121 |
| 4.3.2   | Biegemoment und Längskraft.....   | 122 |
| 4.3.3   | Biegemoment, Quer- und Längskraft.....  | 122 |
| 4.3.4   | Zweiachsige Biegung.....  | 124 |
| 4.4     | Bemessung von Verbundprofil-Bauteilen unter Raumtemperatur.....                       | 125 |
| 4.4.1   | Verbundprofil-Stützen.....  | 125 |
| 4.4.1.1 | Mittiger Druck.....   | 129 |
| 4.4.1.2 | Druck und Biegung.....  | 131 |
| 4.4.2   | Verbundprofil-Biegeträger.....  | 133 |
| 4.4.3   | Verbundprofil-Rahmentragwerke.....  | 136 |
| 4.4.4   | Grenztragfähigkeit von Verbundprofil-Knoten.....                                      | 138 |
| 4.5     | Verbundstäbe im Hochtemperaturbereich.....  | 141 |
| 4.5.1   | Einflüsse auf die Feuerwiderstandsdauer.....  | 141 |
| 4.5.2   | Instationäre Temperaturfelder bei Verbundprofilen..                                   | 143 |
| 4.5.2.1 | Thermische Belastung.....   | 143 |
| 4.5.2.2 | Wärmeübertragung vom Brandraum auf das Bauteil.....                                   | 144 |
| 4.5.2.3 | Wärmeübertragung infolge Leitung im Bauteil.....                                      | 145 |
| 4.5.2.4 | Zweidimensionales Wärmeleitproblem am Beispiel eines Stützenquerschnitts.....         | 146 |
| 4.5.2.5 | Dreidimensionales Wärmeleitproblem am Beispiel eines Stützen-Riegelanschlusses.....   | 150 |
| 4.5.2.6 | Parameterstudien zum Erwärmungsverhalten.....   | 154 |
| 4.5.3   | Temperaturabhängige Rechenwertfestigkeiten.....                                       | 158 |
| 4.5.4   | Studien zur Berechnung homogener Stahlprofil-Druckstäbe im Hochtemperaturbereich..... | 158 |

|         |  |     |
|---------|--|-----|
| 4.6     | Brand-Traglastberechnung für Verbundprofil-Bauteile  | 161 |
| 4.6.1   | Verbundprofil-Druckstäbe.....  | 161 |
| 4.6.1.1 | Berechnung mit Hilfe von Temperaturfeldern.....  | 162 |
| 4.6.1.2 | Vereinfachtes Näherungsverfahren mittels eines<br>brandreduzierten Ersatzquerschnitts..... | 165 |
| 4.6.1.3 | Bemessungshilfen.....  | 168 |
| 4.6.2   | Verbundprofil-Biegeträger.....   | 171 |
| 4.6.3   | Verbundprofil-Rahmentragwerke.....   | 176 |
| 4.7     | Traglastversuche bei Raumtemperatur.....   | 177 |
| 4.7.1   | Verbundprofil-Stützen.....   | 177 |
| 4.7.1.1 | Strangpreßprofile.....   | 177 |
| 4.7.1.2 | Faserbeton.....  | 183 |
| 4.7.2   | Verbundprofil-Biegeträger.....   | 185 |
| 4.7.3   | Verbundprofil-Rahmentragwerke.....   | 187 |
| 4.7.3.1 | Versuchsprogramm.....  | 187 |
| 4.7.3.2 | Einfluß der Verbundwirkungen.....  | 190 |
| 4.7.3.3 | Einfluß von Quer- und Längskraft.....  | 191 |
| 4.7.3.4 | Knotentragfähigkeit.....   | 197 |
| 4.8     | Brandversuche.....   | 197 |
| 4.8.1   | Verbundprofil-Stützen.....   | 197 |
| 4.8.1.1 | Walzprofile.....   | 197 |
| 4.8.1.2 | Strangpreßprofile.....   | 200 |
| 4.8.2   | Verbundprofil-Plattenbalken.....   | 202 |
| 4.8.3   | Verbundprofil-Rahmenträger.....  | 204 |
| 4.8.4   | Verbundprofil-Anschlüsse.....  | 207 |
| 4.9     | Beispiele.....   | 211 |
| 4.9.1   | Planmäßig zentrisch belastete Verbundprofil-Stütze.  | 211 |
| 4.9.2   | Verbundprofil-Plattenbalken.....   | 216 |
| 4.9.3   | Verbundprofil-Rahmenträger.....  | 220 |
|         | Literatur.....   | 225 |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| <b>5</b> | <b><u>Stahlprofilblech/Beton-Verbundplatte</u></b> .....    | <b>228</b> |
| 5.1      | Verbundwirkungen.....                                       | 228        |
| 5.1.1    | Haftverbund.....  | 228        |
| 5.1.2    | Flächenverdübelung.....                                     | 230        |
| 5.2      | Bemessung.....  | 233        |
| 5.2.1    | Grenzlast- und Gebrauchsfähigkeitsnachweise.....            | 233        |
| 5.2.2    | Biegebeanspruchung.....                                     | 234        |
| 5.2.3    | Schubbeanspruchung.....                                     | 236        |
| 5.2.3.1  | Querkraftaufnahme.....                                      | 236        |
| 5.2.3.2  | Verdübelung.....  | 240        |
| 5.2.4    | Verformungen.....   | 243        |
| 5.3      | Versuche.....   | 244        |
| 5.3.1    | Versuchsprogramm.....                                       | 244        |
| 5.3.2    | Scherversuche.....  | 245        |
| 5.3.3    | Querkraftversuche.....                                      | 249        |
| 5.3.4    | Biegeversuche.....  | 252        |
| 5.3.5    | Traglastversuch orthogonaler Träger-Plattenverbund.         | 259        |
| 5.3.5.1  | Versuchsaufbau.....   | 260        |
| 5.3.5.2  | Verformungs- und Tragverhalten.....                         | 261        |
| 5.3.5.3  | Bolzenschweißverbindung.....                                | 266        |
| 5.4      | Tragverhalten unter Brandeinwirkung.....                    | 268        |
| 5.4.1    | Einflüsse auf den Feuerwiderstand.....                      | 268        |
| 5.4.2    | Versuchskörper.....   | 270        |
| 5.4.3    | Versuchsergebnisse.....                                     | 272        |
| 5.5      | Versuchsauswertung und Bemessungshinweise.....              | 277        |
| 5.5.1    | Verdübelung.....  | 277        |
| 5.5.2    | Tragfähigkeit und Verformung.....                           | 280        |
| 5.5.3    | Feuerwiderstand.....  | 282        |
| 5.6      | Nachweis der Schalldämmung.....                             | 282        |
| 5.7      | Beispiele.....  | 290        |
| 5.7.1    | Stahlprofilblech/Beton-Verbundplatte für Geschoßdecken..... | 290        |

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 5.7.2 | Rechnerische Abschätzung der Beanspruchung im Brandversuch.....                                | 293 |
|       | Literatur.....   | 296 |
| 6     | <u>Stahlrohr/Beton-Sandwichbrücken.....</u>  | 298 |
| 6.1   | Konstruktiver und werkstofflicher Aufbau.....  | 298 |
| 6.2   | Berechnungsmodelle.....  | 301 |
| 6.3   | Rohrsandwichplatte als Verbundträgerrost.....  | 302 |
| 6.3.1 | Längs- und Querträger.....   | 303 |
| 6.3.2 | Wirksame Plattendrillsteifigkeit.....  | 305 |
| 6.4   | Zum Entwurf von Stahlrohr/Beton-Sandwichbrücken über Autobahnen.....                           | 307 |
| 6.5   | Versuchsergebnisse.....  | 312 |
| 6.5.1 | Modellversuche.....  | 312 |
| 6.5.2 | Schwingfestigkeitsversuch.....   | 318 |
| 6.5.3 | Traglastversuch.....   | 322 |
| 6.6   | Beispiele.....   | 325 |
| 6.6.1 | Quadratische Sandwichplatte unter Vollast.....   | 325 |
| 6.6.2 | Rohrsandwichbrücke Kronberg/Ts.....  | 328 |
| 6.7   | Ausblick auf die weitere Entwicklung.....  | 334 |
|       | Literatur.....   | 335 |
| 7     | <u>Stahlprofilblech/Polyurethan-Sandwichtragwerke.....</u>                                     | 336 |
| 7.1   | Entwurfskonzepte.....  | 336 |
| 7.2   | Herstellung von Stahlprofilblech-Sandwichtragwerken mit Polyurethanhartschaum-Kernschicht..... | 340 |
| 7.2.1 | Ausgangsrohstoffe des Polyurethanhartschaums.....  | 340 |
| 7.2.2 | Diskontinuierliche Herstellung.....  | 342 |
| 7.2.3 | Kontinuierliches Fertigungsverfahren.....  | 346 |

|         |  |     |
|---------|--|-----|
| 7.3     | Werkstoffeigenschaften von Polyurethanhartschaum-Kernschichten.....                | 349 |
| 7.3.1   | Physikalische Eigenschaften.....   | 350 |
| 7.3.1.1 | Dichte.....  | 350 |
| 7.3.1.2 | Haftung.....   | 352 |
| 7.3.1.3 | Wärmedämmung.....  | 354 |
| 7.3.2   | Einflüsse auf die mechanischen Eigenschaften.....                                  | 355 |
| 7.3.2.1 | Temperatur, Zeit, Struktur, Dichte.....  | 355 |
| 7.3.2.2 | Meßverfahren und Probenform.....   | 355 |
| 7.3.3   | Mechanische Eigenschaften bei kurzzeitiger Beanspruchung.....                      | 361 |
| 7.3.3.1 | Bei Raumtemperatur.....  | 361 |
| 7.3.3.2 | Unter besonderer Temperatureinwirkung.....   | 364 |
| 7.3.4   | Mechanische Eigenschaften bei langzeitiger Beanspruchung.....                      | 365 |
| 7.3.4.1 | Konstante langzeitige Beanspruchung bei Raumtemperatur.....                        | 366 |
| 7.3.4.2 | Veränderliche langzeitige Beanspruchung bei Raumtemperatur.....                    | 367 |
| 7.3.4.3 | Konstante langzeitige Beanspruchung bei besonderer Temperatureinwirkung.....       | 368 |
| 7.3.4.4 | Veränderliche langzeitige Beanspruchung bei besonderer Temperatureinwirkung.....   | 369 |
| 7.3.5   | Auswertung der Versuchsergebnisse für Berechnungsgrundlagen.....                   | 370 |
| 7.3.5.1 | Viskoelastisches Werkstoffverhalten.....   | 371 |
| 7.3.5.2 | Ermittlung der Kriech- und Relaxationsfunktionen...                                | 376 |
| 7.4     | Trag- und Verformungsverhalten von ebenen und profilierten Sandwichtragwerken..... | 377 |
| 7.4.1   | Allgemeine Hinweise.....   | 377 |
| 7.4.2   | Der elastische Verbund.....  | 378 |
| 7.4.2.1 | Lösung mit Hilfe des Differenzenverfahrens.....                                    | 379 |
| 7.4.2.2 | Schubfluß in einer isotropen Kernschicht.....                                      | 385 |
| 7.4.2.3 | Schubfluß in einer inhomogenen und orthotropen Kernschicht.....                    | 388 |

|  |     |
|--|-----|
| 7.4.3 Instabilität der Deckschichten.....                                      | 391 |
| 7.4.3.1 Knittern elastisch gebetteter, ebener Deckschichten                    | 391 |
| 7.4.3.2 Knittern elastisch gebetteter, profilerter Deck-<br>schichten.....     | 398 |
| 7.4.3.3 Einflüsse aus nichtlinearem Werkstoffverhalten.....                    | 406 |
| 7.4.4 Langzeitige Beanspruchung.....   | 409 |
| 7.4.4.1 Realistische Lastkollektive.....                                       | 409 |
| 7.4.4.2 Näherung für eine beliebige Belastungsgeschichte...                    | 411 |
| 7.4.4.3 Auswirkung des Kernkriechens auf die Bettung der<br>Deckschichten..... | 415 |
| 7.4.5 Trag- und Verformungsverhalten bei Temperaturein-<br>wirkung.....        | 416 |
| 7.5 Experimentelle Untersuchungen.....   | 420 |
| 7.5.1 Versuchsaufbau und Meßtechnik.....                                       | 421 |
| 7.5.2 Kurzzeitverhalten.....   | 423 |
| 7.5.2.1 Versuchsprogramm und Ergebnistabellen.....                             | 423 |
| 7.5.2.2 Profilsandwichplatten mit einem ebenen Deckblech...                    | 424 |
| 7.5.2.3 Profilsandwichplatten niedriger Steghöhe.....                          | 429 |
| 7.5.2.4 Profilsandwichplatten mittlerer Steghöhe.....                          | 430 |
| 7.5.2.5 Profilsandwichplatten großer Steghöhe.....                             | 436 |
| 7.5.2.6 Profilsandwichplatten mit Sicken und großer Steg-<br>höhe.....         | 438 |
| 7.5.2.7 Profilsandwichplatten mit Aluminiumtrapezprofil-<br>Deckblechen.....   | 441 |
| 7.5.2.8 Sandwichfaltwerke mit Stahldeckblechen.....                            | 444 |
| 7.5.3 Langzeitverhalten.....   | 447 |
| 7.5.3.1 Versuchsprogramm.....  | 447 |
| 7.5.3.2 Einfluß des Kernkriechens auf die Verformungen und<br>Spannungen.....  | 450 |
| 7.5.3.3 Einfluß einer längeren Vorbelastung auf die Trag-<br>last.....         | 461 |
| 7.5.4 Temperatureinwirkung.....  | 463 |
| 7.5.4.1 Versuchsaufbau und Versuchsprogramm.....                               | 463 |
| 7.5.4.2 Versuchsergebnisse mit dem Sommertemperatur-<br>kollektiv.....         | 465 |

|  |     |
|--|-----|
| 7.5.4.3 Versuchsergebnisse mit dem Wintertemperatur-<br>kollektiv.....             | 468 |
| 7.5.5 Brandverhalten.....  | 469 |
| 7.5.5.1 Entwurfskonzept für die Brandbemessung.....                                | 469 |
| 7.5.5.2 Brandversuche an Profilsandwichplatten.....                                | 470 |
| 7.5.5.3 Kleinbrandversuche.....  | 478 |
| 7.6 Bemessung und Sicherheit.....  | 482 |
| 7.6.1 Auswertung der theoretischen und experimentellen<br>Untersuchungen.....      | 482 |
| 7.6.2 Sicherheitskonzept.....  | 486 |
| 7.7 Beispiele.....   | 489 |
| 7.7.1 Sandwichplatten mit quasi-ebenen Deckblechen.....                            | 489 |
| 7.7.1.1 Einfeldplatte.....   | 489 |
| 7.7.1.2 Zweifeldplatte.....  | 490 |
| 7.7.2 Sandwichplatte mit profiliertem oberen Deckblech...<br>Literatur.....        | 493 |
| 499  |     |
| 8 <u>Stahlprofilblech/Mineral-Sandwichplatte</u> .....                             | 501 |
| 8.1 Entwurfskonzept.....   | 501 |
| 8.2 Werkstoffeigenschaften.....  | 504 |
| 8.2.1 Faserbewehrtes Silikat.....  | 504 |
| 8.2.1.1 Werkstoffeigenschaften bei Raumtemperatur.....                             | 504 |
| 8.2.1.2 Werkstoffeigenschaften bei Hochtemperatur.....                             | 505 |
| 8.2.2 Isolierbetone.....   | 509 |
| 8.2.2.1 Verschiedene Zuschlagstoffe.....   | 509 |
| 8.2.2.2 Perlitebeton mit organischen Zusätzen.....                                 | 511 |
| 8.2.2.3 Kurzzeiteigenschaften.....   | 513 |
| 8.2.2.4 Langzeiteigenschaften.....   | 515 |
| 8.3 Verbund durch Schraubenverdübelung.....  | 517 |
| 8.3.1 Tragverhalten und Steifigkeit verschiedener<br>Verdübelungsausbildungen..... | 517 |
| 8.3.2 Schubtragfähigkeit der Schraubenverdübelung.....                             | 520 |
| 8.3.3 Fiktiver Schubmodul der Schraubenverdübelung.....                            | 523 |

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 8.4   | Traglastversuche bei Raumtemperatur.....                    | 525 |
| 8.4.1 | Versuchsprogramm und Versuchsdurchführung.....              | 525 |
| 8.4.2 | Einfeldplatten.....   | 526 |
| 8.4.3 | Mehrfeldplatten.....  | 529 |
| 8.4.4 | Langzeitbelastung.....                                      | 531 |
| 8.5   | Brandversuche.....  | 532 |
| 8.5.1 | Zur Versuchsdurchführung.....                               | 532 |
| 8.5.2 | Temperaturverteilung im Querschnitt.....                    | 533 |
| 8.5.3 | Versuchsprogramm für Bauteile.....                          | 538 |
| 8.5.4 | Versuchsergebnisse.....                                     | 540 |
| 8.6   | Berechnung und Bemessung.....                               | 545 |
| 8.6.1 | Berechnung der Verformungen, Spannungen und Traglasten..... | 545 |
| 8.6.2 | Berechnungsergebnisse.....                                  | 548 |
| 8.6.3 | Bemessung und Sicherheit.....                               | 553 |
| 8.7   | Ausblick auf die weitere Entwicklung.....                   | 557 |
|       | Literatur.....  | 559 |