

hybridⁿ – Werkstoffe, Methoden, Prozesse

KEYNOTE

Alexander BROSIUS¹⁾ und Christina GUILLEAUME¹⁾

¹⁾Professur Formgebende Fertigungsverfahren, Institut für Fertigungstechnik, Technische Universität Dresden

Abstract

Hybride Werkstoffe sind heute allgegenwärtiger Bestandteil der Produkte und Bauteile, die den Alltag prägen. Sie sind im Automobil zu finden, in Schienenfahrzeugen, in Freizeitgeräten aller Art und nicht zuletzt auch in der Medizintechnik. Ihre große Popularität liegt darin begründet, dass sie viele an diese Produkte gestellte Anforderungen erfüllen können und ihre Nutzbarkeit verbessern. Sie tragen bei zur Schonung von Ressourcen, Senkung von Kosten, Schutz der Umwelt und nicht zuletzt auch zum Komfort der Nutzer. Wie auch die FOREL-Studie zur Elektromobilität [GUD15] eindrucksvoll zeigt, sind dabei die Möglichkeiten jedoch noch bei Weitem nicht ausgereizt; es werden auch weiterhin neue Anwendungsfelder erschlossen und neue Werkstoffe entwickelt. Die Methoden zur Berechnung und Auslegung sowie die Prozesse zur Herstellung hybrider Komponenten müssen daher stetig weiterentwickelt werden. Durch den hier vorgestellten ganzheitlichen Betrachtungsansatz hybridⁿ, der sich aus den komplementären Bausteinen „Hybride Werkstoffe“, „Hybride Prozesse“ und „Hybride Methoden“ zusammensetzt, ergeben sich neue Wege, den auftretenden Herausforderungen zu begegnen.

Keywords *Hybride Werkstoffe, Hybride Methoden, Hybride Prozesse*

1 Einleitung

Das Bewusstsein für die Notwendigkeit eines nachhaltigen Umgangs mit den zur Verfügung stehenden Ressourcen hat in den letzten Jahren kontinuierlich zugenommen. Dies betrifft die Rohstoffe und daraus entstehenden Werkstoffe an sich, aber auch den notwendigen Energieeinsatz im Fertigungsprozess und im späteren Einsatz, sowie die Recyclingfähigkeit. Nicht zuletzt auch durch die vom Gesetzgeber geschaffenen Rahmenbedingungen resultiert daraus ein Innovationsdruck auf die Unternehmen und die Forschungseinrichtungen, der bereits zu einer Vielzahl von neuen Entwicklungen, Konzepten und Strategien geführt hat. Im Bereich der Fertigungstechnologien finden sich vor allem neuartige Werkstoffe und Werkstoffkombinationen, sowie daran angepasste Fertigungsstrategien und Berechnungsmethoden. Der Trend geht zum kombinierten Einsatz unterschiedlichster Werkstoffe und Verfahren in komplexen individualisierten Prozessketten.

2 Hybride Werkstoffe

Die kürzlich durchgeführte FOREL-Studie zur Elektromobilität [GUD15] hat aufgezeigt, dass die befragten OEM und Zulieferer schon heute eine Vielzahl von Werkstoffen einsetzen. So kombinieren über 50% bereits Leichtmetalle und Stahl und über 30% metallische Werkstoffe und Kunststoffe. Fast alle stimmen der Aussage zu, dass der

Einsatz von Verbundwerkstoffen und Werkstoffverbunden in den nächsten Jahren sogar noch weiter zunehmen wird. Die Mischbauweise wird dabei primär als Weg gesehen, die geforderten mechanischen Eigenschaften zu erfüllen und spezielle Bauteileigenschaften gezielt einzustellen. Die Entwicklungen sind dabei häufig von einem Leichtbaugedanken getrieben und Mehrkosten werden bis zu einem gewissen Maß durchaus von Herstellern wie Kunden toleriert.

Eine Gesamtübersicht über die hybriden Werkstoffe zu geben, ist an dieser Stelle aufgrund der heutigen Variantenvielfalt bezüglich Werkstoffen, Geometrien und Anordnung kaum möglich. Abbildung 2.1 bietet daher nur eine Übersicht über die gängigsten Formen hybrider Werkstoffe.

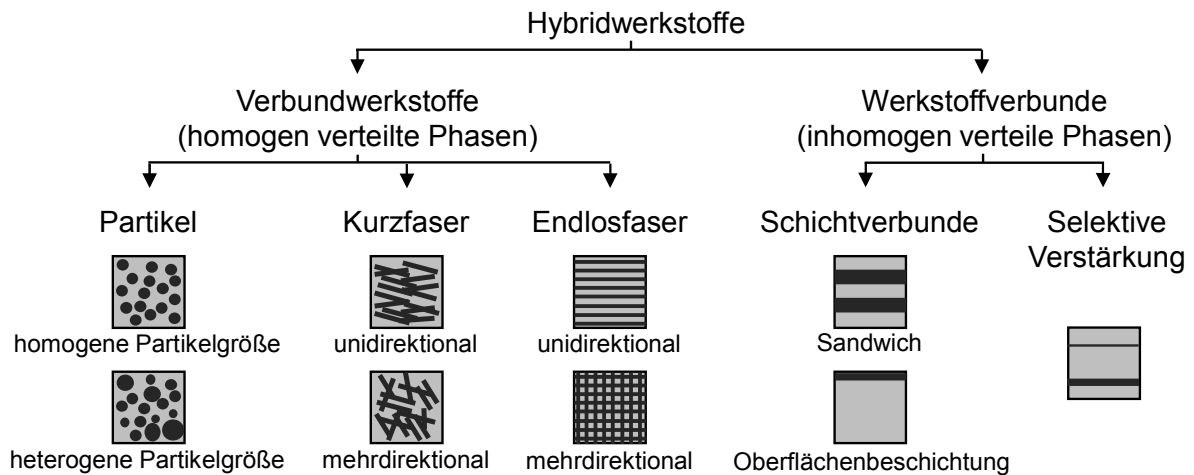


Abbildung 2.1: Übersicht der häufigsten Formen hybrider Werkstoffe

Grundsätzlich wird zwischen Verbundwerkstoffen und Werkstoffverbunden unterschieden. Verbundwerkstoffe sind makroskopisch betrachtet homogene Werkstoffe aus einem Matrixwerkstoff und einer Verstärkungskomponente. Als Matrixwerkstoff werden Polymere, Metalle und Keramiken verwendet. Diese können mit Fasern oder Partikel, aber auch komplexeren Elemente wie Platelets oder Nanotubes verstärkt sein. Werkstoffverbunde hingegen sind bereits auf makroskopischer Ebene heterogen und bestehen aus mindestens zwei Werkstoffkomponenten. Hier unterscheidet man zudem noch zwischen einer Mischbauweise, bei der der Verbund durch einen nachgelagerten Fügeprozess erzeugt wird und so über eine Fügezone verfügt. Oder hybriden Verbunden, bei denen die Werkstoffe ohne Fügeelement oder Zusatzwerkstoff miteinander verbunden sind und somit eine Grenzfläche vorhanden ist.

Einen Sonderfall der Werkstoffverbunde stellen die intrinsischen Hybriden dar. Ein intrinsisches Hybrid ist gemäß der Definition der Deutschen Forschungsgemeinschaft [FLE13] „ein integrales Bauteil, bei dem die Verbindung der verschiedenen Materialien im Ur- bzw. Umformprozess der metallischen oder endlosfaserverstärkten Komponente erfolgt. Somit ist kein nachgeschalteter Fügeprozess notwendig.“ Ein Beispiel ist die in-situ Herstellung intrinsischer Textil-Blech-Verbund-Hybriden auf Basis von Kohlenstofffasern und Thermoplast in einem beheizten Tiefziehwerkzeug wie von GROßMANN ET AL. [GRO16] in einem EFB-Forschungsvorhaben erfolgreich untersucht wurde. LANDGREBE ET AL. [LAN16] entwickeln einen zweistufigen energieeffizienten Hybridprozess bei dem nach einer Blechumformung im zweiten Schritt ein Verbund mittels Polymer-Spritzguss im selben Werkzeug erzeugt werden kann. Zur Herstellung rotations-

symmetrischer intrinsischer Verbundprofile setzen FLEISCHER ET AL. [FLE15] ein angepasstes Rotationsgussverfahren ein, bei dem metallische Komponenten und trockene Verstärkungsfasern in eine geschlossene Form eingelegt und dann in einem rotierenden Verfahren mit einer flüssigen Matrix getränkt und auf diese Weise verbunden werden, siehe Prozessschema in Abbildung 2.2.

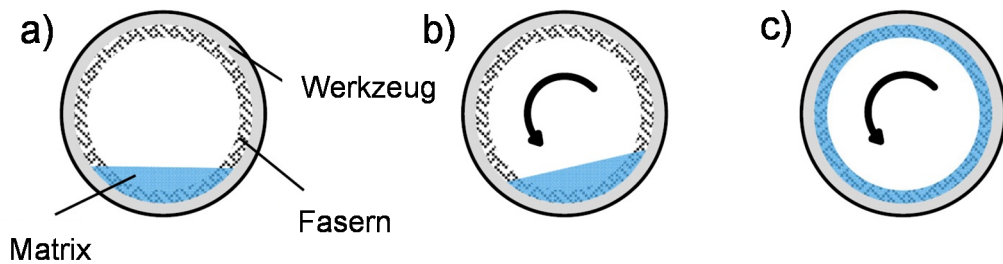


Abbildung 2.2: Rotationsguss für Verbundprofile nach [FLE15]: a) Werkzeug im Stillstand; b) Rotation unterhalb Mindestdrehzahl c) Rotation über Mindestdrehzahl (imprägnieren und aushärten der Faserstruktur)

Die Umformung von Werkstoffverbunden ist aufgrund der meist sehr unterschiedlichen mechanischen und physikalischen Eigenschaften der Werkstoffkomponenten mit einigen Herausforderungen verbunden. BEHRENS ET AL. [BEH14] entwickeln ein angepasstes warmes Tiefziehverfahren für einen Verbund eines metallischen Blechwerkstoffs und eines thermoplastischen Faserverbundwerkstoffs. TULKE ET AL. stellen ein pneumatisches Streckziehverfahren [TUL15] mit modularem hybridem Holzwerkzeug [TUL16] für ein Edelstahl-Verbundblech mit duroplastischer Zwischenschicht vor.

Für eine sehr umfassende Darstellung der Verbundwerkstoffe, ihrer Halbzeuge und gängigen Verarbeitungsverfahren sei beispielsweise auf das „Handbuch Verbundwerkstoffe“ von NEITZEL ET AL. [NEI14] und die umfangreiche Habilitation von NESTLER [NES12] verwiesen, über ihren Einsatz und Anwendungstechnologien für die Automobilindustrie zum Zwecke des Leichtbaus [STA09] und der Erfüllung komplexer Anforderungsprofile [REI09] berichten STAUBER und REINHOLD.

2.1 Auslegung, Charakterisierung und Berechnung

Häufig ist die Anbindung zwischen den Kunststoff-Verbundwerkstoffen und den metallischen Grundstrukturen die Schwachstelle von Hybriden. Daher stellen die Eigenschaften der Hybriden, ihre mechanischen Kennwerte und die Charakterisierung der Grenzflächen ein wichtiges Forschungsfeld dar, um die Einsatzmöglichkeiten und Prozessgrenzen in der Herstellung zu erweitern. Beispielsweise beschäftigen sich HOPMANN ET AL. [Hop13] mit verschiedenen Ansätzen für eine Anbindung zwischen thermoplastischen Verbundwerkstoffen und metallischen Blechen und deren Haltbarkeit, um die Herstellung intrinsischer Hybride zu ermöglichen. Mit der Auslegung, Charakterisierung und Berechnung der Grenzflächen von hybriden Metall-Verbunden befassen sich KIEßLING ET AL. [KIE16] und liefern eine gute Übersicht der aktuellen Berechnungs- und Charakterisierungsmethoden in diesem Themenfeld. In einer Studie untersuchen DLUGOSCH ET AL [DLU16] experimentell die Grundprinzipien, die die Systemeigenschaften wie Steifigkeit und Festigkeit beeinflussen und vergleichen diese mit verschiedenen gängigen Vorhersage- und Berechnungsmethoden für die Eigenschaften

von Verbundwerkstoffen, wie beispielsweise der Mischungsregel. Ziel ist es dabei analytische Modelle zu entwickeln, die eine Vorhersage der mechanischen Eigenschaften basierend auf einem bestimmten Parameterset ermöglichen.

3 Hybride Prozesse

Die gestiegenen Anforderungen hinsichtlich individualisierter Herstellungsprozesse, Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz haben zu einem neuen Entwicklungsdruck im Bereich der Fertigungsverfahren geführt, dem alleine durch die Ausreizung der Prozessgrenzen herkömmlicher Fertigungsverfahren nicht begegnet werden kann. Innovationen sind wie von NAU ET AL. [NAU11] ausgeführt, zudem ein wichtiger Faktor für die Produktion in Hochlohnländern. Eine Optimierung vorhandener Fertigungsverfahren führt allerdings in der Regel nicht zu einem Leistungs- und Innovationssprung wie ALLWOOD und CULLEN in [ALL12] herleiten. Daher ist die Hybridisierung vorhandener Verfahren ein Weg neue technologische Potenziale zu erschließen [NAU11]. Auch TEKKAYA ET AL. leiten in [TEK14] die Notwendigkeit für neue Technologien zur Herstellung von Leichtbaukomponenten aus Metall her und stellen eine Reihe hybrider kombinierter Verfahren aus dem Bereich des Strangpressens vor.

Im Rahmen einer CIRP Arbeitsgruppe zu den hybriden Prozessen wurden diese wie folgt definiert [LAU14]: „Hybride Fertigungsverfahren basieren auf einer kontrollierten und simultanen Interaktion von Prozessmechanismen und / oder Energiequellen / Werkzeugen mit einem signifikanten Einfluss auf die Prozessleistung.“

Diese Definition schließt eine Anzahl kombinierter, aber sequentiell ablaufender, Prozesse aus, die aber häufig ebenfalls zu den hybriden Verfahren gezählt werden. Ein Beispiel hierfür wäre die kombinierte additive und subtraktive Fertigung auf dafür ausgestatteten CNC-Anlagen. Zu den hybriden Verfahren im Sinne der oben genannten Definition zählen nur diejenigen, bei denen sich ein funktioneller oder wirtschaftlicher Mehrwert durch die kombinierte Durchführung gegenüber einer sequentiellen Fertigungsfolge in separaten Prozessen oder Anlagen ergibt. Abbildung 3.1 zeigt die vollständige Klassifizierung der hybriden Prozesse gemäß [LAU14].

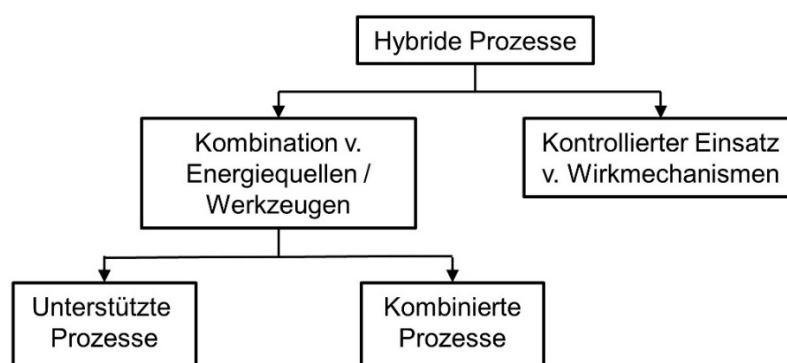


Abbildung 3.1: Klassifizierung hybrider Prozesse nach [LAU14]

3.1 Hybride Prozesse durch Kombination von Energiequellen und / oder Werkzeugen

Die erste Gruppe der hybriden Prozesse enthält diejenigen Prozesse, bei denen zwei oder mehr Energiequellen oder Werkzeuge kombiniert werden und einen synergetischen simultanen Effekt in der Haupteinflusszone ausüben. Diese Gruppe lässt sich

weiter aufgliedern in die unterstützten Prozesse auf der einen Seite, bei denen ein Hauptprozess, beispielsweise ein Spanabtrag, von einem einen sekundären Prozess, wie beispielsweise einer Erwärmung mittels Laser oder durch Ultraschallanregung, nur unterstützt wird. Auf der anderen Seite liegen die echten hybriden Prozesse, bei denen zwei oder mehr Wirkmechanismen aus unterschiedlichen Prozessen gleichzeitig an der Wirkstelle im Einsatz sind. [LAU14]

3.1.1 Unterstützte Prozesse

Die unterstützten Prozesse sind derzeit die häufigste Einsatzform der hybriden Prozesse. Sie umfassen ein weites Feld von Anwendungen und Prozesskombinationen, die derzeit erforscht und teilweise auch schon industriell angewendet werden. Dabei liegt der Schwerpunkt vor allem in Einsatzgebieten der Zerspan- und Abtragtechnik, wie auch in Tabelle 3.1 deutlich zu erkennen ist.

Relative Häufigkeit von Veröffentlichungen in der analysierten Literatur ● Sehr häufig ◐ Häufig ○ Selten		Primärprozesse										
		Drehen	Fräsen	Bohren	Schleifen	Polieren/Läppen	EDM	ECM	Laser	Umformung	Schneiden	Ätzen
Sekundärprozesse	Schwingungs-/Ultraschallunterstützt	●	○	◐	●	◐	●	◐	○	○		
	Laserunterstützt	●	◐	◐	○		○		○	◐	○	○
	Wasserstrahlunterstützt											
	Druckmedienunterstützt	◐			○					●		
	Magnetfeldunterstützt	○				◐	○	○		○		
	Wärmeübertragungsunterstützt									◐		

Tabelle 3.1: Übersicht typischer unterstützter hybrider Prozesse nach [LAU14]

Vor allem laser- und ultraschall-unterstützte Prozesse werden in einer Vielzahl von Veröffentlichungen beschrieben und auf ihre Wirkungsmechanismen hin untersucht. Die Ziele sind im Allgemeinen ein verbessertes Spanbruchverhalten, eine Erhöhung der Produktivität und (Oberflächen-) Qualität sowie eine generelle Verbesserung der Zerspanbarkeit und damit einhergehend der Werkzeugstandzeit [NEU12]. Im Bereich der umformenden Verfahren ist vor allem der Einsatz von Druckmedien zur Prozessunterstützung verbreitet und erforscht, aber es finden sich auch hier Beispiele für laser- und ultraschallunterstützte Verfahren. Ebenfalls in den Bereich der unterstützten Prozesse fallen viele spanende und umformende Anwendungen mit kryogener Kühlung, die nicht in der Tabelle aufgeführt sind. Eine aktuelle Übersicht über die Vielzahl an kryogen-unterstützten Verfahren und ihre Eigenschaften bieten JAWAHIR ET AL. [JAW16].

Aufgrund des großen Umfangs an publizierten Arbeiten in diesem Themengebiet, wird im Folgenden nur eine Auswahl an Verfahren aus dem Bereich der Umformtechnik beispielhaft erwähnt. Für eine vollständigere Darstellung vor allem auch der spanenden Prozesse sei auf das umfangreiche Review von ZHU ET AL. [ZHU13], das hier zitierte Keynote von LAUWERS ET AL. [LAU14] und den Beitrag zu aktuellen Trends bei den lasergestützten spanenden Verfahren von JEON ET AL. [JEO12] verwiesen. Im Hinblick auf die Hochleistungszerspanung in der Automobil- und Luftfahrtindustrie fassen NEUGEBAUER ET AL. [NEU12] die Zusammenhänge verschiedener Schneidwerkstoffe und

unterstützender Verfahren bezüglich der Kriterien Zerspanleistung, Maschinenenergieverbrauch und Werkzeugstandzeit zusammen. Zu der Verwendung von Lasern in hybriden additiven Verfahren bieten MERKLEIN ET AL. [MER16] sowie PINKERTON [PIN16] eine gute Übersicht, während ZHU ET AL. [ZHU 16] den entstehenden Bauteilverzug bei hybriden additiven Prozessen untersuchen.

Für Bleche aus Edelstahl, Federstahl und Titanlegierungen entwickelten EMONTS ET AL. [EMO10] einen laserunterstützten Scherschneidprozess mit lokaler selektiver und kurzzeitiger Erwärmung der Scherzone der Bleche von der Unterseite, der die Prozesskräfte, Lärmemissionen und den Werkzeugverschleiß signifikant senken konnte. Im nächsten Entwicklungsschritt erweitern BRECHER ET AL. [BRE12] dieses Funktionsprinzip für die Umformverfahren Biegen, Prägen und Tiefziehen mit Hilfe eines in eine neuartige Matrize integrierten Laser-Scanning-Systems. GISARIO ET AL. [GIS11] und [GIS16] untersuchen den Einfluss einer Laserunterstützung auf die Rückfederung von Blechen aus unterschiedlichen Werkstoffen bei Blechbiegeprozessen und zeigen, dass die Rückfederung fast vollständig eliminiert werden kann. Laser kommen auch in Kombination mit inkrementellen Umformverfahren zum Einsatz. DUFLOU ET AL. [DUF07] nutzen die lokale partielle Erwärmung von Blechen für die inkrementelle Umformung mittels Stichel und erweitern auf diesem Weg die Prozessgrenzen des Verfahrens. Weiterführende Arbeiten, vor allem zur Bearbeitung von Titan und Magnesiumlegierungen, stammen von BIERMANN ET AL. [BIE09] und GÖTTMANN ET AL. [GÖT11].

3.1.2 Kombinierte Prozesse

Die größte Gruppe der hybriden Prozesse in dieser Kategorie bilden die kombinierten subtraktiven Prozesse, bei denen der Fokus der Forschungsarbeiten auf der Untersuchung neuer Kombinationsmöglichkeiten mit dem Ziel einer Leistungssteigerung des Gesamtprozesses liegt. Eine wichtige Rolle nehmen in diesem Bereich integrierten Verfahren aus Erodieren und Schleifen ein. Sie machen sich die vorteilhaften Eigenschaften der Synergie aus Funkenerosion und abrasivem Abtrag zu Nutze. Eine Zusammenstellung der hybriden subtraktiven Prozesse findet sich in [LAU14]. Als fügen-des kombiniertes Verfahren ist beispielsweise das hybride Schweißen in Kombination aus Laser- und Metall-Inergas-Schweißen zu nennen [YAN14]. Im Bereich der umformenden Verfahren existieren beispielsweise verschiedene kombinierte Strangpressverfahren wie das Runden [BEC09] und das Tordieren [KHA12] durch Beeinflussung des Werkstoffflusses in der Matrize. Weiterhin ist der ECAP-Prozess (Equal Channel Angular Extrusion) zu nennen, der zum Ziele der Kornverfeinerung [XU10] und des direkten Strangpressens von Metallspänen [YIN10] entwickelt wurde.

3.2 Hybride Prozesse durch den kontrollierten kombinierten Einsatz von Wirkmechanismen

Die zweite Gruppe der hybriden Prozesse umfasst diejenigen Prozesse, bei denen eine kontrollierte Kombination von Effekten auftritt, die gewöhnlich aus getrennten Prozessen resultieren, wie beispielsweise das Presshärten, bei dem eine Umformung und ein Härtingsprozess kombiniert ablaufen. Eine Übersicht über das Presshärten von Bor-Mangan-Stahl und die häufig damit verbundene Herstellung gradierter Blechteile liefern MERKLEIN ET AL. [MER16B] während KARBASIAN [KAR10] den Schwerpunkt auf die Formgenauigkeit und mechanischen Eigenschaften von Bauteilen legt. Als weitere Verfahren in diesem Bereich sind das Schleifhärten und das von MEYER ET AL. [MEY11] entwickelte kryogene Festwalzen zu nennen.

4 Hybride Methoden

Unter hybriden Methoden wird hier die komplementäre Ergänzung von Simulations- und Messmethoden verstanden. Die für eine Simulation erforderliche Modellierung kann dabei analytisch, halb-analytisch oder numerisch erfolgen. Die während einer Messung ermittelten Daten können sowohl online als auch offline ermittelt werden.

Die Grundidee der Strategie besteht darin, die nicht ermittelten Daten der einen Methode, z.B. nicht messbare Verzerrung im Inneren eines Körpers, durch die Daten der anderen Methode, z.B. Knotenverschiebungen auf Basis einer FE-Simulationen desselben Körpers, zu ergänzen. In dem hier prinzipiell erwähnten Beispiel dienen die Messdaten als Randbedingungen für die Simulation. Die komplementäre Ergänzung ist aber auch bei umgekehrtem Sachverhalt einsetzbar, z.B. nicht berechnete Simulationsdaten wie die Temperatur in einer Abkühlsimulation nach definierter Zeit, werden durch Messdaten ergänzt bzw. ersetzt.

Zur Verdeutlichung sei hier das Beispiel der Grauwertkorrelationsanalyse herangezogen. Die Ermittlung von Dehnungen auf Basis eines verzerrten Rasters gehört heutzutage zum Stand der Technik. Die darin enthaltene Information des sich ändernden Deformationszustands $d\epsilon$ kann genutzt werden, um Spannungen zu ermitteln. KÜSTERS und BROSIUS nutzen den in Abbildung 4.1 dargestellten Zusammenhang, bei dem die Änderung des Verzerrungstensors der Normalen auf der Fließfläche entspricht (assoziierte Fließregel). Diese Eigenschaft kann bei vollständig bekannter Historie des Deformationsvorgangs zur Ermittlung der im Bauteil befindlichen Spannungen genutzt werden. [Küs16]

Die Methode der Simulation kann auch zur Ergänzung der Messdaten verwendet werden, siehe hierzu Abbildung 4.2. In diesem Beispiel ist erneut eine Grauwertkorrelationsanalyse dargestellt, bei der ein Bereich infolge von Messfehlern nicht ausgewertet werden konnte. Der fehlende Bereich kann in diesem Fall unter Nutzung der Informationen aus dem umgebenden Bereich interpoliert oder unter Nutzung des Wissens um das Werkstoffverhalten (Matrix C) direkt berechnet werden.

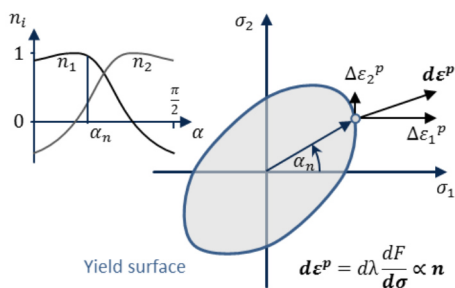


Abbildung 4.1: Simulation auf Messdaten [Küs16]

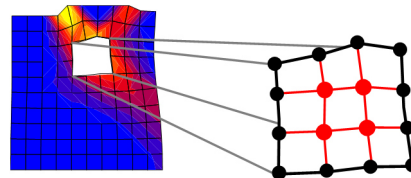


Abbildung 4.2: Messdatenergänzung durch Simulation

5 Konzept hybrid^n

Der Begriff „hybrid“ wird im Feld der Fertigungstechnologien für ein weites Spektrum von Werkstoffen, Prozessen und Methoden verwendet. Die größte Gemeinsamkeit liegt dabei in dem Ziel, durch die Kombination unterschiedlicher Komponenten eine Leistungssteigerung zu erreichen. Diese Leistungssteigerung kann einen oder meh-

rere der Faktoren Qualität, Ressourceneinsatz, Wirtschaftlichkeit und Machbarkeit betreffen. Hybride Werkstoffe und Werkstoffkombinationen spielen dabei vor allem auch mit dem Ziel der Ausschöpfung eines Leichtbaupotenzials eine besondere Rolle. Um diese vorhandenen Potenziale jedoch auch wirklich nutzbar zu machen, bedarf es neuartiger Fertigungsprozesse und Modellierungsansätze, die für sich jeweils ebenfalls hybride Charakteristiken aufweisen. Für das Zusammenspiel aus Werkstoffen und Fertigungsverfahren formulierte Herr Prof. Dr-Ing. habil. Prof. E.h. Dr. h.c. W. Hufenbach in [GUD15]:“ Ressourceneffizienter Leichtbau bedeutet, gezielt die richtigen Werkstoffe an der richtigen Stelle einzusetzen, um mit den geeigneten Fertigungsverfahren die werkstoffspezifischen Potenziale bestmöglich auszunutzen.” Der hier vorgeschlagene Ansatz *hybridⁿ* erweitert diese Betrachtungsweise um eine weitere Komponente - die hybriden Charakterisierungs-, Berechnungs-, und Auslegungsmethoden. Diese umfassen sowohl die Methoden zur Charakterisierung und Auslegung von Bauteilen, Strukturen und Werkstoffen als auch Methoden zur Prozessgestaltung und -auslegung. Die hybriden Methoden stellen das Bindeglied zwischen den Werkstoffen und den eingesetzten Fertigungsprozessen dar und ermöglichen eine ganzheitliche Betrachtungsweise über die gesamte Prozesskette, die für die Erfüllung der immer steigenden Anforderungen erforderlich ist.

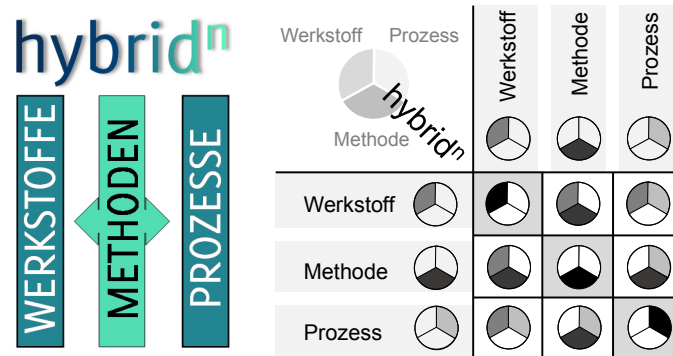


Abbildung 5.1: Konzept von *hybridⁿ*

Ein Ergebnis der FOREL-Studie ist, dass die neuen Werkstoffe und Werkstoffkombinationen von den OEMs und Zulieferern trotz ihres zunehmenden Einsatzes immer noch als risikobehaftet und fachlich nicht vollständig durchdrungen angesehen werden. So benennen viele der Befragten den erhöhten Aufwand in Design und Auslegung, die unzureichende Materialcharakterisierung sowie eine unzureichende Standardisierung als größte Hemmnisse für den Einsatz von Mischbauweisen, wie sie für erfolgreichen Leichtbau notwendig sind. [GUD15]

Genau hier liegt ein Ansatzpunkt für *hybridⁿ* und die darin enthaltenen hybriden Methoden.

6 Literatur

- [ALL12] Allwood, J. M.; Cullen, J. M.: Sustainable materials with both eyes open. Department of Engineering, University of Cambridge, UIT Cambridge Ltd., 2012.
- [BEC09] Becker, D.: Strangpressen 3D-gekrümmter Leichtmetallprofile. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Shaker-Verlag, 2009.
- [BEH14] Behrens, B.-A.; Hübner, S.; Neumann, A.: Forming sheets of metal and fibre-reinforced plastics to hybrid parts in one deep drawing process. 11th International Conference of Technology and Plasticity, ICTP 2014, 19-24 October 2014, Nagoya, In: Proc. Eng., 81, 1608-1613, 2014.

- [BIE09] Biermann, T.; Goettmann, A.; Zettler, J.; Bambach, W.; Weisheit, A.; Hirt, G.; Poprawe, R.: Hybrid Laser-Assisted Incremental Sheet Forming - Improving Formability of Ti- and Mg-Based Alloys. In: *Lasers in Manufacturing*, 273-278, 2009.
- [BRE12] Brecher, C.; Emonts, M.; Eckert, M.: Laser-assisted sheet metal working by the integration of scanner system technology into a progressive die. In: *Physics Procedia*, 39, 249-256, 2012.
- [DLU16] Dlugosch, M.; Lukaszewicz, D.; Fritsch, J.; Hiermaier, S.: Experimental investigation of hybrid material systems consisting of advanced composites and sheet metal. In: *Composite Structures*, 152, 840-859, 2016.
- [DUF07] Dufloy, J. R.; Callebaut, B.; Verbert, J.; De Baerdemaeker, H.: Laser Assisted Incremental Forming: Formability and Accuracy Improvement. In: *Ann. CIRP*, Vol. 56/1, 273-276, 2007.
- [EMO10] Emonts, M.; Brecher, C.: Laser-assisted Shearing of Stainless Steel and Spring Steel Plates with the Use of a Laser Scanner System - New Hybrid Production Technology for the Sheet Metal Industry. In: *Physics Procedia*, 5, 273-283, 2010.
- [FLE13] Fleischer, J.: „Intrinsische Hybridverbunde – Grundlagen der Fertigung, Charakterisierung und Auslegung“ (SPP 1712), Ausschreibung zum SPP 1712, Deutsche Forschungsgemeinschaft, Information für die Wissenschaft Nr. 47, 2013.
- [FLE15] Fleischer, J.; Koch, S.-F.; Coutandin, S.: Manufacturing of polygon fiber reinforced plastic profiles by rotational molding and intrinsic hybridization. In: *Prod. Eng. Res. Devel.*, 9, 317-328, 2015.
- [GIS11] Gisario, A.; Barletta, M.; Conti, C.; Guarino, S.: Springback control in sheet metal bending by laser-assisted bending: Experimental analysis, empirical and neural network modelling. In: *Optics and Lasers in Engineering*, 49, 1372-1383, 2011.
- [GIS16] Gisario, A.; Barletta, M.; Venetacci, S.: Improvements in springback control by external force laser-assisted sheet bending of titanium and aluminum alloys. In: *Opt. & Las. Technol.*, 86, 46-53, 2016.
- [GÖT11] Göttmann, A.; Diettrich, J.; Bergweiler, G.; Bambach, M.; Hirt, G.; Loosen, P.; Poprawe, R.: Laser-Assisted Asymmetric Incremental Sheet Forming of Titanium Sheet Metal Parts. In: *Production Engineering - Research and Development*, 5, 263-271, 2011.
- [GRO16] Großmann, K.; Hardtmann, A.; Bräunling, S.; Cherif, C.; Staiger, E.: Umformende Verbundherstellung von Textil-Blech-Verbund-Hybriden auf Basis von Kohlenstofffasern und Thermoplast. EFB-Forschungsbericht Nr. 436, E e.V., 2016.
- [GUD15] Gude, M.; Meschut, G.; Zäh, M. F.; Lieberwirth, H.: FOREL-Studie, Chancen und Herausforderungen im ressourceneffizienten Leichtbau für Elektromobilität. 2015.
- [HOP13] Hopmann, C.; Böttcher, A.; Fischer, K.: Investigations of bonding approaches and initial bond strength for the intrinsic manufacturing of laminary bonded hybrids made of thermoplastic composite and metal. In: *Journal of Plastics Technology*, 9 (6), 254-274, 2013.
- [JAW16] Jawajir, I.S.; Attia, H.; Biermann, D.; Dufloy, J.; Klocke, F.; Meyer, D.; Newman, S.T.; Pusavec, F.; Putz, M.; Rech, J.; Schulze, V.; Umbrello, D.: Cryogenic manufacturing processes. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 65, 713-736, 2016.
- [JEO12] Jeon, Y.; Lee, C.M.: Current Research Trend on Laser Assisted Machining. In: *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 13, No. 2, 311-317, 2012.
- [KAR10] Karbasian, H.: Formgenauigkeit und Mechanische Eigenschaften pressgehärteter Bauteile. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Shaker-Verlag, 2010.
- [KHA12] Ben Khalifa, N.: Strangpressen schraubenförmiger Profile am Beispiel von Schraubenrotoren. Dissertation, Technische Universität Dortmund, 2012.
- [KIE16] Kießling, R.; Ihlemann, J.; Pohl, M.; Stommel, M.; Dammann, C.; Mahnken, R.; Bobbert, M.; Meschut, G.; Hirsch, F.; Kästner, M.: On the Design, Characterization and Simulation of Hybrid Metal-Composite Interfaces. In: *Applied Composite Materials*, 2016.
- [KÜS16] Küsters, N.; Brosius, A.: Semi-analytic parameter identification for complex yield functions. Numiform 2016 - 12th International Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processes / MATEC Web of Conferences 80, 2016.

- [LAN16] Landgrebe, D.; Kräusel, V.; Rautenstrauch, A.; Albert, A.; Wertheim, R.: Energy-efficiency in a hybrid process of sheet metal forming and polymer injection moulding. 13th Global Conference of Sustainable Manufacturing - Decoupling Growth from Resource Use. In: *Procedia CIRP*, 40, 109-114, 2016.
- [LAU14] Lauwers, B.; Klocke, F.; Klink, A.; Tekkaya, E. A.; Neugebauer, R.; Mcintosh, D.: Hybrid processes in manufacturing. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 63, 561-583, 2014.
- [MER16] Merklein, M.; Junker, D.; Schaub, A.; Neubauer, F.: Hybrid additive manufacturing technologies - An analysis regarding potentials and applications. 9th International Conference on Photonic Technologies - LANE 2016, In: *Physics Procedia*, 83, 549-559, 2016.
- [MER16B] Merklein, M.; Wieland, M.; Lechner, M.; Bruschi, S.; Ghiotti, A.: Hot Stamping of Boron Steel Sheets with Tailored Properties. In: *J. Mater. Process. Technol.*, 228, 11-24, 2016.
- [MEY11] Meyer, D.; Brinksmeier, E.; Hoffmann, F.: Surface Hardening by cryogenic deep rolling. In: 1st CIRP Conference on Surface Integrity (CSI), *Procedia Engineering* 19, 258-263, 2011.
- [NAU11] Nau, B.; Roderburg, A.; Klocke, F.: Ramp-up of hybrid manufacturing technologies. In: *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 4, 313-316, 2011.
- [NEI14] Neitzel, M.; Mitschang, P.; Breuer, U.: *Handbuch Verbundwerkstoffe : Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung*. Hanser München, 2014.
- [NES12] Nestler, J.: *Verbundwerkstoffe - Werkstoffverbunde, Status quo und Forschungsansätze*. Habilitation, Technische Universität Chemnitz, 2012.
- [NEU12] Neugebauer, R.; Drosser, W.; Wertheim, R.; Hochmuth, C.; Dix, M.: Resource and Energy Efficiency in Machinig Using High-Performance and Hybrid Processes. 5th CIRP Conference on High Performance Cutting 2012, *Procedia Cirp* 1, 3-16, 2012.
- [PIN16] Pinkerton, A. J.: Lasers in additive manufacturing. In: *Opt. & Las. Technol.*, 78, 25-32, 2016.
- [REI09] Reinhold, B.: *Werkstoffverbunde im Automobilbau - neue Systemlösungen für komplexe Anforderungsprofile*. In: Krenkel, W. (Hrg.): *Verbundwerkstoffe, 17. Symposium Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde, Tagungsband*, Wiley-VCH GmbH & Co. KGaA, 27-38, 2009.
- [STA09] Stauber, R.: *Werkstoffe und Technologien für den Automobil Leichtbau*. In: Krenkel, W. (Hrg.): *Verbundwerkstoffe, 17. Symposium Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde, Tagungsband*, Wiley-VCH GmbH & Co. KGaA, 12-26, 2009.
- [TEK14] Tekkaya, E. A.; Ben Khalifa, N.; Grzanic, G.; Hölker, R.: Forming of lightweight metal components: Need for new technologies. In: *Procedia Engineering*, 81, 28-37, 2014.
- [TUL15] Tulke, M.; Watzke, J.; Schomäcker, M.; Brosius, A.: Stainless Steel Composites Integrated in Modern Facade Engineering. *Journal of Mechanics Engineering and Automation Vol. 5*, 2015.
- [TUL16] Tulke, M.; Korn, C.: Multimaterielles Werkzeug für moderne Metallfassaden. In: *MM Maschinenmarkt, KW42 2016*, 32-36, 2016.
- [XU10] Xu, C.; Schröder, S.; Berbon, P. B.; Langdon, T. G.: Principles of ECAP-Conform as a Continuous Process for Achieving Grain Refinement, Application to an Aluminum Alloy. In: *Acta Materialia* 58, 1379-1386, 2010.
- [YAN14] Yan, S.; Chen, H.; Zhu, Z.; Gou, G.: Hybrid laser-Metal Inert Gas welding of Al-Mg-Si alloy joints: Microstructure and mechanical properties. In: *Materials and Design* 61, 160-167, 2014.
- [YIN10] Ying, T.; Zhen, M. Y.; Hu, X. S.; Wu, K.: Recycling of AZ91 MG Alloy Through Consolidation of Machined Chips by Extrusion and ECAP. In: *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 20, 604-607, 2010.
- [ZHU13] Zhu, Z.; Dhokia, V. G.; Nassehi, A.; Newman, S. T.: A review of hybrid manufacturing processes - state of the art and future perspectives. In: *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 26 (7), 596-615, 2013.
- [ZHU16] Zhu, Z.; Dhokia, V.; Nassehi, A.; Newman, S. T.: Investigation of part distortions as a result of hybrid manufacturing. In: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 37, 23-32, 2016.