

---

# Inhaltsverzeichnis

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b>   | <b>1</b>   |
|          | Literatur   | 4          |
| <b>2</b> | <b>Karosserietechnik und Karosseriewerkstoffe</b>                                     | <b>5</b>   |
| 2.1      | Bauweisen von Pkw-Karosserien   | 8          |
| 2.1.1    | Karosserien in Rahmenstrukturbauweise   | 9          |
| 2.1.2    | Selbsttragende Karosserien in Schalenbauweise   | 12         |
| 2.2      | Strukturteile und Außenhautteile  | 15         |
| 2.3      | Leichtbauaspekte im Karosseriebau   | 16         |
| 2.3.1    | Strukturelle Leichtbauaspekte und Leichtbaukennwerte                                  | 17         |
| 2.3.2    | Werkstoffliche Leichtbauaspekte   | 18         |
| 2.3.3    | Belastungsangepasste Karosserieblechteile<br>(Tailored Components)                    | 20         |
| 2.4      | Blechwerkstoffe und Blechoberflächen im Karosseriebau                                 | 24         |
| 2.4.1    | Stahlkarosseriebleche   | 25         |
| 2.4.2    | Aluminiumkarosseriebleche   | 36         |
| 2.5      | Blechteil- und Karosserieherstellprozess  | 42         |
| 2.5.1    | Blechteilherstellprozess  | 43         |
| 2.5.2    | Karosserieherstellprozess   | 45         |
| 2.6      | Qualitätsaspekte und Bauteileigenschaften von Karosserieblechteilen<br>und Baugruppen | 53         |
| 2.6.1    | Maß- und Formqualität von Karosserie-Blechteilen<br>und Baugruppen                    | 54         |
| 2.6.2    | Oberflächenqualität von Karosserie-Blechteilen  | 87         |
| 2.6.3    | Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften von<br>Karosserie-Blechteilen              | 107        |
|          | Literatur   | 116        |
| <b>3</b> | <b>Plastizitätstheoretische und werkstofftechnische Grundlagen</b>                    | <b>119</b> |
| 3.1      | Fließen und Stoffgesetz   | 122        |
| 3.2      | Fließspannung, Fließkurve und Fließkurvenaufnahme                                     | 124        |
| 3.2.1    | Zugversuch zur Fließkurvenaufnahme  | 124        |

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 3.2.2 | Bulgetest zur Fließkurvenaufnahme .....   | 126 |
| 3.3   | Mathematische Beschreibung der Fließkurve .....   | 130 |
| 3.3.1 | Fließkurven-Potenzansätze nach Ludwik-Hollomon<br>und nach Swift. ....                    | 131 |
| 3.3.2 | Fließkurven-Exponentialansatz nach Hockett-Sherby .....                                   | 134 |
| 3.3.3 | Kombinierter Ansatz (Gewichtung zwischen Swift<br>und Hockett-Sherby) .....               | 134 |
| 3.3.4 | Kombinierte Fließkurve aus Zugversuch und Bulgetest .....                                 | 135 |
| 3.3.5 | Auswirkung der Fließkurvenmodellierung auf<br>die Simulationsergebnisse .....             | 137 |
| 3.3.6 | Zusammenfassung zur Fließkurvenmodellierung .....   | 138 |
| 3.4   | Materialmodellierung bei mehrachsigen Spannungszustand<br>und isotropem Werkstoff .....   | 139 |
| 3.4.1 | Beschreibung von Spannungszuständen .....   | 140 |
| 3.4.2 | Schubspannungshypothese nach Tresca .....   | 143 |
| 3.4.3 | Gestaltänderungsenergiehypothese nach von Mises .....                                     | 145 |
| 3.4.4 | Fließgrenzfläche und Fließortkurve .....  | 146 |
| 3.5   | Materialmodellierung bei mehrachsigen Spannungszustand<br>und anisotropem Werkstoff ..... | 149 |
| 3.5.1 | Anisotropiekennwerte für anisotropes Werkstoffverhalten .....                             | 149 |
| 3.5.2 | Materialmodell für senkrecht-anisotropen<br>und eben-isotropen Werkstoff .....            | 152 |
| 3.5.3 | Materialmodelle für senkrecht- und<br>eben-anisotrope Werkstoffe .....                    | 154 |
| 3.5.4 | Auswirkung der Fließortkurvenmodellierung auf<br>die Simulationsergebnisse .....          | 159 |
| 3.5.5 | Zusammenfassung zur Fließortkurven-Modellierung .....                                     | 160 |
| 3.6   | Formänderungen und Fließgesetz .....  | 161 |
| 3.6.1 | Formänderungsverläufe und Formänderungsverteilungen .....                                 | 163 |
| 3.6.2 | Fließgesetz/Fließregel .....  | 163 |
| 3.7   | Formänderungsvermögen und Grenzformänderungen .....                                       | 166 |
| 3.7.1 | Formänderungsvermögen .....   | 166 |
| 3.7.2 | Grenzformänderungen .....   | 169 |
| 3.7.3 | Grenzformänderungskurve<br>und Grenzformänderungsdiagramm .....                           | 169 |
| 3.7.4 | Auswirkung der Grenzformänderungskurve auf<br>die Simulationsergebnisse .....             | 186 |
| 3.7.5 | Spannungsbasierte Grenzformänderungskurve (SFLC) .....                                    | 187 |
| 3.8   | Zusammenfassung einiger wesentlicher Punkte<br>zur Materialmodellierung .....             | 188 |
|       | Literatur .....   | 190 |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| <b>4</b> | <b>Verfahrenstechnische Grundlagen der Karosserieteilherstellung</b>      | <b>195</b> |
| 4.1      | Tiefziehen  | 195        |
| 4.1.1    | Prozessablauf beim Tiefziehen im Erstzug                                  | 196        |
| 4.1.2    | Prozessablauf beim Tiefziehen im Weiterzug                                | 196        |
| 4.1.3    | Spannungs- und Formänderungszustand beim Tiefziehen                       | 199        |
| 4.1.4    | Fehler- und Versagensmöglichkeiten beim Tiefziehen                        | 205        |
| 4.1.5    | Kräfte beim Tiefziehen  | 210        |
| 4.1.6    | Prozessauslegung und Prozesssteuerung beim Tiefziehen                     | 211        |
| 4.1.7    | Umformbarkeit von Blechwerkstoffen beim Tiefziehen                        | 216        |
| 4.2      | Streckziehen  | 218        |
| 4.2.1    | Prozessablauf beim Streckziehen mit starren Spannelementen                | 218        |
| 4.2.2    | Prozessablauf beim Streckziehen mit (aktiv)<br>beweglichen Spannelementen | 220        |
| 4.2.3    | Spannungs- und Formänderungszustand beim Streckziehen                     | 221        |
| 4.2.4    | Fehler- und Versagensmöglichkeiten beim Streckziehen                      | 223        |
| 4.2.5    | Prozessauslegung und Prozesssteuerung beim Streckziehen                   | 225        |
| 4.2.6    | Umformbarkeit von Blechwerkstoffen beim Streckziehen                      | 229        |
| 4.3      | Karosserieziehen  | 231        |
| 4.3.1    | Begriffe für Flächen, Kanten und Radien am Ziehteil                       | 231        |
| 4.3.2    | Prozessablauf beim Karosserieziehen                                       | 236        |
| 4.3.3    | Spannungs- und Formänderungszustand<br>beim Karosserieziehen              | 236        |
| 4.3.4    | Fehler- und Versagensmöglichkeiten beim Karosserieziehen                  | 239        |
| 4.3.5    | Prozessauslegung und Prozesssteuerung<br>beim Karosserieziehen            | 253        |
| 4.3.6    | Umformbarkeit von Blechwerkstoffen beim Karosserieziehen                  | 269        |
| 4.4      | Biegen, Nachformen und Falzen   | 269        |
| 4.4.1    | Verfahrenseinteilung der Biegeverfahren                                   | 270        |
| 4.4.2    | Prozessablauf beim Biegen   | 271        |
| 4.4.3    | Spannungs- und Formänderungszustand beim Biegen                           | 279        |
| 4.4.4    | Fehler- und Versagensmöglichkeiten beim Biegen                            | 283        |
| 4.4.5    | Prozessauslegung und Prozesssteuerung beim Biegen                         | 284        |
| 4.5      | Nachschlagen/Kalibrieren  | 286        |
| 4.6      | Presshärten   | 287        |
| 4.7      | Scherschneiden  | 287        |
| 4.7.1    | Prozessablauf beim Scherschneiden   | 288        |
| 4.7.2    | Spannungen und Kräfte beim Scherschneiden                                 | 290        |
| 4.7.3    | Varianten des Scherschneidens bei<br>der Karosserieteilherstellung        | 291        |
| 4.7.4    | Fehler- und Versagensmöglichkeiten<br>beim Scherschneiden                 | 293        |
| 4.7.5    | Prozessauslegung beim Scherschneiden                                      | 296        |

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 4.8   | Rückfederung .....  | 300 |
| 4.8.1 | Klassifizierung der Rückfederungsarten<br>und deren Einflussgrößen .....                | 300 |
| 4.8.2 | Membranrückfederung .....   | 303 |
| 4.8.3 | Biegerückfederung und Rückbiegerückfederung .....                                       | 304 |
| 4.8.4 | Hohlzug beim ziehenden Biegen .....   | 307 |
| 4.8.5 | Einfluss des Werkstoffs auf die Rückfederung .....                                      | 309 |
| 4.8.6 | Einfluss der Bauteil- und Werkstückgeometrie auf<br>die Rückfederung .....              | 311 |
| 4.8.7 | Einfluss der Prozessführung und des Umformverfahrens<br>auf die Rückfederung .....      | 312 |
| 4.8.8 | Rückfederungskompensation .....   | 313 |
|       | Literatur .....   | 315 |
| 5     | Werkzeugtechnik und Werkzeugherstellungsprozess .....                                   | 317 |
| 5.1   | Grundsätzliche Werkzeugtypen .....  | 317 |
| 5.1.1 | Folgeverbundwerkzeuge .....   | 319 |
| 5.1.2 | Transferwerkzeuge .....   | 321 |
| 5.1.3 | Stufenwerkzeuge .....   | 322 |
| 5.1.4 | Linienwerkzeuge/Stufensätze .....   | 323 |
| 5.1.5 | Einfach- und Mehrfachwerkzeuge .....  | 325 |
| 5.2   | Konstruktiver Werkzeugaufbau .....  | 327 |
| 5.2.1 | Konstruktiver Grundaufbau von Platinenschneidwerkzeugen ....                            | 327 |
| 5.2.2 | Konstruktiver Grundaufbau von Ziehwerkzeugen .....                                      | 329 |
| 5.2.3 | Konstruktiver Grundaufbau von Schneidwerkzeugen .....                                   | 346 |
| 5.2.4 | Konstruktiver Grundaufbau von Nachformwerkzeugen .....                                  | 352 |
| 5.3   | Werkzeugwerkstoffe .....  | 360 |
| 5.4   | Zeitlicher Ablauf der Werkzeugherstellung .....   | 363 |
| 5.5   | Datenkette bei der Werkzeugherstellung .....  | 365 |
| 5.6   | SE-Phase und Methodenplanung .....  | 366 |
| 5.7   | Werkzeugkonstruktion .....  | 367 |
| 5.8   | Arbeitsvorbereitung .....   | 367 |
| 5.9   | Physische Werkzeugherstellung .....   | 368 |
| 5.9.1 | Gießmodellerstellung und Guss .....   | 368 |
| 5.9.2 | Herstellung von Ziehwerkzeugen .....  | 369 |
| 5.9.3 | Herstellung von Schneid- und Nachformwerkzeugen .....                                   | 387 |
| 5.9.4 | Werkzeugkorrektur zur Verbesserung der Maß-<br>und Formqualität .....                   | 391 |
| 5.9.5 | Werkzeugkorrektur zur Verbesserung der<br>Oberflächenqualität von Außenhautteilen ..... | 420 |
| 5.10  | Kostenstruktur von Karosseriewerkzeugen .....   | 426 |
|       | Literatur .....   | 429 |

|   |            |
|---|------------|
| <b>6 Grundlagen der Maschinen- und Anlagentechnik</b>   | <b>431</b> |
| 6.1 Anlagen zur Platinenherstellung und -bereitstellung   | 431        |
| 6.2 Maschinen und Anlagen zur Bauteilherstellung  | 435        |
| 6.2.1 Maschinenwirkprinzipien   | 435        |
| 6.2.2 Zieheinrichtungen   | 457        |
| 6.3 Pressenarten und Mechanisierungssysteme   | 464        |
| 6.3.1 Pressen für kleine und mittelgroße Bauteile   | 464        |
| 6.3.2 Pressenlinien und Großteil-Transferpressen<br>(Mehrstöbel-Transferpressen)                | 472        |
| 6.3.3 Platinenlader und Fertigteil-Stapelanlagen  | 480        |
| 6.4 Ausbringung und Wirtschaftlichkeit von Pressensystemen                                      | 482        |
| 6.4.1 Ausbringung von kleinen und mittelgroßen Pressen  | 482        |
| 6.4.2 Ausbringung von Großpressen und Pressenlinien   | 482        |
| 6.4.3 Kosten- und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung<br>von Pressensystemen                         | 485        |
| 6.5 Aktueller Trend bei der Ausrüstung neuer Presswerke   | 490        |
| Literatur   | 491        |
| <b>7 Fertigungsplanung und Fertigungsstrategien</b>   | <b>493</b> |
| 7.1 Produktionspresse bzw. Produktionspressenlinie  | 495        |
| 7.2 Fertigungsverfahren   | 496        |
| 7.3 Folgeverbund- oder Stufen- bzw. Transferfertigung   | 496        |
| 7.4 Einfach- oder Mehrfachfertigung   | 498        |
| 7.5 Platinengeometrien und Platinenherstellung  | 503        |
| 7.5.1 Materialnutzungsgrad  | 503        |
| 7.5.2 Festlegung der Platinengeometrie  | 508        |
| 7.5.3 Randbedingungen der Platinenherstellung   | 508        |
| 7.5.4 Fallbeispiel Kotflügel  | 517        |
| 7.6 Pressen-Durchlaufplanung und Pressensimulation  | 518        |
| 7.6.1 Klassische Durchlaufuntersuchung bei mechanisch<br>gekoppelten Transfersystemen           | 519        |
| 7.6.2 Pressendurchlauf-Simulation bei frei programmierbaren<br>Transfersystemen                 | 524        |
| Literatur   | 526        |
| <b>8 Methodenplanung</b>  | <b>527</b> |
| 8.1 Allgemeine Einführung in die Methodenplanung  | 527        |
| 8.1.1 Gegenstand der Methodenplanung  | 527        |
| 8.1.2 Eingangsgrößen und Randparameter der Methodenplanung                                      | 528        |
| 8.1.3 Einordnung der Methodenplanung in den Fahrzeug-<br>und Betriebsmittel-Entwicklungsprozess | 530        |
| 8.1.4 Ablauf der Methodenplanung und Methodenplanungsinhalte                                    | 531        |
| 8.1.5 Simulationstools zur Unterstützung der Methodenplanung                                    | 538        |

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 8.2   | Methodenplanung der Ziehoperation. ....   | 540 |
| 8.2.1 | Festlegung der Ziehlage .....   | 541 |
| 8.2.2 | Bauteilaufbereitung zur (vorläufigen) Ziehchale .....   | 573 |
| 8.2.3 | Festlegung von Werkzeuggrundaufbau<br>und Anzahl Ziehstufen. ....   | 575 |
| 8.2.4 | Modellierung der Blechhalterwirkflächen. ....   | 579 |
| 8.2.5 | Modellierung der Stempelformflächen .....   | 610 |
| 8.2.6 | Modellierung von Ziehstücken .....  | 627 |
| 8.3   | Methodenplanung der Beschneide- und Lochoperationen. ....   | 629 |
| 8.3.1 | Festlegung Komplettbeschnitt oder segmentierter Beschnitt. ....   | 630 |
| 8.3.2 | Prüfung der Notwendigkeit eines Vorbeschnitts. ....   | 632 |
| 8.3.3 | Festlegung der Arbeitsrichtungen .....  | 634 |
| 8.3.4 | Festlegung der Beschnittsegmente und der Abfallabführung .....  | 635 |
| 8.3.5 | Detailgestaltung der Beschnittübergänge .....   | 638 |
| 8.3.6 | Sicherstellung der werkzeugtechnischen Umsetzbarkeit .....  | 640 |
| 8.3.7 | Sicherstellung der Mechanisierbarkeit. ....   | 642 |
| 8.3.8 | Sicherstellung der Positionierbarkeit in FolgeOP .....  | 643 |
| 8.3.9 | Ergänzungen zur Lochmethode .....   | 644 |
| 8.4   | Methodenplanung der Nachformoperationen .....   | 648 |
| 8.4.1 | Festlegung der Nachformbereiche .....   | 649 |
| 8.4.2 | Festlegung der Nachformlage und der Nachformrichtungen .....  | 653 |
| 8.4.3 | Festlegung der Überformung .....  | 658 |
| 8.4.4 | Festlegung der Werkstückabstützung beim Nachformen .....  | 659 |
| 8.4.5 | Festlegung der Nachformreihenfolge .....  | 660 |
| 8.4.6 | Festlegung der Nachformübergänge .....  | 663 |
| 8.4.7 | Sicherstellung der werkzeugtechnischen Umsetzbarkeit .....  | 664 |
| 8.4.8 | Sicherstellung der Mechanisierbarkeit. ....   | 666 |
| 8.4.9 | Sicherstellung der Positionierbarkeit des Werkstücks .....  | 667 |
| 8.5   | Falzmethode .....   | 668 |
| 8.5.1 | Festlegung der werkzeugfallenden Flanschstellungen. ....  | 670 |
| 8.5.2 | Ermittlung des Falzverlustes und Festlegung<br>des Blechteilbeschnitts einschließlich Rückschnitten ..... | 671 |
| 8.6   | Werkzeugmethode. ....   | 672 |
| 8.6.1 | Festlegung von Maßkorrekturen und Berücksichtigung<br>von Toleranzfeldern .....                           | 673 |
| 8.6.2 | Festlegung von optisch bedingten Formkorrekturen .....  | 677 |
| 8.6.3 | Festlegung von funktional bedingten Formkorrekturen .....   | 678 |
| 8.6.4 | Festlegung von Kantenabzügen .....  | 679 |
| 8.6.5 | Festlegung von Kontaktbereichen mit<br>erhöhter Flächenpressung .....                                     | 680 |
| 8.6.6 | Festlegung von Freimachungen .....  | 682 |
| 8.6.7 | Festlegung von Hilfsflächen zur Teilepositionierung .....   | 684 |

|        |   |            |
|--------|---|------------|
| 8.6.8  | Festlegung von Formtrennungen.....                                  | 684        |
| 8.6.9  | Festlegung von Spaltmaßen (Umrissgeometrie) .....                   | 686        |
| 8.6.10 | Festlegung von Fräsvorgaben .....                                   | 687        |
| 8.7    | Methodenrelevante Besonderheiten bei Tailored Blanks.....           | 688        |
| 8.7.1  | Sicherstellung der Stapelbarkeit im Platinenstapel .....            | 688        |
| 8.7.2  | Festlegung des Schweißnahtverlaufs bezüglich Umformung.....         | 689        |
| 8.7.3  | Festlegung des Schweißnahtverlaufs bezüglich Beschneiden.....       | 689        |
| 8.7.4  | Festlegung der Freimachung im Werkzeug für<br>die Schweißnaht ..... | 690        |
| 8.8    | Anwendungsbeispiel einer simulationsgestützten Methodenplanung .... | 691        |
| 8.8.1  | Vorgaben aus der Fertigungsplanung .....                            | 691        |
| 8.8.2  | Vorabmethode .....  | 691        |
| 8.8.3  | Konzeptmethode.....   | 694        |
| 8.8.4  | Feinmethode .....   | 697        |
| 8.9    | Methodenrelevante Besonderheiten bei Außenhautteilen.....           | 703        |
|        | Literatur.....  | 709        |
|        | <b>Sachverzeichnis .....</b>  | <b>711</b> |