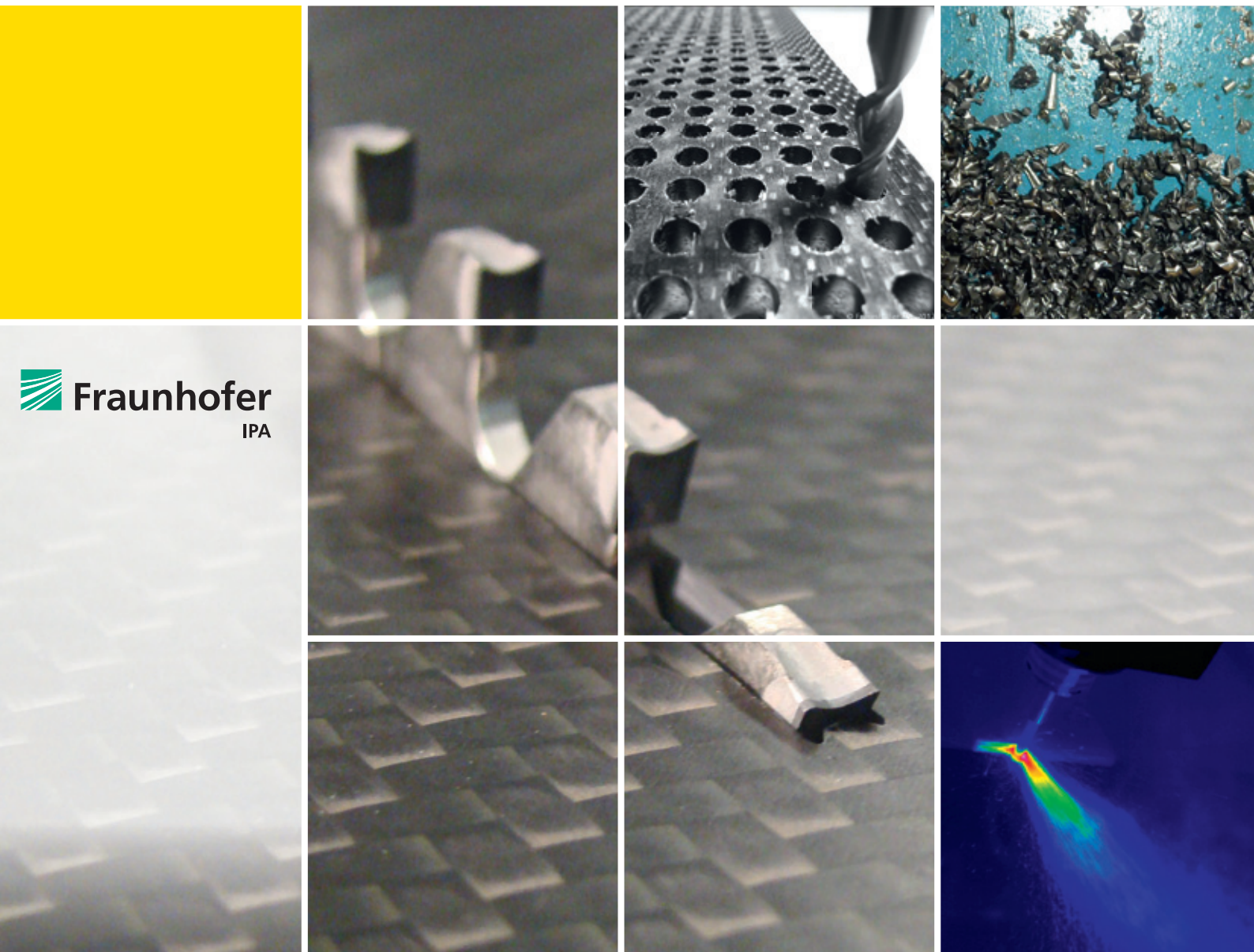
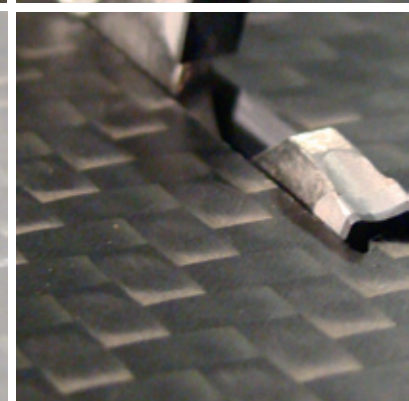
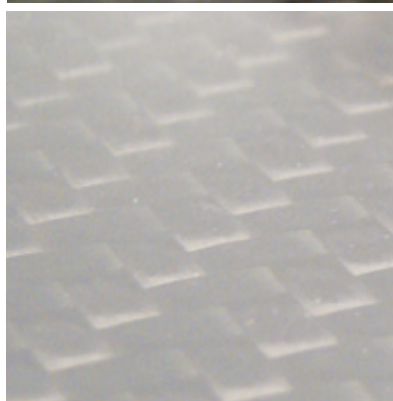


SPANENDE BEARBEITUNG VON LEICHTBAUWERKSTOFFEN

Einführung und Überblick





SPANENDE BEARBEITUNG VON LEICHTBAUWERKSTOFFEN

Einführung und Überblick

e-mobil BW GmbH – Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Abteilung Leichtbautechnologien

Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg

Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg

INHALT

Vorwort	4
Kernergebnisse und Implikationen zur Bearbeitungs- und Maschinentechologie	5
Einleitung	6
1 Leichtbauwerkstoffe	7
1.1 Was sind Leichtbauwerkstoffe?	7
1.2 Hochfeste Stähle	9
1.3 Leichtmetalle	10
1.3.1 Aluminium und Aluminiumlegierungen	10
1.3.2 Magnesium und Magnesiumlegierungen	11
1.3.3 Titan	11
1.4 Keramiken und faserverstärkte Keramiken	11
1.5 Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe	12
1.6 Glasfaserverstärkte Kunststoffe	13
1.7 Schichtverbunde	14
1.8 Holz und andere regenerative Werkstoffe	14
2 Werkzeuge und Bearbeitungsprozesse	16
2.1 Hochfeste Stähle	16
2.2 Leichtmetalle	16
2.2.1 Aluminium	16
2.2.2 Magnesium	16
2.2.3 Titan	16
2.3 Keramiken	16
2.4 Faserverstärkte Kunststoffe	17
2.4.1 Werkzeuge	17
2.4.2 Fräsen	17
2.4.3 Bohren	20

2.5	Holz und Holzwerkstoffe	21
2.6	Kühlen und Schmieren in der FVK-Bearbeitung	22
2.6.1	Vorteile	22
2.6.2	Ungewollte Effekte durch Kühlung und Schmierung	23
2.6.3	Methoden der Kühlung und Schmierung	24
2.7	Sicherheit	25
3	Marktanalyse: Bearbeitungszentren für Leichtbauwerkstoffe	28
3.1	Einleitende Bemerkungen	28
3.2	Ergebnisse	28
3.2.1	Kosten und Größe der Anlagen	28
3.2.2	Werkstoffe	28
3.2.3	Branchen	28
3.2.4	Bauart	28
3.2.5	Arbeitsleistung	32
3.2.6	Werkzeugmagazine	33
3.2.7	Kühlung und Schmierung	34
3.2.8	Spanntechnik	34
3.2.9	Automatisierung	35
3.2.10	Maschinensicherheit	35
	Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Abteilung Leichtbautechnologien	37
	Abbildungsverzeichnis	38
	Abkürzungsverzeichnis	40
	Literaturverzeichnis	41
	Marktübersicht	44

VORWORT

Für die Wettbewerbsfähigkeit des produzierenden Gewerbes gewinnen Energie- und Ressourceneffizienz zunehmend an Bedeutung. Leichtbautechnologien werden dabei eine entscheidende Rolle spielen und als Innovationstreiber auf zahlreiche Branchen wirken, wie beispielsweise Fahrzeug-, Maschinen- und Anlagenbau, Luft- und Raumfahrt, Bauindustrie oder Medizintechnik.

Zu diesen Leichtbautechnologien zählt auch der sogenannte Werkstoffleichtbau bei dem alternative Werkstoffe eingesetzt werden, womit auch Veränderungen bei der Bauteilbearbeitung einhergehen können und entscheidenden Einfluss auf die Auswahl von geeigneten Bearbeitungs- und Maschinentechologien ausüben.

Die vorliegende Potentialanalyse beleuchtet daher die technologischen Besonderheiten der Leichtbauwerkstoffe im Hinblick auf ihre spanende Bearbeitung. Daneben spielen auch die gesundheitlichen Aspekte, die bei der Bearbeitung von Leichtbauwerkstoffen zu beachten sind, eine wichtige Rolle.

Für Fach- und Führungskräfte in Fertigung und Produktion wird eine Einführung in die Thematik und ein Überblick darüber gegeben, was bei der Bearbeitung von Leichtbauwerkstoffen im Vergleich zu konventionellen Materialien zu beachten ist. Damit und mit der enthaltenen Marktanalyse soll sie vor allem kleinen und mittleren Unternehmen den Einstieg in die Arbeit mit neuen Materialien erleichtern.



A handwritten signature in black ink that reads "Nils Schmid".

Dr. Nils Schmid MdL

Stellvertretender Ministerpräsident und Minister für Finanzen
und Wirtschaft des Landes Baden-Württemberg

A handwritten signature in black ink that reads "Franz Loogen".

Franz Loogen
Geschäftsführer e-mobil BW

KERNERGEBNISSE UND IMPLIKATIONEN ZUR BEARBEITUNGS- UND MASCHINENTECHNOLOGIE

WERKZEUGE

Jeder einzelne Werkstückwerkstoff stellt andere, individuelle Anforderungen an Werkzeug und Prozessparameter. Aus den Erhebungen ergibt sich, dass die Bearbeitung von Leichtbauwerkstoffen besondere Strategien benötigt.

Die Leichtmetalle Aluminium und Magnesium stellen generell geringe Anforderungen an den Zerspanprozess. Zum Einsatz kommen hier Werkzeuge aus Schnellarbeitsstahl oder Hartmetall mit scharfen Schneiden. Titan hingegen gehört zu den schwer zerspanbaren Werkstoffen. Werkzeuge zur Titanbearbeitung können aus Schnellarbeitsstahl oder Hartmetall sein, wobei der schlechten Wärmeleitung und den damit einhergehenden hohen Prozesstemperaturen mit der Verwendung von Kühlschmierstoff zu begegnen ist.

Werkzeuge zur Bearbeitung von faserverstärkten Kunststoffen (FVK) müssen zum einen der hohen abrasiven Wirkung der Fasern standhalten und zum anderen Schäden am Werkstück wie Delamination, Ausbrüche und Ausfransungen vermeiden. Der hohe Verschleißwiderstand wird durch beschichtete oder mit polykristallinem Diamant (PKD) bestückte Schneiden realisiert. Werkstückschäden können durch geeignete Schneidengeometrien und angepasste Prozesstechnologieparameter vermieden werden.

KÜHLUNG UND SCHMIERUNG

Durch Kühlschmierung bei der Bearbeitung von faserverstärkten Kunststoffen können verlängerte Standzeiten der Werkzeuge, kürzere Bearbeitungszeiten und bessere Bearbeitungsqualitäten erreicht werden. Jedoch sollten in jedem Fall etwaige unerwünschte Nebeneffekte wie chemische Degradation, Verschmutzung mit Fremdstoffen oder -partikeln und Feuchtigkeitsaufnahme durch Fasern und Matrix vorab Berücksichtigung finden.

Das Kompendium gibt einen kurzen Überblick über die verfügbaren Kühlungs- und Schmiermethoden. Als Ergebnis ergibt sich, dass bei der FVK-Bearbeitung derzeit nur wenige Erfahrungen und wissenschaftliche Analysen zu den verschiedenen Kühlmethoden in Bezug auf Bearbeitungsqualität und Wirtschaftlichkeit existieren. Deswegen müssen jeweils der konkrete Anwendungsfall und dessen Randbedingungen analysiert und individuell entschieden werden, ob eine Kühlung bzw. welche Kühlmethode eingesetzt wird.

SICHERHEIT

Entscheidend für ein sicheres Bearbeiten von Leichtbauwerkstoffen ist die Einhaltung von entsprechenden Vorschriften und Richtlinien. Bei der Zerspanung sind die jeweiligen werkstoffspezifischen Besonderheiten zu beachten. Zum Beispiel erfordert die Magnesiumzerspannung einen erhöhten Aufwand hinsichtlich des Explosionsschutzes. Faserverstärkte Kunststoffe und Holzwerkstoffe sollten wegen der Bildung von teilweise gesundheitsbedenklichen Stäuben in geschlossenen Maschineneinhausungen oder sehr gut abgesaugten Maschinen mit Teilkapselung zerspannt werden. Hierdurch kann auch gleichzeitig der Schutz des Bedieners vor gebrochenen Werkzeugen sichergestellt werden.

MARKTANALYSE VON CNC-BEARBEITUNGSZENTREN FÜR LEICHTBAUWERKSTOFFE

Die Datenbasis für die Marktanalyse lieferten fünfzehn Firmen. Zehn Firmen sind aus Deutschland, davon sechs aus Baden-Württemberg und vier aus anderen Bundesländern. Die restlichen fünf Teilnehmer der Marktanalyse kommen aus anderen EU-Ländern. Von diesen 15 Firmen werden insgesamt 42 Maschinentypen als für Leichtbauwerkstoffe geeignete CNC-Bearbeitungszentren (BAZ) angegeben. Im Rahmen der Analyse ergab sich, dass der Durchschnittspreis für konventionelle 5-Achs-Bearbeitungszentren bei 60.300 €/m² liegt. Eines der Hauptmerkmale eines Bearbeitungszentrums ist die Hauptspindel. Beim Vergleich dieser Hauptkomponente zwischen den Baureihen ergab sich ein relativ großes Spektrum mit maximalen Drehzahlen von 12.000 bis 60.000 min⁻¹. Nahezu alle Maschinen sind in Fahrportalbauweise ausgeführt. Zahnstangenantriebe sind die häufigsten Achsantriebssysteme für die X- und Y-Achsen, die Z-Achsen werden meist als Kugelumlaufspindeln ausgeführt. Die Kombination aus mechanischen und Vakuum-Spannsystemen trat bei den erfassten Maschinen am häufigsten auf. 50 % der Baureihen weisen staubdichte elektrische und elektronische Komponenten auf, was vor allem für die Bearbeitung kohlenstofffaserverstärkter Kunststoffe (CFK) von immenser Bedeutung ist. Alle Maschinen verfügen über die Funktionalität, Minimalmengenschmierung (MMS) oder Druckluft zur Kühlung zu nutzen. Diese beiden Kühlungsmethoden, sowie die Kühlung durch Überflutung und die innere Kühlmittelzuführung sind in ungefähr 45 % der Baureihen als Standard verfügbar.

EINLEITUNG

Durch die ständig wachsenden Anforderungen zur Reduktion des Material- und Energiebedarfs sowie zur Erhöhung der operativen Effizienz sind Leichtbauwerkstoffe und -verfahren derzeit im Mittelpunkt des Interesses von Industrie und Wissenschaft.

Heutzutage stellen Metalle die bedeutendste Gruppe der Werkstoffe dar, die für Leichtbauanwendungen und -konstruktionen eingesetzt werden. Hier nehmen insbesondere Stahl und Aluminium herausragende Stellungen ein. Treibende Kraft ist dabei die Automobilindustrie, welche sich aufgrund der politischen Rahmenbedingungen und des wachsenden gesellschaftlichen Umweltbewusstseins der Herausforderung nach minimierten Flottenverbräuchen hinsichtlich Kraftstoff- und CO₂-Emission im Betrieb und bei der Herstellung einem steigenden Druck ausgesetzt sieht. Das Spektrum metallischer Leichtbauwerkstoffe reicht von Aluminium über die unterschiedlichsten Stahllegierungen und Magnesium bis hin zu Titan, das eine immer größere Verbreitung findet. Für diese metallischen Werkstoffe wurden jahrzehntelange Erfahrungen hinsichtlich Herstellung, Verhalten, Einsatzbereiche sowie Be- und Verarbeitungstechnologien erarbeitet. Diese Erfahrungen und Verfahren wurden in teilweise hochautomatisierte Prozesse umgesetzt und sind seit Jahren in der Industrie etabliert. Mittelfristig wird sich an dieser zentralen Bedeutung der Metalle für den Leichtbau nichts ändern. Dies belegen auch die Ergebnisse aus einer Studie von McKinsey & Company aus dem Jahr 2012, welche aktuelle Zahlen für den Einsatz der verschiedenen Leichtbauwerkstoffe angibt¹.

Neben metallischen Werkstoffen sind bereits seit Jahren Verbundwerkstoffe bekannt, die als Leichtbauwerkstoffe oder für Leichtbaukonstruktionen eingesetzt werden. Aufgrund ihrer ausgezeichneten Eigenschaften im Hinblick auf das Verhältnis von Festigkeit zu Dichte werden in meist hochpreisigen Anwendungen und Kleinserien im Automobilbau, der Luftfahrtbranche und in zunehmendem Maße auch der Konsumgüterindustrie vermehrt Verbundwerkstoffe (z.B. Wabenplatten), aber auch Faserverbundwerkstoffe eingesetzt. Aufgrund der noch geringen Marktdurchdringung, der gegenüber Metallen hohen Kosten für die Herstellung und teilweise auch durch Akzeptanzprobleme durch die Kunden fehlen grundlegende wissenschaftliche Untersuchungen und Erkenntnisse, wie sie für die Metalle in jahrelanger Forschungs- und Entwicklungsarbeit gebildet wurden.

Die vorliegende Analyse soll bei der Auswahl geeigneter Maschinen, Werkzeuge, Prozessparameter und Randbedingungen unterstützen und als Anleitung zur industriellen Verarbeiten dieser faserbasierten Verbundwerkstoffe dienen. Es werden maßgebliche Sachverhalte zur spanenden Bearbeitung von faserverstärkten Kunststoffen aus Wissenschaft und industrieller Praxis zusammengefasst und dem Anwender eine Hilfestellung zur Auslegung optimierter Bearbeitungsprozesse für Leichtbauwerkstoffe gegeben.

Ziel dieses Kompendiums ist es, einen Überblick über häufig verwendete Leichtbauwerkstoffe und deren mechanische spanende Bearbeitung zu geben. Kontinuierliche faserverstärkte Kunststoffe wie kohlenstofffaserverstärkte und glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) sind hierbei der Schwerpunkt dieser Analysen. Als Randthema werden ebenfalls Leichtmetalle und Hybrid-Werkstoffe betrachtet. Die mechanischen Eigenschaften, die Bearbeitbarkeit und die einzusetzenden Werkzeuge für die spanende Bearbeitung dieser Materialien werden vorgestellt und bewertet. Im Bereich der faserverstärkten Kunststoffe werden zusätzlich Verfahren zur Kühlung und Schmierung des Zerspanprozesses vorgestellt. Der Fokus liegt auf diesen relativ jungen Leichtbauwerkstoffen, da alle Verfahren zur Bearbeitung von homogenen Materialien, wie Leichtmetallen bekannter Stand in Forschung und Industrie sind.

In diesem Leitfaden ist zusätzlich eine Analyse von Bearbeitungszentren für Leichtbauwerkstoffe enthalten. Der potentielle Anwender erhält somit eine technische und wirtschaftliche Hilfestellung im Falle einer Investmententscheidung für ein derartiges Bearbeitungszentrum.

Kapitel 1

LEICHTBAUWERKSTOFFE

1.1 WAS SIND LEICHTBAUWERKSTOFFE?

Die Bedeutung des Themenfeldes Leichtbau hat in den letzten Jahren einen deutlichen Wandel erfahren. Leichtbauwerkstoffe werden mittlerweile nicht mehr nur in Nischenanwendungen verwendet, sondern immer öfter auch bei Produkten für einen breiten Massenmarkt. Vorangetrieben wird diese Entwicklung beispielsweise durch aktuelle Bestrebungen der Automobilhersteller zur Integration von Faserverbundwerkstoffen.²

Beim Einsatz von Leichtbauwerkstoffen liegt der Schwerpunkt häufig im Erzielen einer Energieersparnis durch die Reduktion der zu bewegenden Massen in beispielsweise Fahrzeugen, der Luftfahrt oder im Schienenverkehr, aber immer mehr auch im Bereich der Produktionstechnik oder bei Automatisierungslösungen. Beispiele dafür sind der Einsatz von faserverstärkten Kunststoffen zur Realisierung leichterer Werkzeugschlitzen in Werkzeugmaschinen oder eine Senkung des Gewichts der Mechanik von Industrierobotern durch die Substitution von Metallen durch Verbundwerkstoffe. Hierbei entstehen innerhalb eines Systems häufig Synergieeffekte, die eine zusätzliche Einsparung an Gewicht ermöglichen oder die Leistungsfähigkeit, wie Nutzlast oder Produktivität, eines Produktes erhöhen.

Entscheidend für das Leichtbaupotential eines Werkstoffes ist nicht ausschließlich seine Dichte und damit das Gewicht, sondern vor allem das Verhältnis von Dichte und den für die Anwendungen entscheidenden mechanischen Eigenschaften. Hierbei sind vor allem der Elastizitätsmodul und die Zugfestigkeit eines Materials von Bedeutung. Dividiert man diese Werte durch die jeweilige Dichte eines Werkstoffes so erhält man den spezifischen E-Modul bzw. die spezifische Zugfestigkeit. Durch den Einbezug der Dichte ist eine bessere Abschätzung über das Leichtbaupotential eines Werkstoffes möglich.

Leichtbau besteht jedoch aus mehr als nur dem Einsatz von Werkstoffen mit hohen gewichtsspezifischen Eigenschaften, nämlich auch aus dem Zusammenspiel einer gewichtsoptimierten Konstruktion mit dem geeigneten Leichtbauwerkstoff. Leichtbau ist damit nicht allein auf die Werkstoffe beschränkt, sondern beinhaltet eine Konzeption, welche neben der Werkstoffauswahl die konstruktive Ausgestaltung, die Bauweise und den Herstellungsprozess mit einschließt.

Aus diesem Grund muss für die vollständige Ausnutzung des Leichtbaupotentials innovativer Werkstoffe auch eine Anpassung in nahezu allen Bereichen stattfinden, insbesondere der konstruktiven Auslegung. Dies zeigt sich vor allem bei der Substitution von Metallen durch anisotrope Faserverbundwerkstoffe.

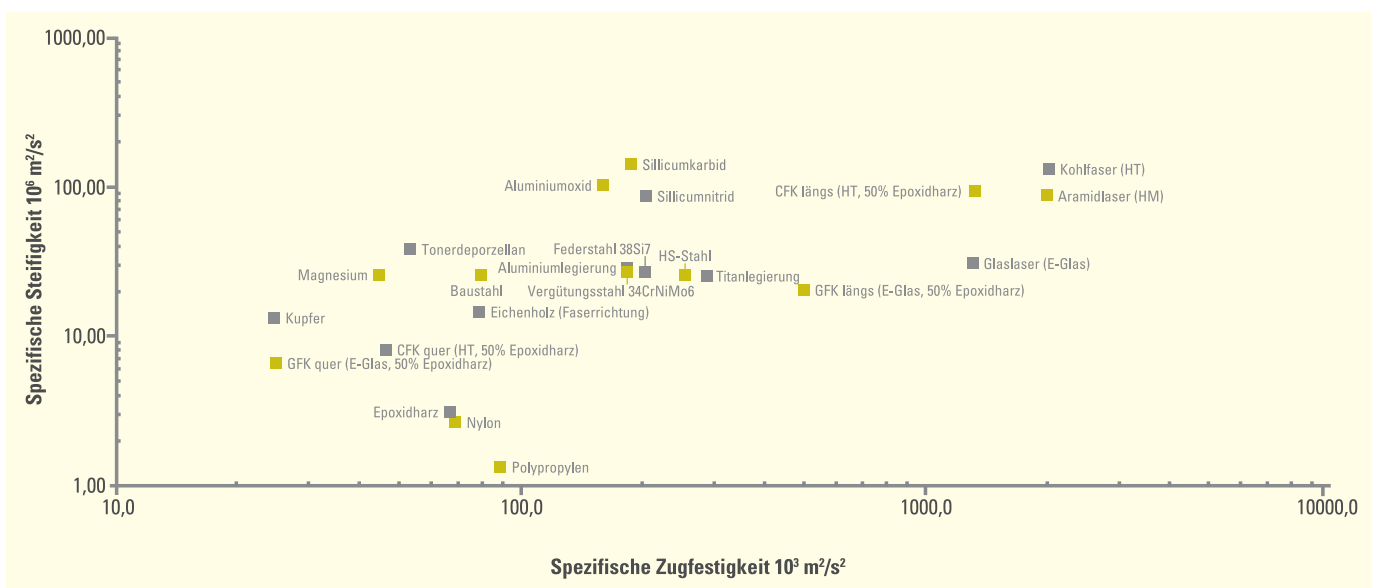


Abbildung 1: Vergleich der mechanischen Eigenschaften unterschiedlicher Leichtbauwerkstoffe³

Kapitel 1

Grundsätzlich stammen heutige Leichtbauwerkstoffe aus allen Gruppen der Konstruktionswerkstoffe wie Metall, Keramik oder Kunststoff. Von großer Bedeutung sind zusätzlich auch hybride Werkstoffe, also die Kombination von zwei oder mehreren Werkstoffen zu einem Verbundwerkstoff. Beispiele hierfür sind faserverstärkte Kunststoffe, welche aus der Kombination eines Faserwerkstoffes und einem Matrixmaterial bestehen. Andere Varianten sind Metallmatrixverbundwerkstoffe oder Verbundwerkstoffe, die eine technische Keramik als Matrixmaterial einsetzen. Zu den Verbundwerkstoffen zählt auch die Vielzahl an Schichtverbunden, welche häufig als Stacks bezeichnet werden.

Die Eigenschaften etablierter Werkstoffe lassen sich darüber hinaus so variieren, dass hohe Leichtbaupotentiale abgeschöpft werden können. Ein Beispiel hierfür sind Schäume. Dabei wird ein Grundmaterial, wie Aluminium, Keramik oder Kunststoff durch Lufteinschlüsse aufgeschäumt. Hierdurch kommt es zu einem deutlichen Abfall der Dichte bei teilweise immer noch sehr hohen mechanischen Kennwerten. In Kombination mit dünnen Deckschichten aus teilweise auch unterschiedlichem Material entstehen so genannte Sandwichstrukturen. In Abbildung 2 sind unterschiedliche Materialkombinationen dargestellt.

Bei diesem Konzept nehmen die sehr steifen Deckschichten die entstehenden Kräfte durch Biegung auf, was den Einsatz von Kernmaterial mit deutlich geringerer Steifigkeit ermöglicht. Dieses muss lediglich eine ausreichende Schub- und Druckfestigkeit aufweisen. Zum Einsatz kommen hierfür vor allem Kunststoffschäume, Wabenstrukturen oder Wellbleche.

Weiterhin können Werkstoffe allein durch den Aufbau und die Formgebung zu Leichtbaustrukturen genutzt werden. Ein Beispiel hierzu wird in Abbildung 3 gezeigt. Durch die eingesetzten generativen Fertigungsverfahren können Strukturen aufgebaut werden, die bei geringer Dichte und geringem Materialeinsatz eine hohe Strukturfestigkeit erreichen.

Mit Hilfe innovativer Fertigungsverfahren, Wärmebehandlungsmethoden und Legierungsbestandteilen ist es auch gelungen, beim Werkstoff Stahl Leichtbaupotentiale zu generieren. Die unterschiedlichen Werkstoffe stehen damit in einem ständigen Wettbewerb hinsichtlich ihrer Eignung für Leichtbauapplikationen.

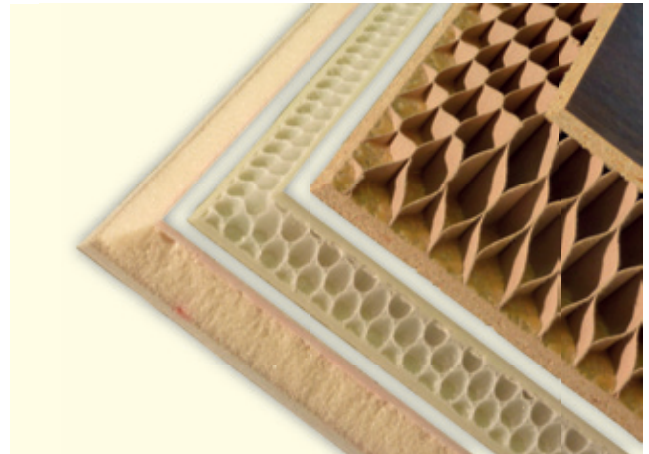


Abbildung 2: Sandwichstrukturen mit verschiedenen Kern- und Deckwerkstoffen. GFK-Deckschicht mit Kern aus Polyurethan-Schaum (unten), GFK-Deckschicht mit Wabenkern aus Polyethylen (mitte), Holzfaserverleimung mit Papierwabenkern (oben)⁴

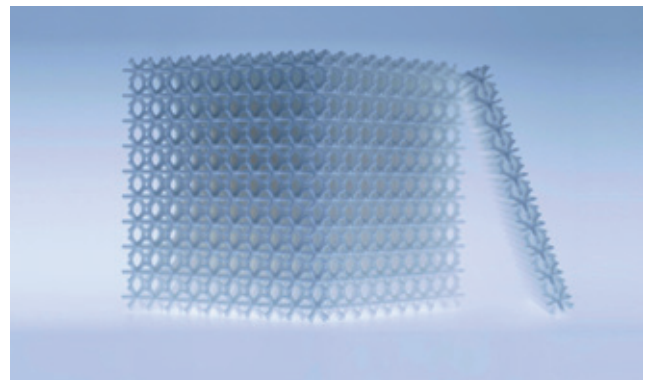


Abbildung 3: Leichtbau durch Formgebung und Werkstoff am Beispiel generativer Fertigung am Fraunhofer IPA⁴

Tabelle 1 gibt eine kurze Übersicht über die gängigen Leichtbauwerkstoffe und deren charakteristische Materialkennwerte. Da die Bandbreite einsetzbarer Werkstoffe in jeder Gruppe sehr groß ist, sind die angegebenen Daten lediglich als exemplarische Werte zu verstehen.

Werkstoff	E-Modul [GPa]	Zugfestigkeit [MPa]	Dichte [g/cm ³]	Spez. E-Modul [GPa/(g/cm ³)]	Spez. Zugfestigkeit [MPa/(g/cm ³)]
Stahl	210	500-1700	7,85	27	67-217
Aluminium-Legierung	69-72	100-540	2,70	27	37-200
Magnesium	45	240	1,70	27	141
Titan	105-117	290-740	4,50	26	64-164
CFK längs (45% Epoxid)	120	>1700	1,50	80	1130
CFK quer (45% Epoxid)	8	20-40	1,50	5	13-27
GFK längs (45% Epoxid)	40	800-1100	1,90	21	421-579
GFK quer (45% Epoxid)	12	20-50	1,90	6	10-26
C/SiC Keramik Verbund	90-100	350	2,10	48	167

Tabelle 1: Charakteristische Materialkennwerte unterschiedlicher Leichtbauwerkstoffe⁵⁶

1.2 HOCHFESTE STÄHLE

EIGENSCHAFTEN

Stähle verfügen im Vergleich zu anderen Leichtbauwerkstoffen über eine sehr hohe Dichte, was sie auf den ersten Blick nicht zu einer Option für Leichtbauanwendungen macht. Jedoch besitzen moderne hochfeste Stähle Festigkeitswerte von über 1400 MPa, wodurch ein vergleichsweise geringer Materialbedarf auch in höchst belasteten Bereichen ermöglicht wird. Ein typisches Beispiel sind die in Abbildung 4 dargestellten Längsträger im Pkw-Bereich⁷.

Diese hohen Festigkeiten werden durch gezielte Zusammensetzung der Legierungsbestandteile und Nachbehandlung der Stähle erreicht. Im Allgemeinen ist jedoch zu beachten, dass sehr hohe Festigkeiten bei einer späteren Umformung Nachteile mit sich bringen.

Durch die hohe Festigkeit ist das Material vor allem für Bereiche interessant, welche sehr hohen Belastungen ausgesetzt sind, wie etwa die B-Säule eines Pkw im Falle eines Aufpralls. Durch die hohe Festigkeit entsteht ein relativ geringer Materialeinsatz, der unter gewissen Randbedingungen eine filigranere Struktur ermöglicht als beispielsweise eine Realisierung in Aluminium.

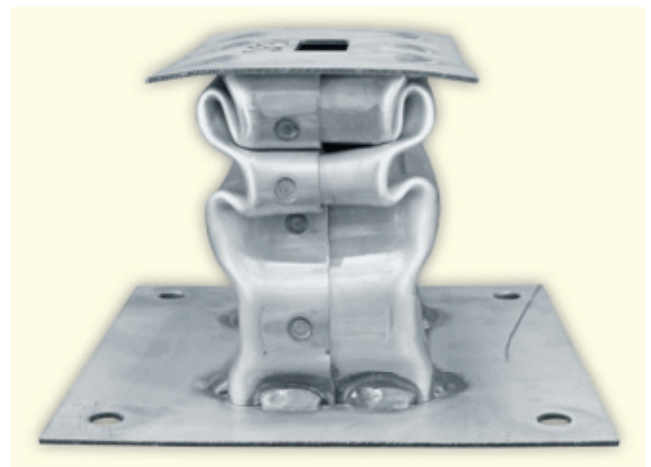


Abbildung 4: Längsträger aus modernen Stahlvarianten für den Leichtbau im Fahrzeug, oben vor und unten nach einem Crashtest⁷

Kapitel 1

Großer Vorteil beim Einsatz von Stahl ist der höhere technologische Reifegrad bei Fügeverfahren, Simulationsmöglichkeiten und in der Herstellung der Bauteile. Ansätze in der Verwendung von Stahl wie Sandwichstrukturen oder Tailored Blanks steigern das Leichtbaupotential des Werkstoffes weiter. Bei Tailored Blanks wird durch die Herstellung von Tiefziehteilen mit unterschiedlichen Stählen und Materialstärken eine exaktere Anpassung an die jeweilige Belastung ermöglicht.

BEARBEITUNG

Vergleichbar mit der Umformung stellen die hochfesten Stahlvarianten auch neue Anforderungen an die spanende Bearbeitung. Durch die hohe Festigkeit des Werkstoffes entstehen deutlich höhere Kräfte, welche wiederum einen höheren Werkzeugverschleiß zur Folge haben. Um eine wirtschaftliche Bearbeitung dieser Werkstoffe zu ermöglichen, bedarf es der Entwicklung neuartiger Schneidwerkstoffe und zweckmäßiger Beschichtungen für diese.

1.3 LEICHTMETALLE

1.3.1 ALUMINIUM UND ALUMINIUMLEGIERUNGEN

EIGENSCHAFTEN

Aluminium besitzt bereits seit vielen Jahren im Bereich des Leichtbaus einen sehr hohen Stellenwert. Eine Ursache hierfür ist, abgesehen von den spezifischen Eigenschaften, auch die vergleichsweise einfache Substitution von Stahl durch diesen Werkstoff. Grund ist die höhere Vergleichbarkeit der Fertigungsverfahren, Fügeverfahren und Werkstoffeigenschaften. Die Substitution durch faserverstärkte Kunststoffe ist aufgrund der grundsätzlich unterschiedlichen Eigenschaften wie Anisotropie oder Inhomogenität dagegen deutlich aufwendiger.

Weitere sehr positive Eigenschaften von Aluminium sind seine gute Korrosionsbeständigkeit und die hohe Wärmeleitfähigkeit. Am Markt existiert innerhalb der grundsätzlichen Varianten der Guss- und Knetlegierungen eine große Anzahl an Legierungstypen, welche durch mannigfaltige Zusammensetzungen oder Aushärteverfahren für die unterschiedlichsten Einsatzgebiete geeignet sind. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, Aluminium als

Schaum auszubilden, Abbildung 5 zeigt einen solchen Werkstoff. Dadurch ist eine weitere Absenkung der Dichte möglich.

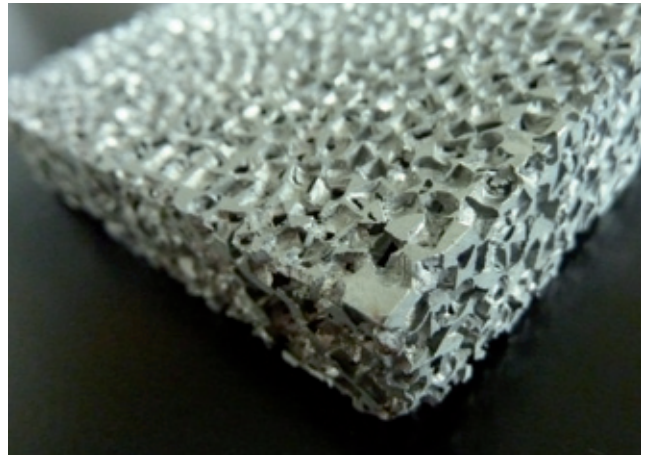


Abbildung 5: Aluminiumschaum ohne Deckschicht⁴

BEARBEITUNG

Im Gegensatz zu Stahl oder bestimmten faserverstärkten Kunststoffen stellt Aluminium eher geringe Herausforderungen an den Zerspanprozess. Bei der Bearbeitung werden vergleichsweise geringe Schnittkräfte erreicht, der Werkzeugverschleiß ist gering und hohe Oberflächengüten können realisiert werden. Hierbei werden für Guss- und Knetlegierungen unterschiedliche Werkzeuge verwendet, da die Anforderungen bei den häufig leicht inhomogeneren Gusslegierungen höher sind. Dieser Sachverhalt wird im anschließenden Kapitel ausführlich beschrieben. Aus Sicht der Fertigungstechnologie ist die Aluminiumzerspanung leicht zu handhaben. Die spanende Formgebung ist einfach, so dass komplexe Bauteilgeometrien auch ohne aufwendige Fertigungsmittel herstellbar sind. Abbildung 6 zeigt ein typisches Bauteil aus Aluminium, das mittels Dreh-, Fräs- und Bohrprozessen bearbeitet wurde.



Abbildung 6: Mittels spanender Verfahren gefertigtes, komplexes Werkstück aus Aluminium⁴

1.3.2 MAGNESIUM UND MAGNESIUMLEGIERUNGEN

EIGENSCHAFTEN

Bei Magnesium handelt es sich um das Leichtbaumetall mit der niedrigsten Dichte wie auch dem geringsten Schmelzpunkt. Seine Dichte liegt bei $1,74 \text{ g/cm}^3$, einem Viertel derjenigen von Stahl. Damit liegt die Dichte noch 35 % unter der von Aluminium⁵.

Aufgrund der hervorragenden Gusseigenschaften findet Magnesium vor allem Anwendung als Gusslegierung, wobei auch der Einsatz als Blech vermehrt in den Mittelpunkt des Interesses rückt, da sich dadurch die Vorteile der Blechverarbeitung und -bearbeitung mit denen des Werkstoffs Magnesium kombinieren lassen. Zwei große Herausforderungen bei der Verwendung von Magnesium sind dessen geringer Korrosionswiderstand und die relativ hohen Materialkosten. Positiv wirken sich die nahezu unbegrenzte Verfügbarkeit des Werkstoffes und das sehr hohe Recyclingpotential aus.

BEARBEITUNG

Die spanende Bearbeitung von Magnesium zeichnet sich durch niedrige Zerspankräfte aus. Die Folge ist ein geringer Verschleiß der Werkzeuge, woraus sich hohe Standzeiten ableiten. Im Vergleich zur Bearbeitung von Aluminium sind die Werkzeugstandzeiten bei Magnesium um mindestens den Faktor 5 höher⁸. Als kritisch im Zusammenhang mit der Magnesiumzerspannung ist die Gefahr einer Entzündung der während des Bearbeitungsprozesses entstehenden Späne und Stäube zu beurteilen.

1.3.1 TITAN

Die mechanischen Eigenschaften von Titan und dessen Legierungen können in Abhängigkeit der unterschiedlichen Zusammensetzungen der Legierungsbestandteile und Nachbehandlungsverfahren stark variieren. Die großen Vorteile von Titanlegierungen gegenüber anderen Metallen liegen jedoch nicht in den mechanischen Eigenschaften, sondern vor allem im hohen Schmelzpunkt, der sehr guten Korrosionsbeständigkeit und der Biokompatibilität begründet. Die hohe Biokompatibilität macht viele Anwendungen im Bereich der Medizintechnik möglich, während der hohe Schmelzpunkt hingegen einen Einsatz in Flugzeugtriebwerken und Abgasanlagen zulässt.

BEARBEITUNG

Für die Bearbeitung von Titan spielt vor allem die schlechte Wärmeleitfähigkeit eine große Rolle, welche einen Abtransport der entstehenden Wärme erschwert. Die Kombination von hohen Temperaturen und hoher Festigkeit des Materials stellt für die Bearbeitung eine Herausforderung dar, da sich hierdurch ein hoher Werkzeugverschleiß einstellt.

1.4 KERAMIKEN UND FASERVERSTÄRKTE KERAMIKEN

Grundsätzlich verfügen keramische Werkstoffe aufgrund hoher Festigkeit und geringer Dichte über sehr gute spezifische Eigenschaften hinsichtlich ihrer Druckfestigkeit und ihres Elastizitätsmoduls. Zu beachten ist bei ihrer Verwendung jedoch ihre geringe Bruchzähigkeit.



Abbildung 7: Beispiele für keramische Bauteile. Erodirtes Zahnrad (oben) und drahtgeschnittener Schneidstempel aus DIMACER® (ZTA-TiC) (unten)⁹

Kapitel 1

Aus diesem Grund sind für viele Anwendungen so genannte faserverstärkte Keramiken eine Alternative. Bei dieser Art des Faserverbundwerkstoffs besteht die Aufgabe der Fasern nicht darin, die Festigkeit des Werkstoffes zu erhöhen. Vielmehr steht die Steigerung der Bruchzähigkeit im Vordergrund. Durch den Einsatz der Fasern werden auch eine höhere Zuverlässigkeit und eine verbesserte Schadenstoleranz erreicht. Als Fasermaterialien kommen Kohlenstofffasern, metallische oder keramische Fasern zum Einsatz. Interessant sind diese Werkstoffe vor allem für Anwendungen bei über 1000°C, da dort kein anderer Leichtbauwerkstoff eine wirkliche Alternative darstellt. Wichtige technische Keramiken sind Aluminiumoxid, Zirkonoxid, Siliziumnitrid und Siliziumcarbid. Unterschieden wird hierbei in Oxide und Nichtoxide, wobei Oxide in der Regel über geringere mechanische Eigenschaften hinsichtlich E-Modul oder Zugfestigkeit verfügen, jedoch oxidationsbeständiger sind. Anwendungsgebiete für diesen Werkstofftyp finden sich vor allem im Bereich der Raumfahrt, bei Turbinenbauteilen oder hochwertigen Bremssystemen.⁵

BEARBEITUNG

Die spanende Bearbeitung von Keramiken ist auf Grund der hohen Härte der Werkstoffe sehr schwierig. Wenn spanend bearbeitet wird, dann meist mit Verfahren mit geometrisch unbestimmten Schneiden, wie Schleifen, Läppen oder Polieren. Weitere Bearbeitungsmöglichkeiten liegen in strahlenden Verfahren oder dem Erodieren.

1.5 KOHLENSTOFFFASERVERSTÄRKT KUNSTSTOFFE

EIGENSCHAFTEN

Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe sind typische Vertreter der Faserverbundwerkstoffe. Hierbei wird eine Kombination von Kohlenstofffasern und einer Kunststoffmatrix realisiert.

Kohlenstofffasern besitzen sowohl eine Zugfestigkeit als auch eine Steifigkeit, die sogar die von Stahl deutlich übertreffen und dies bei einer vergleichsweise geringen Dichte.⁶

Diese Eigenschaften lassen sich jedoch nur als Verbund mit einem Matrixmaterial ausschöpfen. Die Matrix übernimmt hierbei die Fixierung der Fasern, den Schutz und die Übertragung der Kräfte

zwischen den einzelnen Fasern. Typische Matrixwerkstoffe sind Epoxidharze und Vinylharze aus der Gruppe der Duroplaste sowie Polyamid und Polypropylen aus der Gruppe der Thermoplaste.

Im Gegensatz zu vielen anderen Werkstoffen wie Metallen sind die Eigenschaften von Faserverbundwerkstoffen anisotrop. Sie weisen also in Faserrichtung deutlich höhere mechanische Kennwerte auf, als parallel zur Faser. Aus diesem Grund entstehen für heutige Anwendungen so genannte Lamine, welche aus mehreren unterschiedlich orientierten Einzelschichten aufgebaut sind und so eine genaue Anpassung an die jeweiligen Anforderungen und Belastungskollektive ermöglichen.

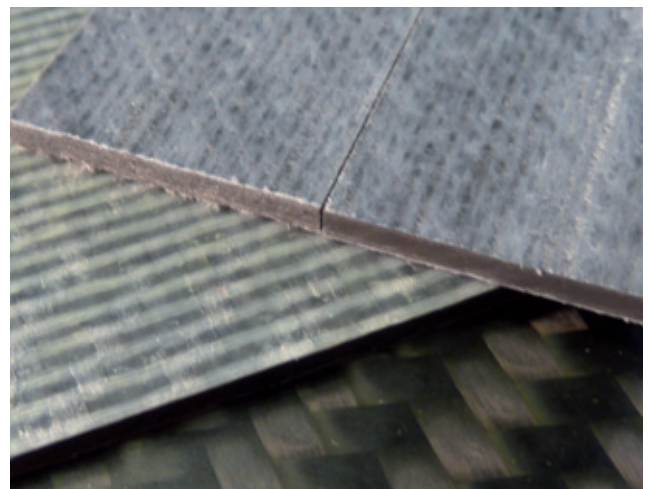


Abbildung 8: Unterschiedliche Lamine aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff, teils mit GFK-Deckschichten⁴

Im Vergleich zu Metallen besitzen CFK-Werkstoffe eine eher begrenzte Temperaturbeständigkeit. Grund hierfür ist das Erweichen bzw. Zersetzen der Kunststoffmatrix. Positiv hingegen sind abgesehen von den mechanischen Eigenschaften das hohe Energieaufnahmevermögen im Crashfall, die geringe Wärmeausdehnung und die guten Dämpfungseigenschaften des Materials.

Im Gegensatz zu vielen anderen Verstärkungsfasern sind Kohlenstofffasern elektrische Leiter, wodurch es bei der zerspannenden Bearbeitung derartiger Materialien zu Schäden an elektrischen Geräten wie Schaltschränken der Werkzeugmaschinen kommen kann, wenn diese nicht gegen das Eintreten der entstehenden

Stäube geschützt sind. Eine detaillierte Übersicht der Gefährdungspotentiale bei der zerspanenden Bearbeitung wird im Kapitel Sicherheit gegeben.

Heutzutage kommen teilweise sehr unterschiedliche Typen an Kohlenstofffasern wie auch sehr unterschiedliche Matrixsysteme zum Einsatz. Dies hat zur Folge, dass sich deutlich unterschiedliche Anwendungsmöglichkeiten ergeben.

Anwendung von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen sind vor allem Fahrzeugkomponenten in Kleinserie, Windkraftanlagen, Sportgeräte und Baugruppen der Luftfahrtindustrie.

BEARBEITUNG

Die zerspanende Bearbeitung von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen unterscheidet sich deutlich von der Zerspanung metallischer Werkstoffe. Ein Grund hierfür ist die Inhomogenität des Werkstoffes bzw. die deutlich unterschiedlichen Eigenschaften von Faser und Matrix. Zusätzlich ist die Faser sehr abrasiv, wodurch ein hoher Werkzeugverschleiß entsteht.

Ein weiterer Faktor ist die durch die Fasern gegebene Anisotropie des Werkstoffes, welche je nach Ausrichtung der Fasern völlig unterschiedliche Versagensmechanismen in der Bearbeitung hervorruft. Die Folge sind neue Schadensbilder durch eine nicht optimale Zerspanung, wie ein lokales Ausbrechen einzelner Bereiche, Auftrennen der einzelnen Schichten des Laminats (Delamination) oder das Zurückbleiben von Faserüberhängen.

Diese Bearbeitungsfehler werden außerdem noch durch das eingesetzte Matrixmaterial, die Faserlänge bzw. Fasertyp und den Aufbau des Laminats beeinflusst und variiert. Ein weiterer Faktor, der die Bearbeitung dieser Werkstoffe erschwert, ist die Kombination aus der Temperaturempfindlichkeit und schlechten Wärmeleitfähigkeit der Kunststoffmatrix.

Die Anforderungen und Problemstellung bei der Bearbeitung von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen bzw. allgemein bei Faserverbundwerkstoffen unterscheiden sich also deutlich von denen, die an die Bearbeitung von metallischen Werkstoffen gestellt werden.

1.6 GLASFASERVERSTÄRKT KUNSTSTOFFE

EIGENSCHAFTEN

Kunststoffe mit Glasfasern als Verstärkungsfasern stellen über 90% des Gesamtmarktes der faserverstärkten Kunststoffe dar. Trotz der im Vergleich zu kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen deutlich geringeren mechanischen Belastbarkeit sind derartige Werkstoffe aufgrund der deutlich geringeren Preise für die Glasfasern in vielen Anwendungen vertreten.¹⁰

Ein weiterer Unterschied zu kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen ist die überwiegende Verwendung von diskontinuierlichen Glasfasern also von Kurz- oder Langglasfasern im Gegensatz zur Endlosfaserverstärkung der CFK-Produkte. Zwar entstehen durch die Verwendung von langen oder endlosen Fasern deutlich bessere mechanische Eigenschaften, jedoch sind sie zum heutigen Zeitpunkt auch mit einem deutlich höheren Aufwand in der Produktion der Bauteile verbunden. Anwendung finden glasfaserverstärkte Kunststoffe überall dort, wo die mechanischen Eigenschaften von reinen Kunststoffen nicht ausreichen und dennoch hohe Gestaltungsfreiheit wie auch Beständigkeit benötigt werden. Typische Beispiele finden sich im Automobilbau, in der Bauindustrie oder im Bootsbau.

BEARBEITUNG

Die Problemstellungen für die Bearbeitung von glasfaserverstärkten Kunststoffen unterscheiden sich gegenüber denjenigen bei kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen nur geringfügig. Im Gegensatz zu kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen spielt bei glasfaserverstärkten Kunststoffen die Bearbeitung von langfaser- und kurzfaserverstärktem Material eine größere Rolle.

In der Regel korreliert die Bearbeitbarkeit eines GFK-Werkstoffes mit der Länge der Fasern. Mit längeren Fasern wird die Bearbeitung komplexer. Grund hierfür ist die geringere Gefahr eines lokalen Ausbrechens oder des Entstehens von Faserüberhängen bei kurzen Faserlängen. Da diskontinuierliche Fasern nur in sehr wenigen Fällen als Laminat aufgebaut sind, spielt die Delamination bei GFK-Werkstoffen eine geringere Rolle.

Kapitel 1

1.7 SCHICHTVERBUNDE

Typische Vertreter der Schichtverbunde sind CFK-Aluminium-Stacks oder CFK-Titan-Stacks. Hierbei besteht der Werkstoff aus einzelnen Schichten der jeweiligen Bestandteile. Durch eine derartige Anordnung der Werkstoffe wird häufig eine für die jeweilige Anwendung optimale Kombination der Eigenschaften erreicht.

Bei der spanenden Bearbeitung von Schichtverbunden ist die Anpassung des Werkzeugs ein grundsätzlicher Kompromiss zwischen den optimalen Bearbeitungsergebnissen der jeweiligen Bestandteile. In diesem Zusammenhang sind besonders Verbunde mit mehr als 2 unterschiedlichen Werkstoffen oder sehr unterschiedlichen Eigenschaften als kritisch einzustufen. Ähnlich wie bei der Bearbeitung von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen besteht bei Schichtverbunden stets die Gefahr der Delamination der einzelnen Schichten.

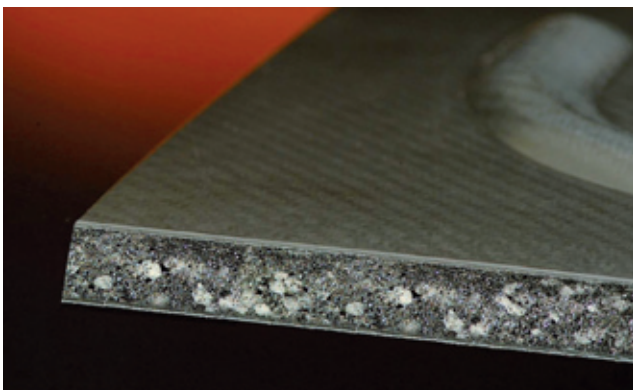
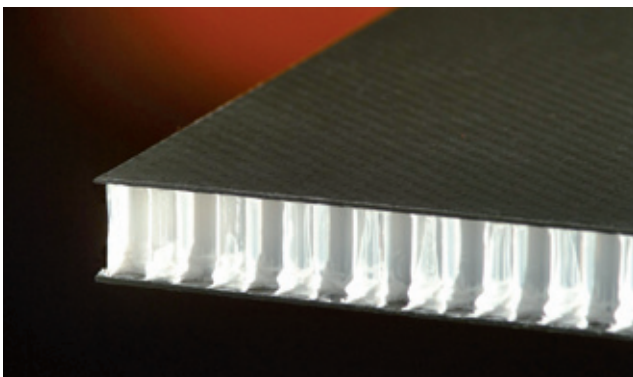


Abbildung 9: Beispiele für Sandwichmaterialien aus faserverstärkten Deckschichten mit Schaum- bzw. Wabenstruktur¹¹

Bei GLARE (Glass Laminate Aluminium Reinforced Epoxy) handelt es sich um eine spezielle Form der Schichtverbunde. GLARE stellen einen Hybridwerkstoff dar, der abwechselnd aus dünnen Schichten Aluminium und glasfaserverstärktem Kunststoff besteht. Diese werden unter Einwirkung von Druck miteinander verklebt. Im Vergleich zum Einsatz von Aluminium allein sind es vor allem die verlangsamte Rissausbreitung wie auch das bessere Durchschlagsverhalten, die den Einsatz im Flugzeugbau interessant machen. Bei der Bearbeitung von GLARE besteht, ähnlich wie bei allen Schichtverbunden, die Gefahr der Delamination der einzelnen Schichten. Hierbei kann es vor allem beim Bohren zu einem Eindringen der Späne zwischen den einzelnen Schichten kommen, was es zu verhindern gilt.

1.8 HOLZ UND ANDERE REGENERATIVE WERKSTOFFE

Neben der Thematik „Leichtbau“ ist in den letzten Jahren die Nachhaltigkeit von Produktionsprozessen und Werkstoffen immer mehr in den Mittelpunkt des Interesses gerückt. Heutige Kunststoffe werden überwiegend aus fossilen Energieträgern gewonnen und sind damit nur sehr eingeschränkt recycelbar. So genannte Biokunststoffe werden zumindest teilweise aus nachwachsenden Agrarprodukten, wie Mais oder Soja gewonnen, aber auch aus Lebensmittelresten, Holz oder Holzabfällen. Zusätzlich sind viele dieser Kunststoffe biologisch abbaubar. Im Bereich der Verstärkungsfasern existieren unterschiedliche Naturfasern wie Flachs oder Hanf, welche in vielen Anwendungen eine Alternative zu konventionellen Fasern aus Glas oder Kohlenstoff bieten, wobei die Forschung ebenso wie die Umsetzung in diesem Bereich noch nicht sehr weit fortgeschritten ist.

Ein Werkstoff mit hohem Leichtbaupotential und hoher Nachhaltigkeit ist Holz. Typische Leichtbau-Ansätze für Holz sind Sandwichplatten mit Wabenstruktur oder Strukturen mit Schäumen als Kernmaterial. Anwendungen von Holz in Bezug auf das Thema Leichtbau sind vor allem in der Bau- und Möbelindustrie zu finden. Bei Holz handelt es sich von Natur aus um einen Faserverbundwerkstoff, der genau wie verstärkte Kunststoffe sowohl starke Inhomogenität als auch anisotrope Werkstoffeigenschaften besitzt. Aus diesen Gründen sind auch die Eigenschaften hinsichtlich der spanenden Bearbeitung bzw. die hier auftretenden Probleme grundsätzlich sehr ähnlich zu denjenigen bei der spanenden Bear-

beutung von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen und glasfaserverstärkten Kunststoffen. Entgegen der landläufigen Meinung können Holzwerkstoffe bei richtigem Einsatz sehr hoch belastet werden. Zwei Beispiele sind in den Abbildung 10 und Abbildung 11 dargestellt. Abbildung 10 zeigt das Bruchverhalten eines Zugstabes aus massivem Buchenholz. Der kleine Holzquerschnitt von 6 mm auf 20 mm konnte eine Zuglast entsprechend einem Gewicht von über 1 t ertragen. Dementsprechend können Holzwerkstoffe auch für leichte tragende Konstruktionen eingesetzt werden. Abbildung 11 zeigt ein am Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren der Universität Stuttgart entworfenes und umgesetztes 10 x 10 Meter überspannendes adaptives Schalentragwerk aus Massivholz. Lediglich 4 Lagen Holz zu je 1 cm Dicke bilden die Schalenkonstruktion.

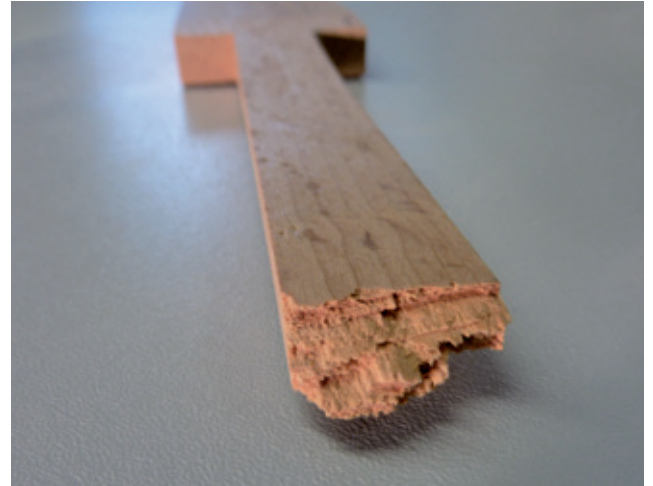


Abbildung 10: Schadensbild an einer massiven Buchenholzprobe mit Querschnitt 6 mm x 20 mm nach einer Zugbelastung von 1200 kg⁴



Abbildung 11: Beispiel für moderne Architektur mit dem Werkstoff Holz: Dachfläche von 10 Metern Spannweite bei nur 4 cm Materialstärke¹²

Kapitel 2

WERKZEUGE UND BEARBEITUNGSPROZESSE

2.1 HOCHFESTE STÄHLE

Zu den Leichtbauwerkstoffen zählen auch hochfeste Stähle. Wegen ihrer höheren Festigkeit lassen sich Bauteile aus hochfesten Stählen im Vergleich zur Verwendung von gewöhnlichen Stählen leichter ausführen. Die Zerspanbarkeit wird sowohl vom Kohlenstoffgehalt, den weiteren Legierungsanteilen als auch von der erfolgten Wärmebehandlungen wie Härten oder Vergüten beeinflusst. Prinzipiell unterscheidet sich der Zerspanungsprozess hochfester Stähle aber nicht von dem unlegierter oder niedriglegierter Stähle. Lediglich die Prozessparameter wie z.B. Schnittgrößen oder Kühlschmierstoff sind an die komplexeren Zerspanbedingungen anzupassen. Auf die Zerspanung von Stahlwerkstoffen und den anderen Nichteisenmetallen wird im Rahmen dieses Leitfadens jedoch nicht näher eingegangen, da dieses Wissen Stand der industriellen Technik und vielerorts veröffentlicht ist.

2.2 LEICHTMETALLE

2.2.1 ALUMINIUM

Aluminium gehört mit zu den am besten spanend bearbeitbaren Metallen. Ist die Werkzeugschneide scharf, sind die Schnittkräfte niedrig und die Zerspanung unproblematisch. Die gute Wärmeleitfähigkeit sorgt für eine schnelle Abführung der Prozesswärme. Die Werkzeuge können aus beschichtetem und unbeschichtetem Hartmetall sein. Aber auch mit gewöhnlichem Schnellarbeitsstahl HSS können gute Zerspanergebnisse erzielt werden. Lediglich der Einsatz von siliciumbasierten Schneidstoffen ist wegen der Löslichkeit von Silicium in Aluminium nicht zu empfehlen. Bei der Aluminium-Zerspanung neigen die Schneiden dazu sich zuzusetzen, wenn Schnittgeschwindigkeit oder Temperatur zu hoch werden. Außerdem führt eine höhere Prozesswärme zu einer höheren Gratbildung.⁵

2.2.2 MAGNESIUM

Auch Magnesium zählt zu den Leichtmetallen, die sehr leicht zu spanen sind. Hohe mögliche Schnittgeschwindigkeiten und geringer Werkzeugverschleiß zeichnen die Magnesiumzerspanung aus. Die Standzeit kann um das 10fache länger sein als bei vergleichbarer Aluminiumzerspanung. Besondere Aufmerksamkeit

bedarf bei der Magnesiumzerspanung die Explosionsgefahr, die aus der hohen Reaktivität der Späne und Stäube mit Wasser resultiert. Werkzeuge zur Magnesiumbearbeitung werden scharf ausgeführt und haben eine hohe thermische Leitfähigkeit. Zur Reibungsminimierung können Beschichtungen zum Einsatz kommen. Die Bildung von Aufbauschneiden beeinträchtigt den Zerspanprozess negativ. Dies tritt jedoch nur bei der Trockenbearbeitung auf und kann durch entsprechenden Kühlschmierstoffeinsatz vermieden werden.⁵

2.2.3 TITAN

Titanlegierungen gehören wegen ihrer hohen Festigkeit und geringen Wärmeleitfähigkeit zu den schwer zerspanbaren Leichtbauwerkstoffen. Die schlechte Abführung der Prozesswärme, die bei der Zerspanung entsteht, führt zusammen mit der hohen Zugfestigkeit dazu, dass die Werkzeuge thermisch und mechanisch stark beansprucht werden und dadurch einem hohen Verschleiß unterliegen. Außerdem besteht durch adhäsive Effekte zwischen der Titanlegierung und dem Werkzeugwerkstoff die Gefahr der Bildung von Aufbauschneiden. Die Folgen sind Ausbrüche und eine Verkürzung der Standzeit des Werkzeugs. Beim bearbeiteten Werkstück nimmt dabei die Oberflächenqualität ab. Ideale Werkzeuge zur Titanzerspanung zeichnen sich sowohl durch eine hohe Härte und als auch durch eine hohe thermische Beständigkeit aus. Unbeschichtete Hartmetallwerkzeuge können zum Einsatz kommen, wenn die Schnittgeschwindigkeit niedrig gehalten und eine ausreichende Kühlung gewährleistet wird. Durch eine Bohrung im Werkzeug kann Kühlmittel direkt der Zerspanungsstelle zugeführt und damit die Prozesstemperatur niedrig gehalten werden. Auch Schneidstoffe aus beschichtetem Hartmetall, kubischem Bornitrid (CBN) und polykristallinem Diamant sind verbreitet. Diese können auch zur Trockenbearbeitung verwendet werden, wenn die Zerspanparameter Schnittgeschwindigkeit, Vorschub und Schnitttiefe niedrig gehalten werden.⁵

2.3 KERAMIKEN

Bei technischen Keramiken im Zusammenhang mit der Zerspanung ist zunächst die sogenannte Grünbearbeitung zu nennen. Hierbei kann die Keramik direkt nach der Formgebung mit geometrisch bestimmten Schneiden zerspannt werden. Um das Werkstück

nicht zu schädigen, ist mit einer scharfen Schneide und hoher Schnittgeschwindigkeit zu bearbeiten⁵. Ausgehärtete Keramiken werden aufgrund ihrer hohen Härte meist nur mit geometrisch unbestimmten Schneiden bearbeitet. Dazu gehören Verfahren wie Schleifen, wobei die Schleifkörner in einem Festkörper gebunden sind oder Läppen und Polieren, wobei die Körner lose vorliegen und zusammen mit einem Gegenkörper zum Materialabtrag an der Keramik führen. Als Abrasivum in den Schleif- und Läppmitteln wird meist Diamant verwendet.

2.4 FASERVERSTÄRKTE KUNSTSTOFFE

Bauteile aus faserverstärkten Kunststoffen werden möglichst endkonturnah hergestellt. Das spanend zu bearbeitende Volumen fällt dementsprechend klein aus. Der Zerspanvorgang beschränkt sich meist auf Entgraten, Besäumen, Bearbeiten von Kanten und Herstellen von Aussparungen und Bohrungen. Durch die unterschiedlichen thermischen und mechanischen Eigenschaften von Fasern und Matrix im Verbundwerkstoff ergeben sich bei der Bearbeitung besondere Herausforderungen, die aus der Zerspanung homogener Metallwerkstoffe nicht bekannt sind. So sind bei den faserverstärkten Kunststoffen nicht nur Oberflächenrauheit, Maß- und Formhaltigkeit Qualitätskriterien, sondern auch Schädigungen am Bauteil: Absplitterungen, Ausfransungen und Delamination führen zu kostenintensiven Nacharbeiten und nicht selten zum Ausschuss des Werkstücks. Abbildung 12 zeigt verschiedene Schädigungsmechanismen an einem spanend bearbeiteten Werkstück aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff.



Abbildung 12: Schädigungsmechanismen und -bilder bei der Zerspanung von CFK-Werkstoffen¹³

2.4.1 WERKZEUGE

Bei der mechanischen Bearbeitung von faserverstärkten Kunststoffen unterliegen die Werkzeuge einem hohen Verschleiß. Die hohe Härte der Fasern wirkt stark abrasiv und führt zur Verrundung der Schneide. Die erforderliche Werkzeugschärfe für eine qualitativ hochwertige Zerspanung ist dann nicht mehr gegeben. Für den verschleißoptimierten Einsatz in der Zerspanung von faserverstärkten Kunststoffen kommen deshalb meist zwei Werkzeugtypen infrage: mit polykristallinen Diamanten (PKD) bestückte Werkzeuge und diamantbeschichtete Hartmetallwerkzeuge. Beide Arten sind sehr hart und bieten hinreichend Widerstand gegen Abrasion. Mit unbeschichteten Werkzeugen können zwar aufgrund der schärferen Schneiden zunächst sogar qualitativ bessere Ergebnisse erzielt werden, jedoch nimmt die Bearbeitungsqualität wegen des starken Verschleißes schnell ab.

Hinweis

FVK mit verschleißresistenten Werkzeugen bearbeiten (PKD oder beschichtetes Hartmetall).

Sehr gute Qualitäten werden auch mit unbeschichteten, scharfen Werkzeugen erreicht; diese verschleifen allerdings schneller.

Polykristalliner Diamant als Schneidstoff hat eine lange Standzeit und ermöglicht hohe Schnitt- und Vorschubgeschwindigkeiten. Jedoch sind diese Schneidstoffe aufgrund der schwierigen Herstellung sehr teuer und erlauben nur relativ einfache Werkzeuggeometrien. Komplexere Geometrien lassen sich mit diamantbeschichteten Hartmetallwerkzeugen realisieren, welche auch in den Anschaffungskosten günstiger sind.

2.4.3 FRÄSEN

Fräsverfahren unterscheiden sich je nach Orientierung von Werkzeugdrehrichtung und Vorschubrichtung in Gleichlaufräsen und Gegenlaufräsen. Für die Bearbeitung von faserverstärkten Kunststoffen, wie CFK, ist das Gegenlaufräsen wegen geringerer Oberflächenrauigkeiten, weniger Bauteilschädigungen und niedrigerer Temperaturen am besten geeignet. Verfahrensbedingt bildet sich beim Gegenlaufräsen ein Riss in Schnittrichtung und unter-

Kapitel 2

stützt damit die Materialentfernung. Hingegen bilden sich beim Gleichlaufräsen bauteilschädigende Risse senkrecht zur Oberfläche. Beim Gegenlauf kann die Schneidkante kurz abkühlen bevor sie auf die zu erzeugende Oberfläche trifft, beim Gleichlauf hingegen besitzt die Schneide an dieser Stelle die maximale Prozess-temperatur.¹⁴

Beim Fräsen spielt auch die Faserorientierung des Werkstücks eine wichtige Rolle. Verläuft der Schnitt parallel zur Faser wird das Bauteil interlaminar im Matrixwerkstoff getrennt und eine qualitativ hochwertige Oberfläche mit geringer Rauheit entsteht. Beim Schnitt senkrecht zur Faserrichtung muss jede Faser geschnitten werden. Höhere Schnittkräfte und Verschleiß sind die Folge. Außerdem kommt es zu faserparallelen, kleinen Rissen im Werkstück.

Zur Erzielung einer optimalen Bearbeitungsqualität mit geringen Oberflächenrauheiten ist die Zerspanung mit hohen Schnittgeschwindigkeiten und geringen Vorschüben üblich. Vorteilhaft bei höheren Schnittgeschwindigkeiten sind auch die geringeren Vorschub- und Passivkräfte. Begrenzender Faktor hierbei ist die entstehende Prozesswärme, die bei zu hoher Schnittgeschwindigkeit schädliche Werte für Werkstoff und Werkzeug annehmen kann.⁵

Hinweis

Bearbeiten im Gegenlauf

- *Schneiden werden besser gekühlt*
- *Späneflug von Bauteil weg gerichtet*
- *keine Rissbildung senkrecht zur Bauteiloberfläche*

Unterschiedliche Typen von Fräs Werkzeugen stehen für die Bearbeitung von faserverstärkten Kunststoffe zur Verfügung. Die sogenannten Router sind Schafffräser mit einer pyramidenförmigen, vielzahnigen Schneidanordnung, wie in Abbildung 13 zu sehen. Die Kontur wird mithilfe von CNC-Schleifmaschinen erzeugt, indem in den Hartmetallkörper rechts- und linksdrehende Spiralnuten geschliffen werden¹⁵. Die entstehende Struktur mit der Vielzahl an pyramidenförmigen Schneiden reduziert die Prozesskräfte entlang der Werkzeugachse. Außerdem sind Vibrationen und resultierende Werkstückdurchbiegung geringer, so dass diese Werkzeuge auch bei weniger stabilen Bauteilen und Einspan-

nungsbedingungen verwendet werden können. Prinzipiell ist auch der Einsatz in handgeführten Maschinen möglich. Außerdem kann über die Tiefe der Spanräume die Spanabfuhr und damit einhergehend die Wärmeableitung beeinflusst werden. Durch das Aufbringen einer Beschichtung kann die Werkzeugstandzeit bis zum 10fachen verlängert und die Schnittgeschwindigkeit um etwa das 3fache erhöht werden.¹⁶



Abbildung 13: Composite Router⁴

Hinweis

Vielzahnige Router

- *geringe Prozesskräfte*
- *weniger Vibrationen*
- *für handgehaltene Fräsaggregate geeignet*
- *bei labiler Bauteilaufspannung besser geeignet*

Als Kompressionsfräser werden Werkzeuge bezeichnet, die mit gegenläufigen Drallrichtungen versehen sind, siehe Abbildung 14. Der Drall oder Neigungswinkel der Schneide an der Werkstückunterkante ist dem an der Werkstückoberkante entgegengerichtet, wodurch Druck und Gegendruck erzeugt werden. Dieser Druck auf die Oberfläche verringert das Risiko von Delamination der Deckschichten und senkt die Vibrationsneigung, da sich die Axialkräfte teilweise aufheben. Einschränkungen ergeben sich beim Bearbeiten weicher Werkstoffe und beim Vollnutfräsen, da die Spanabfuhr

nicht optimal stattfinden kann. Diese Werkzeuge werden meist aus Vollhartmetall hergestellt und meist beschichtet. Weit verbreitet ist die Beschichtung mit dem Hartstoff Aluminium-Titan-Nitrid (AlTiN), welcher mit Hilfe des sogenannten CVD-Verfahren (chemical vapour deposition) aufgebracht wird. Hierbei werden auf den erhitzten Werkzeugkörper gasförmige Stoffe abgeschieden, welche chemisch miteinander reagieren und auf dem Werkzeug eine gleichmäßige Beschichtung bilden¹⁷. Für noch höhere Standzeiten werden Diamantbeschichtungen eingesetzt.

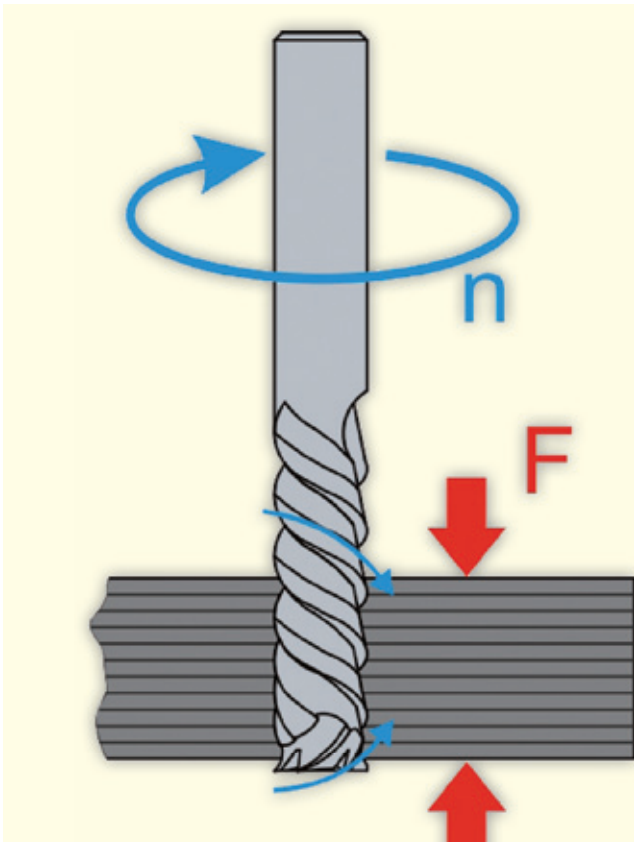


Abbildung 14: Kompressionsfräser und deren Funktionsprinzip⁴

Hoch widerstandsfähig gegen Abrasion sind Fräswerkzeuge mit Schneiden aus polykristallinem Diamant. Abbildung 15 zeigt einen solchen mit PKD-Schneiden bestückten, zweischneidigen Schaftfräser. Sie bieten deutlich höhere Standzeiten als beschichtete Hartmetallfräser. Allerdings unterliegen Werkzeuge mit eingelöteten PKD-Schneiden Einschränkungen beim Werkzeugdesign hinsichtlich Geometriegebung und Größe, insbesondere dem Durchmesser. Um ähnliche Werkzeugformen wie bei Hartmetallfräsern zu erreichen, können mittlerweile PKD-Werkzeuge hergestellt werden, bei denen die Diamantkristalle direkt auf dem Grundkörper aus Hartmetall abgeschieden werden¹⁸.

Hinweis

Kompressionsfräser

- optimal zum Besäumen von Werkstücken
- Vermeidung von Delamination der Deckschichten



Abbildung 15: Schaftfräser mit PKD-Schneiden⁴

Zu den Fräswerkzeugen gehören auch die sogenannten Schleifstifte. Zwar handelt es sich hierbei um Werkzeuge mit geometrisch unbestimmten Schneiden wie Schleif- oder Trennscheiben, jedoch werden sie ähnlich wie Schaftfräser eingesetzt und deshalb hier ebenfalls aufgeführt. Kleine Diamantpartikel werden auf dem Werkzeuggrundkörper aufgebracht, wobei die Verteilung zufällig oder angeordnet sein kann und die Härte einstellbar ist. Bei Schleifwerkzeugen bezieht sich die Härte darauf, wie fest die Körner eingebunden sind. Bei weichen Bindungen lösen sich die Schleifkörner schneller, so dass neue, scharfe Körner früher zum Einsatz kommen und das Werkzeug seine Schnithaltigkeit behält¹⁹. Geeignet ist diese Art von Werkzeugen für das Besäumen von GFK- oder CFK-Werkstoffen.¹⁵

Kapitel 2

In diesem Zuge sind auch Kreissägewerkzeuge zu erwähnen, da sich vom Grundsatz her die Verfahren Kreissägen und Umfangfräsen sehr ähnlich sind. Zwar kommt das Bearbeitungsverfahren Sägen selten zum Einsatz, jedoch kann es hocheffektiv eingesetzt werden, wenn geradlinige Schnitte erwünscht sind. Wegen ihrer Größe werden Sägeblätter in den meisten Fällen aus Werkzeugstahl oder HSS hergestellt, wobei lediglich die Schneiden aus eingelöteten Hartmetallplättchen bestehen. Bei Grundkörpern aus HSS werden die Verzahnungen meist direkt in den Grundkörper eingebracht. Heute bestehen auch Möglichkeiten, Kreissägeblätter mit komplexen PKD-Schneiden zu bestücken. Damit können hervorragende Qualitäten und hohe Standzeiten erreicht werden. Allerdings ist dieses hocheffektive Bearbeitungsverfahren mit sehr hohen erreichbaren Schnitt- und Vorschubgeschwindigkeiten nur bei geraden Schnitten einsetzbar.

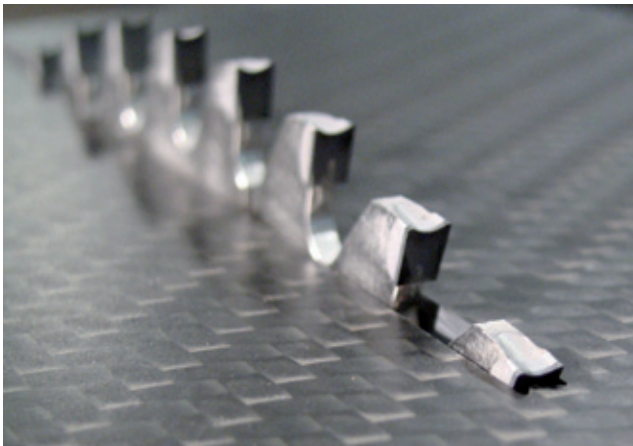


Abbildung 16: Kreissägen von CFK mit PKD-bestücktem Kreissägewerkzeug mit angepasster Schneidengeometrie⁴

2.4.3 BOHREN

Das Bohren ist auch im Bereich der faserverstärkten Kunststoffe eines der am häufigsten angewendeten Zerspanungsverfahren. Dabei stellt die Erzeugung von Nietbohrungen eine der Hauptanwendung des Bohrens bei der spanenden Bearbeitung von faserverstärkten Kunststoffen dar. Nietbohrungen kommen beispielsweise beim Fügen von Flugzeugbauteilen zum Einsatz. Gerade bei dieser Anwendung sind fehlerfreie Bohrlöcher erforderlich, da Ausschussbohrungen zu immensen Folgekosten bei den teu-

ren Bauteilen führen können. Eine direkte Nachbearbeitung des Werkstücks ist selten möglich. Unter Umständen müssen Hilfsmittel wie Übermaßbuchsen verwendet werden, die gerade im Luftfahrtsektor gesondert und einzeln von den zuständigen Behörden überprüft und genehmigt werden müssen²⁰.

Beim Bohren liegen die Fasern meist in der Werkstückebene. Sind die Fasern zudem gerichtet, kommt es zu Schnittkraftschwankungen während einer Werkzeugumdrehung. Besonders schadensanfällig sind die Decklagen. Sowohl am Bohrein- als auch am Austritt kann es zur Delamination der Deckschichten kommen. Beim Eindringen des Bohrers in die ersten Materialschichten kann es dazu kommen, dass am drehenden Bohrer Werkstückwerkstoff entlang der spiralförmigen Spannt nach oben gezogen wird.

Dieser Vorgang wird auch als Peel-Up-Delamination bezeichnet. Auf der Werkstückseite des Bohreraustritts kommt es zur Push-Out-Delamination. Die axiale Vorschubkraft des Werkzeugs kann größer sein als die innere Festigkeit des Werkstücks. Die für die Delamination verantwortliche Vorschubkraft entsteht zum Großteil an der Querschneide des Bohrers, da hier mit abnehmendem Radius die Schnittgeschwindigkeit immer weiter absinkt, so dass es nur noch zum Quetschen und Verdrängen, nicht aber mehr zum Spanen des Materials kommt. Durch Stufenbohrer, Bohrer mit facettierter Schneide oder Kernlochbohrer, oder durch entsprechende Anpassung der Prozessparameter in Abhängigkeit der Bohrtiefe kann die Vorschubkraft reduziert werden.

In Abbildung 17 ist ein Bohrer mit einer speziell für das Trennen von Fasern konzipierten Spitze dargestellt. Weitere Möglichkeiten zur Vermeidung der Push-Out-Delamination bestehen darin, den Vorschub kurz vor Austritt zu reduzieren oder das Werkstück mit Stützplatten auf der Austrittsseite zu verstärken. Eine gänzlich andere Möglichkeit ist die Erzeugung von Durchgangslöchern mittels Zirkularfräsen. Bei diesem Verfahren wird die axiale Vorschubbewegung des Fräswerkzeugs von einer kreisförmigen Bewegung überlagert, wodurch der Schnitt unterbrochen wird, was geringere Prozesskräfte und weniger Wärmeentwicklung zur Folge hat. Alternativ kann auch das sogenannte Taumelfräsen eingesetzt werden. Nach dem Durchdringen des Werkstücks wird das Werkzeug gekippt und Ober- und Unterseite in einer Taumelbewegung bearbeitet. Dadurch sind Schnitt- und Passivkraft ins Innere des Werkstücks gerichtet, wodurch geringere Schädigungen auftreten. Die Bearbeitungsqualität ist höher als beim Zirkularfräsen,

Hinweis

Bohren von Faserverbundwerkstoffen

- *angepasste Geometrie der Bohrerspitze*
- *Vorschub vor Austritt reduzieren*
- *Genaue Auswahl des Bohrwerkzeugs passend zu der Bearbeitungsaufgabe*

jedoch wird für eine derartige Bearbeitung eine aufwendige Fräsmaschine mit fünf Achsen benötigt.



Abbildung 17: Bohrer mit speziell für Faserverbundwerkstoffe geschliffener Spitze⁴

Eine besondere Herausforderung stellt das bereits erwähnte Nietbohren von Flugzeugteilen dar, da hier häufig Verbundmaterialien aus Leichtmetallen, Titan und kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen verwendet werden, sogenannte „Stacks“. Da die Materialien unterschiedliche Anforderungen an die Zerspanung stellen, muss hier ein Kompromiss gefunden werden. Die Leichtmetallspäne können die CFK-Schicht negativ beeinflussen. Aluminiumspäne können beispielsweise in die Bohrungsfläche des kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffs eingepresst werden. Titanspäne können verklemmen und zu starker Erwärmung und folglich zur CFK-Schädigung führen. Außerdem besteht die Möglichkeit, dass Titanspäne wie Zusatzschneiden wirken und die Maßhaltigkeit der Bohrung in der CFK-Schicht negativ beeinflussen. Um diese Probleme zu umgehen, werden Bohrungen in zwei Schritten erzeugt. Nach dem Vollbohren folgt ein zweiter Schritt mit dem Aufbohren und Senken. Jedoch wird heute versucht, dies möglichst in einem Vorgang durchzuführen. Spezielle Bohrwerkzeuge mit verschiedenen Bearbeitungsstufen machen diese sogenannte One-Shot-Bearbeitung möglich. Wie bei den Fräswerkzeugen kommen auch bei Bohrern Diamantbeschichtungen und PKD-Schneiden zur Standzeitverlängerung zum Einsatz.

Hinweis

Schaftfräser mit PKD-Schneiden

- *sehr hoher Verschleißwiderstand*
- *lange Standwege*

2.5 HOLZ UND HOLZWERKSTOFFE

Auch bei Holz und Holzwerkstoffen kommen die unterschiedlichsten Schneidstoffe zum Einsatz. Hochlegierte Werkzeug- und Schnellarbeitsstähle werden hauptsächlich in der Massivholzbearbeitung eingesetzt. Die hohe Zähigkeit dieser Werkstoffe erlaubt es, den Schneidkeil sehr schmal und damit die Schneide sehr scharf auszuführen. Nur so kann eine qualitativ hochwertige Oberfläche erzeugt werden. Durch stumpfe Schneiden kann es zur Stauchung und Zerstörung der Zellstruktur an der Holzoberfläche kommen, wodurch eine sichtbar schlechte Oberfläche entsteht. Hochwertige Oberflächen sind aus Gründen der Ästhetik, z.B. bei Möbeln, und der Folgebearbeitung wie Hochglanzlackierungen aber unabdingbar.

Hartmetallschneidstoffe finden wegen ihrer Verschleißfestigkeit vor allem dann Verwendung, wenn ein abrasiver Holzwerkstoff wie mitteldichte Faserplatte (MDF) zerspannt wird. Aufgrund ihrer höheren Standzeit werden sie aber auch in der Massivholzbearbeitung eingesetzt. Meist sind derartige Werkzeuge nicht aus Vollhartmetall, sondern bestehen aus einem Werkzeugstahl-Grundkörper, welcher mit Hartmetallschneiden bestückt wird. Eingesetzt werden diese Werkzeuge auch für Holzleichtbauwerkstoffe wie z.B. Sandwichplatten mit Wabenstruktur.

Schneidkeramiken sind in der Holzbearbeitung bisher kaum verbreitet. Diamantschneidstoffe, insbesondere PKD-Werkzeuge werden aufgrund ihrer Härte hauptsächlich bei stark verschleißenden Materialien verwendet. Zu diesen zählen beispielsweise Spanplatten oder Laminatfußböden mit hochharten Deckschichten.

Kapitel 2

2.6 KÜHLEN UND SCHMIEREN IN DER FVK-BEARBEITUNG

Die Verwendung von Kühl- und Schmiermitteln bei der Bearbeitung von faserverstärkten Kunststoffen kann die Bearbeitungsqualität verbessern und die Werkzeugstandzeit verlängern. Aus diesem Grund arbeiten einige Maschinen zur FVK-Bauteilherstellung nass, wobei der Großteil der Applikationen als Trockenbearbeitung durchgeführt wird. Ein Grund hierfür liegt unter Umständen an der Befürchtung der Zerspanbetriebe, dass die Verwendung von Kühlmitteln zur Quellung des Polymers oder zu einer chemischen Reaktion führen könnte. Chemische Reaktionen können eine Verschlechterung der Eigenschaften der Werkstoffe durch eine Schwächung der interlaminaeren Adhäsion verursachen²¹.

2.6.1 VORTEILE

Die Vorteile bei Verwendung eines Kühlmittels während der Bearbeitung sind verlängerte Standzeiten und eine unter Umständen verbesserte Bearbeitungsqualität. Hohe Temperaturen können schwerwiegende Auswirkungen sowohl auf das Werkzeug als auch auf das Werkstück haben. Bei hohen Temperaturen können Werkzeug-Beschichtungen ausfallen oder sich Partikel des Werkzeugs leichter ablösen.

Abbildung 18 zeigt am Beispiel einer fräsenden Bearbeitung die Temperaturverteilung an Werkstück und Werkzeug. Aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit von faserverstärkten Kunststoffen können während der Fräsbearbeitung sehr hohe Temperaturen an der Oberfläche entstehen.

Eine Studie zum Bohren von Glasfaser-Epoxid-Verbundwerkstoffen mit Hartmetallwerkzeugen zeigte einen Anstieg der Werkzeugverschleißmarkenbreite von ca. 300 % bei Trockenbearbeitung im Vergleich zur Zerspanung mit Kühlmittel²¹. Im Fall von diamantbeschichteten Werkzeugen können Temperaturen oberhalb 600°C zu einer Oxidation der Diamantoberfläche führen²².

Liegen hohe Temperaturen bei der Zerspanung vor, so kann es zu Schäden am Werkstück kommen. Folgen von zu hohen Temperaturen beim Zerspanprozess können die Degeneration der gesamten Matrix, die Verkohlung der duroplastischen Matrix und bei Kohlenstofffasern das Verbrennen der Fasern sein¹⁵. Eine Ma-

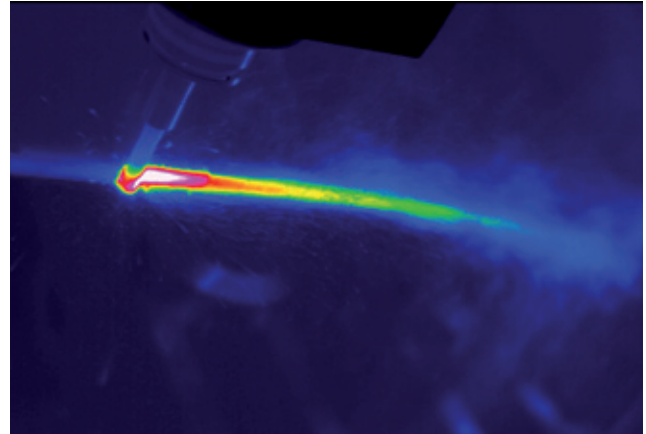


Abbildung 18: Thermographische Aufnahme der Fräsbearbeitung eines FVK-Werkstoffs⁴

trixerweichung tritt oberhalb der Glasübergangstemperatur des Matrixwerkstoffes ein und kann zu einer fehlerhaften Abtrennung der Faserverstärkungen führen. Allerdings kann die Matrixerweichung die Delamination beim Ausfahren des Bohrers reduzieren, da die für die Durchführung der Operation erforderliche Vorschubkraft abnimmt^{23,24}. Hohe Temperaturen führen oft dazu, dass ein zusätzlicher Bearbeitungsschritt zum Entgraten der bearbeiteten Kanten benötigt wird.

Werden faserverstärkte Kunststoffe ohne Kühlmittel bearbeitet, zeigt sich oftmals eine erhebliche Gratbildung und Ausfransung der Schnittkanten. Ein Beispiel ist in Abbildung 19 gegeben. In der oberen Abbildung ist das Bearbeitungsergebnis bei Verwendung von Kühl- und Schmiermittel dargestellt. Die untere Abbildung zeigt im Vergleich dazu das Resultat ohne den Einsatz von Kühlschmierstoff. Bei dem Material handelt es sich um ein Kohlenstofffaser-Epoxid-Laminat, wobei die gleichen Bearbeitungsparameter eingesetzt werden.

»Kühlschmierstoffe bieten Lösungen für eine wirtschaftliche und sichere Nassbearbeitung von CFK- und GFK. Der Anwender zieht folgenden Nutzen aus dem „flüssigen“ Werkzeug: Energieeffizienz durch Einsparung bei der Absaugeinrichtung, Bindung aller flüchtigen Partikel, Sicherheit am Arbeitsplatz, Verlängerung der Werkzeugstandzeiten, keine thermische Überbelastung des Werkstücks, Verringerung der Delaminationstendenz und damit verbunden eine massive Reduktion des Aufwands für Nacharbeiten sowie eine Verbesserung der Oberflächengüte.«

*Björn Herbst,
Product Manager water-miscible cutting fluids Blaser Swisslube AG.*



Abbildung 19: Bearbeitungsergebnisse bei der Zerspantung mit (oben) und ohne (unten) Kühlschmierstoff²⁵

Trockenbearbeitung kann häufig zu deutlich erhöhtem Werkzeugverschleiß führen. Abbildung 20 vergleicht die Bearbeitung von Glasfaser-Epoxid-Laminat mit und ohne Kühlschmierstoff. Am Ende des Tests war der Werkzeugverschleiß bei Trockenbearbeitung etwa dreimal größer im Vergleich zur gekühlten Bearbeitung²¹.

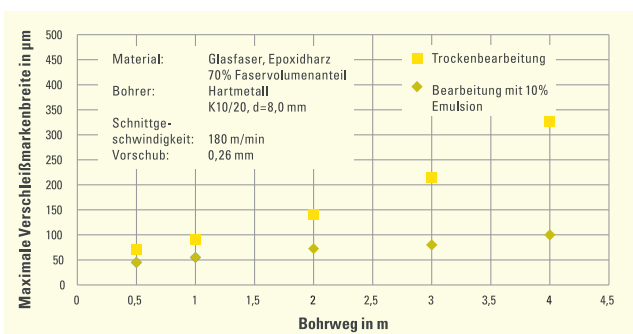


Abbildung 20: Einfluss von Kühlschmierstoff auf den Werkzeugverschleiß, nach Weinert (2004)²¹

Hinweis

Mit Kühlmittel

- verlängerte Standzeiten
- schnellere Bearbeitung möglich
- bessere Qualität

Ohne Kühlmittel

- keine ungewollten Effekte durch Kühlmittel
- Keine Kühlmittelaufbereitung notwendig

2.6.2 UNGEWOLLTE EFFEKTE DURCH KÜHLUNG UND SCHMIERUNG

Angesichts der mannigfaltigen Vielzahl an Matrix-Typen, Härtern, Fasern, Schichten, Kühlmitteln und deren unzähligen Kombinationen, muss stets die Möglichkeit eines chemischen Abbaus oder einer chemischen Reaktion des Werkstücks mit dem eingesetzten Kühlschmiermittel betrachtet werden. Derartige Informationen sollten vom Hersteller des eingesetzten Kühl- oder Schmiermittels bereitgestellt werden.

Die unbearbeiteten Oberflächen der Verbundwerkstoffe absorbieren die Feuchtigkeit aus ihrer Umgebung sehr langsam, so dass das Auftreten einer signifikanten Absorption in der Zeitspanne von normalen Bearbeitungen unwahrscheinlich ist²⁶. Jedoch sind lokale Anschwellungen der bearbeiteten Kanten des Verbundes sicherlich möglich, da diese häufig aufgrund von Mikrorissen und Defekten porös sind und als solche eine größere Fläche an freiliegendem Matrixmaterial besitzen, was die Absorption von Teilen des Kühlschmiermittels durch den Werkstück-Werkstoff erleichtert. Vor der Entscheidung für oder gegen die Verwendung von Kühlmittel sollten in jedem Fall die potentiellen Auswirkungen auf die Werkstofffestigkeit durch eine Feuchtigkeitsaufnahme der bearbeiteten Oberflächen berücksichtigt werden.

Ölbasierte Kühlmittel sollten generell nicht verwendet werden, da sie sobald sie in die bearbeiteten, porösen Flächen eingedrungen sind, nur schwer wieder zu entfernen sind²⁷. Überwiegend werden Kühlmittel auf Wasserbasis verwendet. Diese gelten gemeinhin als geeigneter für faserverstärkte Kunststoffe. Jedoch besteht

Kapitel 2

auch bei diesen Kühlmitteln der Nachteil, dass die in der Emulsion vorhandenen Zusatzstoffe nach dem Verdampfen des Wassers zurückbleiben können. Diese Rückstände müssen wiederum auf eventuelle Reaktionen mit Matrix- bzw. Faserwerkstoff überprüft werden. Sowohl für öl- als auch wasserbasierte Produkte ist es von großer Bedeutung, dass die unbeabsichtigte Verschmutzung mit Fremdstoffen oder -partikeln möglichst vermieden wird, da sich dies auch auf die Funktionalität der Werkstücke auswirken kann. Dies gilt insbesondere, wenn eine Beschichtung oder eine mechanische Verbindung der Bauteile erforderlich ist.

Hinweis

Schäden

- die Gefahr einer möglichen Reaktion des Kühlschmiermittels mit dem Bauteil sollte geprüft werden
- ölbasierte Kühlmittel sollten nicht verwendet werden, besonders dann nicht, wenn die Bauteile lackiert sind

2.6.3 METHODEN DER KÜHLUNG UND SCHMIERUNG

Kühlschmierung durch Überflutung ist das am häufigsten angewandte Kühlungsverfahren bei der Bearbeitung von Verbundwerkstoffen, da die meisten Bearbeitungszentren diese Funktionalität besitzen. Allerdings gibt es auch andere Methoden zur Kühlung und Schmierung. Als Alternativen existieren die Kühlung über Minimalmengenschmierung, Kryokühlung und Druckluftkühlung.

Hinweis

Welche Kühlmethoden?

- Derzeit existieren nur wenige Analysen zu den verschiedenen Kühlmethoden in Bezug auf Bearbeitungsqualität und Wirtschaftlichkeit.
- Normalerweise führt die Bearbeitung mit Kühlmittel zu besseren Ergebnissen als diejenige ohne.
- Voraussetzung ist jedoch stets die Berücksichtigung von chemischen Reaktionen zwischen Kühlschmierstoff und Werkstück-Werkstoff.

Die Minimalmengenschmierung sorgt für die Zuführung einer nur sehr geringen Menge an Schmiermittel zur Wirkstelle der Bearbeitung, an der es erforderlich ist. Dies wird meist durch die Kombination von Druckluft mit einem MMS-Schmiermittel zu einem aerosolen Schmiermittel erreicht. Diese Aerosole können durch eine äußere Düse direkt auf die Schneide gerichtet werden oder intern über Kanäle im Werkzeug. Bei den Ein-Kanal-MMS-Systemen entstehen diese Aerosole in der MMS-Einheit. 2-Kanal-Systeme verfügen hingegen über zwei getrennte Zuläufe für die Druckluft und das Schmiermittel, welche kurz vor der Abgabe gemischt werden müssen. Im Falle der Durchleitung durch das Werkzeug sind bei hohen Drehzahlen von über 30.000 min⁻¹ zwei Kanal-Systeme erforderlich, da eine Entmischung des Aerosol-Gemischs zwischen der MMS-Einheit und der Werkzeugöffnung auftreten kann²⁸.

Durch innere Kühlmittelzuführung kann Minimalmengenschmierung oder flüssiger Schmierstoff verwendet werden. Dies ist vorteilhaft, da das Kühlmittel dorthin gelangt, wo es wirklich gebraucht wird und so Ablagerungen besonders effektiv entfernt werden. Ein derartiges System ist in Abbildung 21 dargestellt.

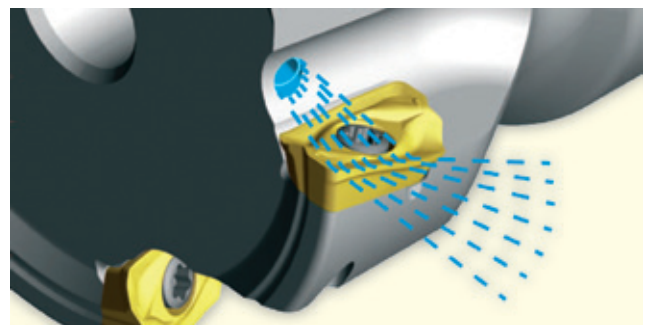


Abbildung 21: Einsatz von Minimalmengenschmierung zur Kühlung der Werkzeugschneide²⁹

Kryokühlung beinhaltet die Zuführung von verflüssigtem oder gekühltem Gas zur Zerspanstelle. Dies geschieht entweder durch Kanäle im Werkzeug oder durch die direkte Anwendung auf der bearbeiteten Oberfläche. Bei der Kryokühlung sind extrem niedrige Temperaturen bis -200°C möglich. Es gibt nur wenige Publikationen mit aussagekräftigen Informationen über das Leistungspotential der kryogenen Kühlung in Zusammenhang mit faserverstärkten Kunststoffen. Eine Studie mit Kevlar-Epoxy-Laminaten zeigte jedoch eine Verbesserung hinsichtlich Oberflächengüte und

Werkzeugverschleiß in Verbindung mit sinkenden Temperaturen an der Zerspanstelle im Bereich von -60 bis -190°C ³⁰. Hersteller derartiger Systeme gehen davon aus und werben damit, dass diese Kühlungsart für faserverstärkte Kunststoffe geeignet ist und die niedrigen Temperaturen zu einer zuverlässigen Bearbeitung führen. Abbildung 22 und Abbildung 23 zeigen Beispiele für äußere beziehungsweise innere Kryokühlung.



Abbildung 22: Äußere Kryokühlung: Kaltaerosoles Schmiermittel wird außen auf das Werkzeug gesprüht³¹



Abbildung 23: Innere Kryokühlung: Kühlmittel wird intern zugeführt, wobei sich auf der Oberfläche des Werkzeugs Eiskristalle gebildet haben³²

Druckluft ist eine einfache Alternative, um Kühlschmierstoffe zu vermeiden. Druckluft kann ein einfaches und effektives Mittel sein, um Spannuten und Werkzeugoberflächen während der Bearbeitung frei von Stäuben und Spänen zu halten. Dieses Verfahren ist besonders effektiv, wenn das Einblasen der Druckluft durch das Werkzeug selbst geschieht. Die Kühlwirkung von Druckluft auf das Werkstück während der Bearbeitung ist jedoch nur begrenzt.

2.7 SICHERHEIT

Die Bearbeitung von vielen Leichtbauwerkstoffen unterscheidet sich auch im Hinblick auf gesundheitliche Aspekte von der konventionellen Metallzerspanung. Werkzeuge zur Zerspannung von faserverstärkten Kunststoffen, Holzwerkstoffen und Leichtmetallen sind im Allgemeinen deutlich schärfer ausgeführt als solche zur Bearbeitung von Stahlwerkstoffen. Dort sind in der Praxis Schneidkantenverrundungen im Bereich von 10 bis $30\ \mu\text{m}$ üblich. Häufig liegt der Schneidenradius für Werkzeuge zur Bearbeitung von Leichtbauwerkstoffen bei $3 - 15\ \mu\text{m}$. Die Schnittkante ist damit deutlich schärfer als bei Werkzeugen zur Stahlzerspannung. Daraus ergibt sich eine erhöhte Verletzungsgefahr beim Umgang mit diesen Werkzeugen. Insbesondere beim manuellen Werkzeugwechsel ist der Maschinenbediener einer erhöhten Gefahr von Schnittverletzungen ausgesetzt.

Weiteres Gefährdungspotential geht vom rotierenden Werkzeug aus. Die hohen Schnittgeschwindigkeiten und die damit einhergehenden schnelldrehenden Werkzeuge mit Drehzahlen von 20.000 bis $30.000\ \text{min}^{-1}$ haben bei einem Werkzeugbruch zur Folge, dass aus Bruchstücken des Werkzeugs gefährliche Geschosse entstehen können. Durch die bei derartigen Drehzahlen freiwerdende kinetische Energie stellt auch das Abplatzen von Werkstückteilen eine Gefahr dar.

Bei Holzbearbeitungsmaschinen regelt die DIN 848-3 die Sicherheitsmaßnahmen zum Schutz des Bedieners beim Werkzeugbruch. Verschiedene Einhausungen und Schutzvorhänge, deren Funktion durch Beschussprüfungen gewährleistet wird, verhindern, dass Bruchstücke des Werkzeugs die Maschine verlassen. Am Markt existieren vielfältige Lösungen für Maschineneinhausungen. Einfache geometrische Ausführungen sind dabei aus Stahlblech, aufwendigere Einhausungen mit Freiformflächen werden in glasfaserverstärkten Kunststoffen realisiert.

Auch von den Leichtbauwerkstoffen selbst geht bei der Zerspannung eine Gesundheitsgefahr für den Werker aus. Bei der Verarbeitung von Leichtmetallen wie Aluminium entstehen Staubaerosole mit einer inhalativen Wirkung. Gleiches gilt für die Fasern bei kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen. Durch spanende Bearbeitung wie Drehen und Schleifen kommt es zur Freisetzung von Trockenstäuben.

Kapitel 2

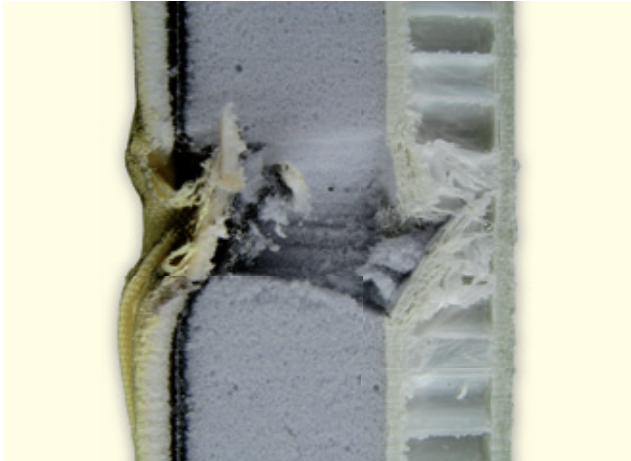


Abbildung 24: Leichtbaueinhausung nach Beschussprüfung (oben) und Schutzvorhang an Holzbearbeitungsmaschine (rechts)³³

Unter Staubaerosolen werden feinkörnige oder feinfaserige Partikel verstanden, die zusammen mit Luft ein heterogenes Gemisch bilden. Auch wenn Staubaerosole keine besondere chemisch oder molekular bedingte Toxizität besitzen, kann allein durch zu hohe Staubkonzentration und Überlastung der körpereigenen Reinigungsvorgänge der Atemwege eine starke gesundheitliche Beeinträchtigung entstehen.

Um das von Stäuben am Arbeitsplatz ausgehende Risiko bewerten zu können, wird die Aerosolkonzentration und Partikelgrößenverteilung bestimmt.

Das Bundesministerium für Arbeit hat in den Technischen Regeln für Gefahrstoffe (TRGS) 900³⁴, allgemeine Staubgrenzwerte festgelegt. Diese Werte regeln die Menge an Stäuben in der Maschineumgebung bezogen auf einen Kubikmeter Luft:

- A-Staub mit Partikelgrößen $< 10 \mu\text{m}$ für alveolengängige, d.h. bis in die Lungenbläschen gelangende Partikelstäube; Grenzwert 3 mg/m^3
- E-Staub mit Partikelgrößen $> 10 \mu\text{m}$, für einatembare Partikelstäube; Grenzwert 10 mg/m^3



Entsprechende Werte mit Empfehlungscharakter wurden auch von der Kommission zur Festsetzung maximaler Arbeitsplatzkonzentration, der sogenannten MAK-Kommission festgelegt.

- A-Staub mit Partikelgrößen $< 10 \mu\text{m}$ für alveolengängige, d.h. bis in die Lungenbläschen gelangende Partikelstäube; Grenzwert $1,5 \text{ mg/m}^3$
- E-Staub mit Partikelgrößen $> 10 \mu\text{m}$, für einatembare Partikelstäube; Grenzwert 4 mg/m^3

Im Grundsatz unterschiedlich sind die Belastungen durch Partikelstäube und Faserstäube. Es sind vor allem Größe und räumliche Gestalt der freigesetzten Fasern von Bedeutung. Fasern mit Längen über $10 \mu\text{m}$, Durchmessern kleiner $3 \mu\text{m}$ und einem Länge-Durchmesser-Verhältnis größer 3:1 werden nach Kriterien der Weltgesundheitsorganisation (WHO) aufgrund ihrer mechanischen Einwirkung auf das Lungengewebe als kritisch angesehen³⁵. Zutreffend sind diese Kriterien zum Beispiel für den allgemein bekannten Asbest.

Derzeit gibt es keine gesicherten Erkenntnisse für krebserzeugende Eigenschaften von Kohlenstoff- bzw. Graphitfasern. Diese

werden heute meist mit einem Faserdurchmesser zwischen 5 und 7 µm hergestellt, so dass zumindest eine Inhalation in die tiefe Lunge ausgeschlossen ist. Beim Umgang mit diesen bisher nicht krebserzeugenden Fasermaterialien sind zunächst die Mindeststandards der TRGS 500³⁶ zu beachten.

Aus Sicht des Arbeitsschutzes steht die Staubvermeidung bzw. die Staubreduzierung beim Umgang mit Partikel- und Faserstäuben im Vordergrund. Bei der spanenden Bearbeitung sind grundsätzlich technische Schutzmaßnahmen wie Einhausungen und Absaugungen den organisatorischen und persönlichen vorzuziehen. Im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung werden vom Arbeitgeber mit Unterstützung von Betriebsarzt und Arbeitsschutz konkrete Schutzmaßnahmen ermittelt und festgelegt.

In wissenschaftlichen Kreisen wird die Frage der krebserzeugenden Wirkung granulärer biobeständiger Stäube ohne bekannte spezifische Toxizität intensiv diskutiert. Diese Stäube beinhalten auch Schleifstäube wie sie bei der Bearbeitung von Leichtbaukomponenten auftreten können.

Hingegen wird das Risiko der Partikelaufnahme über die Haut als vernachlässigbar gering angesehen, wenn die am Arbeitsplatz vorgesehenen Schutzmaßnahmen eingehalten werden.

Derzeit werden mit Beteiligung der Berufsgenossenschaft Holz und Metall umfassende Analysen durchgeführt, die sich mit der Auswirkung von CFK-Stäuben auf den menschlichen Organismus beschäftigen. Von besonderem Interesse sind hierbei die Beschaffenheit und Größe der Partikel, sowie deren Verhalten im Lungengewebe. Konkrete Richtlinien und Vorschriften speziell für die CFK-Bearbeitung sind aktuell noch nicht veröffentlicht, werden aber aller Voraussicht nach in den nächsten Jahren erscheinen.

Aktuelle Arbeitsschutzmaßnahmen schließen eine nach dem Stand der Technik ausgelegte, möglichst effektive Staubabsaugung direkt am Werkzeug für die auftretenden Staubaerosole ein. Außerdem sollte die Einhausung von stationären Bearbeitungsmaschinen staubdicht sein, so dass für den Bediener keine weitere Schutzausrüstung erforderlich ist. Besonders wichtig ist es, die in der Metallbearbeitung gängige Praxis zu unterlassen, Maschinen und Werkstücke mit Druckluft zu reinigen. Stattdessen sind Stäube mit einem für kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe geeigneten

Staubsauger zu entfernen. Außerdem sollten Maschinen und Anlagen täglich gereinigt werden, um das Ansammeln von größeren Staubmengen zu unterbinden. Da Kohlenstofffasern eine sehr hohe elektrische Leitfähigkeit haben, sind auch elektrische Maschinenkomponenten vor CFK-Stäuben zu schützen.

Neben der inhalativen Wirkung bergen Aluminium- und Magnesiumstäube auch eine Explosionsgefahr. Beim Schleifen, Bürsten und Polieren von Aluminium entsteht ein explosionsfähiges Gemisch aus Stäuben und Luft. Als Maßnahme zur Vermeidung gefährlicher Konzentrationen werden Nass- und Trockenverfahren zur Staubbeseitigung empfohlen. Beim Nassverfahren wird durch die Zufuhr von Wasser oder Kühlschmierstoff eine Staubbildung vermieden. Der Abrieb fällt als Schlamm an.

Bei Trockenverfahren wird der Staub unmittelbar nach der Entstehung mit Wasser benetzt oder abgesaugt, wobei die Explosionsgefahr in weiteren Verfahren gebannt wird.³⁷

Ein höheres Gefahrenpotential liegt bei der Magnesiumbearbeitung vor. Magnesiumspäne sind leicht entzündlich, die entsprechenden Stäube explosionsfähig. Zudem reagieren Späne und Stäube mit Wasser, wodurch hochentzündlicher Wasserstoff freigesetzt wird. Beim Spanen mit geometrisch bestimmter Schneide sind die Bearbeitungsparameter so zu wählen, dass Zündgefahr und Staubbildung möglichst vermieden werden. Dies kann zum Beispiel durch Zuführung einer ausreichend großen Menge an Kühlschmiermittel direkt an der Bearbeitungsstelle erfolgen. Zudem sind die Bearbeitungsmaschinen so einzurichten, dass sich kein Wasserstoff ansammelt und Späneanhäufungen durch ständiges Entfernen vermieden werden. Beim Spanen mit geometrisch unbestimmter Schneide sind durch geeignete Verfahren Stäube zu beseitigen.³⁸

Kapitel 3

MARKTANALYSE: BEARBEITUNGSZENTREN FÜR LEICHTBAUWERKSTOFFE

3.1 EINLEITENDE BEMERKUNGEN

Ziel dieser Marktanalyse ist es, einen Überblick über die Vielzahl von CNC-Bearbeitungszentren für Leichtbauwerkstoffe zu geben. Die besonderen Eigenschaften von faserverstärkten Kunststoffen und die daraus abzuleitenden Anforderungen an die technischen Funktionen der Bearbeitungszentren für die spanende Bearbeitung werden dabei detailliert herausgearbeitet.

In einer ausgedehnten Recherchephase wurden Hersteller ermittelt, welche Bearbeitungszentren speziell für die Bearbeitung von Leichtbauwerkstoffen anbieten. Zur Bestimmung der für die FVK-Zerspanung nötigen technischen Daten wurde ein Fragenkatalog entwickelt, der die maßgeblichen Parameter erfasst.

Ziel des Fragebogens war es dabei nicht, jeden Aspekt oder Parameter der Bearbeitungszentren im Detail aufzulisten, sondern einen möglichst guten Überblick über den Markt, Hersteller und Baureihe zu erarbeiten. Der Fragekatalog wurde sehr anwendungsorientiert gestaltet, um potentiellen Anwendern von CNC-Bearbeitungszentren, welche die Bearbeitung von Leichtbauwerkstoffen in Erwägung ziehen, einen Überblick zu geben, welche Hersteller sich aktuell mit der Thematik beschäftigen und welche technische Eigenschaften die Bearbeitungszentren besitzen, die am Markt angeboten werden.

Insgesamt haben 15 Unternehmen mit 42 unterschiedlichen Baureihen an der Marktanalyse teilgenommen. Baureihen beinhalten im Allgemeinen mehrere Maschinen, die sich allerdings in der Bauweise oder Leistungsklasse ähneln. Unterschiedlich kann allerdings in einer Baureihe die Ausgestaltung ausfallen, wie die Länge der Achsen oder die Bestückung mit Aggregaten. Alle teilnehmenden Unternehmen sind aus Mitgliedsstaaten der EU, wobei 10 Unternehmen am Standort Deutschland angesiedelt sind, darunter sechs aus Baden-Württemberg.

Die tabellarische Darstellung der Maschinendaten erfolgt in alphabetischer Reihenfolge, so dass sich hieraus keine Wertung ableiten lässt. Für eine gleichwertige Darstellung der technischen Daten wurden einige Angaben der Hersteller vereinfacht, wobei deren grundsätzliche Gültigkeit beibehalten wurde. Für Änderungen und Neuerungen der Daten im Tabellenwerk durch die Ma-

schinenhersteller, die im Verlauf der Erstellung der Studie erfolgten, Übertragungs- und Darstellungsfehler in den tabellarischen und ausgewerteten Daten übernehmen die Autoren keine Haftung.

3.2 ERGEBNISSE

3.2.1 KOSTEN UND GRÖSSE DER ANLAGEN

Die Analyse der Anschaffungskosten für die Bearbeitungszentren ergab eine Preisspanne von 50.000 € bis 1.700.000 €. Die Größe dieser Spanne erklärt sich durch die deutlich unterschiedliche Länge der Hauptachsen, welche in den unterschiedlichen Baureihen zwischen 0,45 m und 60 m liegt. Darüber hinaus ist die Ausstattung einer Baureihe entscheidend für den Preis. Sind beispielsweise Systeme für den Schutz vor Stäuben oder zur Kühlung bereits integriert, steigt der Preis teilweise sehr deutlich an.

Mehr als 40 % der analysierten Baureihen liegen im Preissegment von unter 200.000 €, weitere 50 % im Bereich zwischen 200.000 € und 1.000.000 €. Im Bereich der größeren Baureihen mit Anschaffungskosten von über 1 Million Euro liegen ausschließlich 5 % der betrachteten Baureihen. Die genaue Aufteilung kann Abbildung 25 entnommen werden.

In einer etwas vereinfachten Betrachtung kann der Maschinenpreis auf die Grundfläche der Maschinen bezogen werden. Für 5-Achs-Maschinen ohne Schwenktisch ergibt sich so ein Preis (Median) von 40.200 € und ein durchschnittlicher Preis von 60.300 € pro Quadratmeter Bearbeitungsgrundfläche. Der Median ist dabei der Preis, der sich bei der Ordnung der Preise nach ihrer Höhe dort ergibt, wo die Hälfte aller Bearbeitungszentren eingeschlossen ist.

Der Preis pro Quadratmeter wird berechnet, indem der Grundpreis durch die Fläche dividiert wird, die durch Multiplikation der Längen von X- und Y-Achse erhalten wird. Beim Vergleich der Kosten für die jeweiligen Baureihen konnte ein Preisunterschied von 12 % zwischen deutschen und anderen europäischen Herstellern nachgewiesen werden.

Dieser Unterschied wird in Abbildung 26 deutlich. Da viele Faktoren wie Wahl des Antriebssystems, Ausstattung oder der Bearbeitungsraum der Maschinen eine Rolle spielen, ist ein exakter Ver-

gleich zwischen den Baureihen nur sehr eingeschränkt möglich. Aus diesem Grund kann auch keine Aussage darüber getroffen werden, worin diese Preisdifferenz im Einzelfall begründet liegt.

Durchschnittlicher Grundpreis der Baureihen (€/m ²)	Deutsche Hersteller	Europäische Hersteller	Zusammen
	63.700	56.800	60.300

Tabelle 2: Maschinenpreis konventioneller 5-Achs-Maschinen bezogen auf die Grundfläche

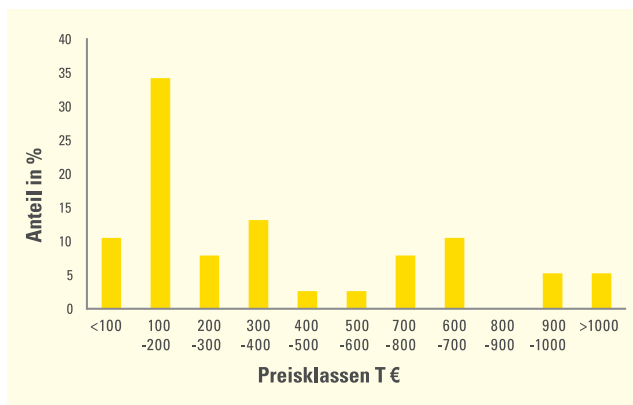


Abbildung 25: Verteilung der Grundpreise der erfassten Baureihen

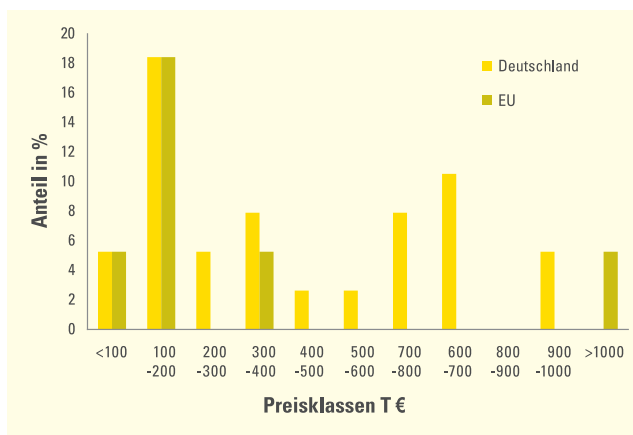


Abbildung 26: Kostenstruktur der Baureihen deutscher und anderer europäischer Maschinenhersteller

3.2.2 WERKSTOFFE

Im Fokus dieser Marktanalysen stehen CNC-Bearbeitungszentren zur Bearbeitung unterschiedlicher Leichtbauwerkstoffe. Abbildung 27 stellt dar, auf wie vielen der analysierten Baureihe sich der jeweilige Werkstoff nach Angaben der Hersteller bearbeiten lässt.

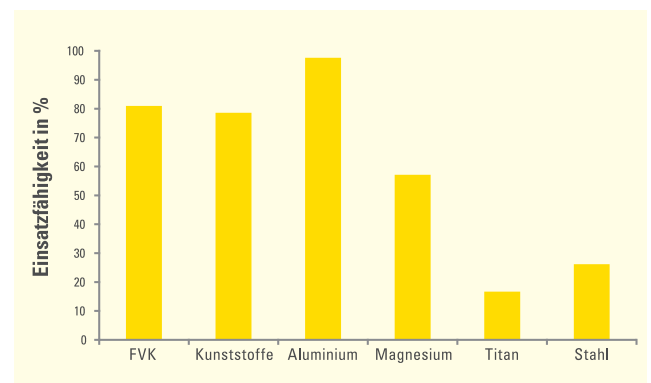


Abbildung 27: Auf den erfassten Baureihen bearbeitbare Werkstoffe

Die Grafik zeigt, dass Bearbeitungszentren in der Regel nicht auf einen Werkstofftyp beschränkt sind. Beispielsweise ist mit 75 % der Großteil der Baureihen für die Bearbeitung von faserverstärkten Kunststoffen, Kunststoffen und Aluminium geeignet. Grund hierfür ist, dass von Seiten der Bearbeitungszentren die Bearbeitung vieler Werkstoffe vergleichbare Anforderungen mit sich bringt. Beispielsweise sind, wie auch in Abbildung 27 deutlich wird, nahezu alle Baureihen, welche faserverstärkte Kunststoffe bearbeiten können, auch in der Lage unverstärkte Kunststoffe zu bearbeiten. Dieselbe Aussage trifft auch für Titan und Stahl zu. Die Möglichkeit zur Bearbeitung von Aluminium bei über 90 % der Baureihen beruht auf den relativ geringen Anforderungen bezüglich der Maschinensteifigkeit.

Bezieht man neben den 3 bisher erwähnten Werkstoffen Magnesium mit ein, sinkt die Anzahl der Baureihen die alle 4 Werkstoffarten bearbeiten können auf 40 %. Die Bearbeitung von Titan und Stahl ist nur mit einem kleineren Teil der Baureihen möglich, da aufgrund der erheblich höheren Schnittkräfte bei wirtschaftlichen Schnittparametern die grundlegende Struktur und Leistungsklasse der Baureihe angepasst werden muss.

Kapitel 3

Abschließend kann festgestellt werden, dass die Anzahl der Baureihen, die einen Werkstoff bearbeiten können, keinen direkten Rückschluss auf die Nachfrage an solchen Maschinen zulässt. Werden aus einem Werkstoffe überwiegend vergleichbare Bauteile hergestellt, die eine vergleichbare Größe oder Geometrie aufweisen, ist es für den Anbieter nur bedingt sinnvoll, für diese Werkstoffgruppe eine Vielzahl an Maschinen anzubieten.

3.2.3 BRANCHEN

Abbildung 28 vermittelt einen Eindruck, in welcher Branche die Bearbeitungsmaschinen bzw. die darauf gefertigten Werkstücke eingesetzt werden. Im Bereich Luftfahrt und im Automobilbau besteht demnach Nachfrage nach nahezu allen Baureihen der teilnehmenden Hersteller. Grund ist das breite Spektrum an Werkstücken und Werkstückgrößen mit entsprechenden Kombinationen und Variationen, wie auch die Vielzahl an eingesetzten Werkstoffen.

Im Bereich der Windkraft werden Maschinen mit großen Arbeitsräumen benötigt, was direkt aus den groß dimensionierten Werkstücken in diesem Industriezweig resultiert. Der geringere Bedarf an Maschinen in dieser Branche liegt unter Umständen daran, dass die Produktvielfalt im Bereich der Windkraftanlagen nicht so vielfältig ist wie in den anderen Branchen. Trotz dieser Tatsache werden über 50 % der Baureihen bereits in dieser Branche verwendet. Auch außerhalb der Windenergie- und der Automobilbranche werden faserverstärkte Kunststoffe bearbeitet. Dies wird dadurch belegt, dass 80 % der Baureihen in anderen Branchenzweigen eine Anwendung finden. Beispiele hierzu sind typische Applikationen aus der Sport- und Freizeitindustrie aber auch aus dem Schiffsbau oder dem Bausektor.

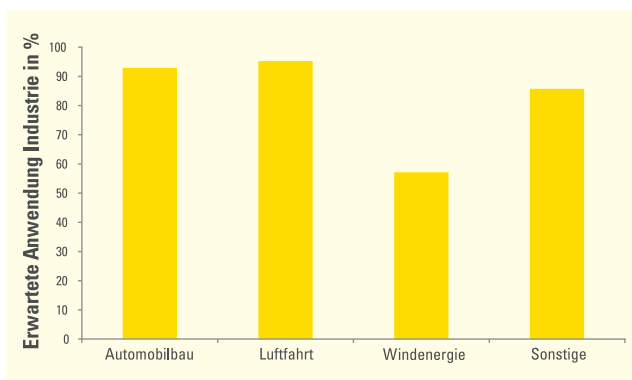


Abbildung 28: Typische Anwendungsbereiche der erfassten Baureihen

3.2.4 BAUART

Die analysierten Baureihen sind nahezu ausschließlich 5-Achs-Baureihen ohne Schwenktisch, mit 5 Achsen im Werkzeug. Lediglich bei einigen Systemen kommt ein Schwenktisch zum Einsatz. Abbildung 29, Abbildung 30 und Abbildung 31 zeigen jeweils ein Beispiel für die unterschiedlichen Ausführungen der erfassten Bearbeitungszentren.

Am Markt existieren sowohl unterschiedliche Grundstrukturen wie auch Antriebssysteme für CNC-Bearbeitungszentren.

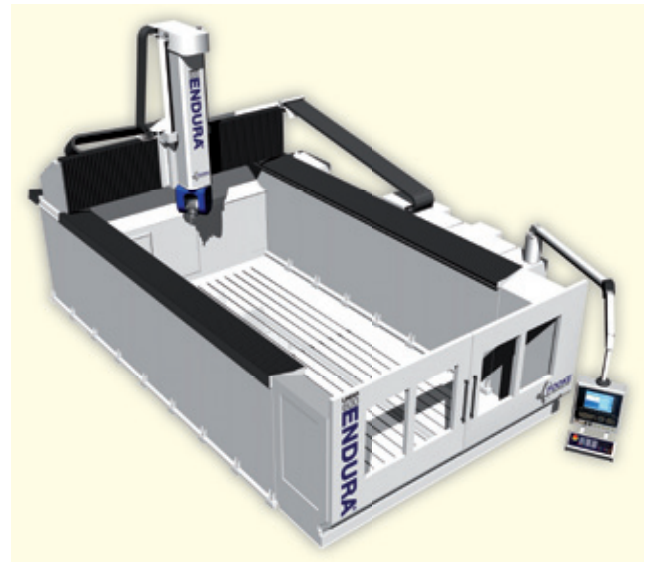


Abbildung 29: 5-Achs-Fahrportal Bearbeitungszentrum³⁹



Abbildung 30: 5-Achs-Bearbeitungszentrum mit Schwenktisch⁴⁰



Abbildung 31: 3-Achs-Fahrportal Bearbeitungszentrum⁴¹

Mit Abbildung 32 wird verdeutlicht, dass mehr als 80 % der Baureihen über ein Fahrportal als Grundstruktur verfügen. Mit rund 20 % sind feste Portale die am zweithäufigsten genutzte Variante. Der grundsätzliche Unterschied beider Systeme ist die Verfahrbarkeit der einzelnen Achsen. Eine schematische Darstellung beider Konstruktionsprinzipien wird in Abbildung 33 gezeigt. Bei Fahrportalen verfährt das Werkzeug in allen drei Achsen, währenddessen bei Standportalen eine Bewegung durch den Bearbeitungstisch realisiert wird. Fahrportale benötigen daher vor allem bei sehr großen Bauteilen deutlich weniger Platz als die alternativen Bauarten. Um eine hohe Positioniergenauigkeit zu erreichen, entste-

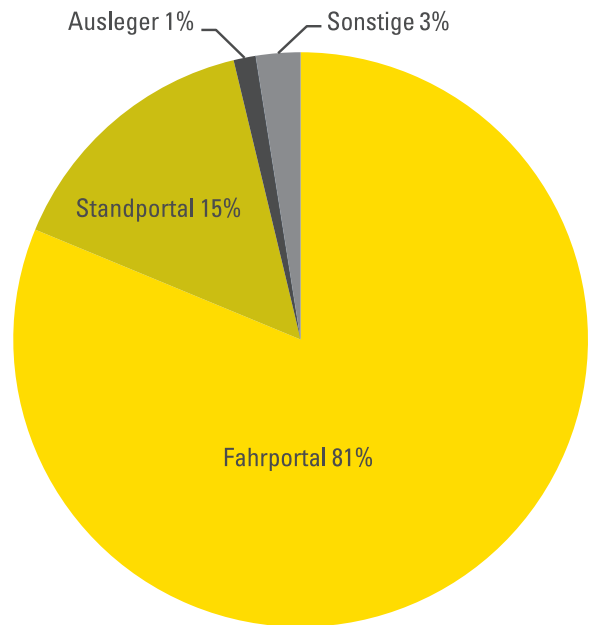


Abbildung 32: Vergleich der Grundstrukturen der analysierten Baureihen

hen hierbei jedoch Mehrkosten. Anwendungen von Standportalmaschinen sind vor allem Werkstücke mit einfachen Geometrien bei einer zerspanenden Bearbeitung mit hohen Prozesskräften.

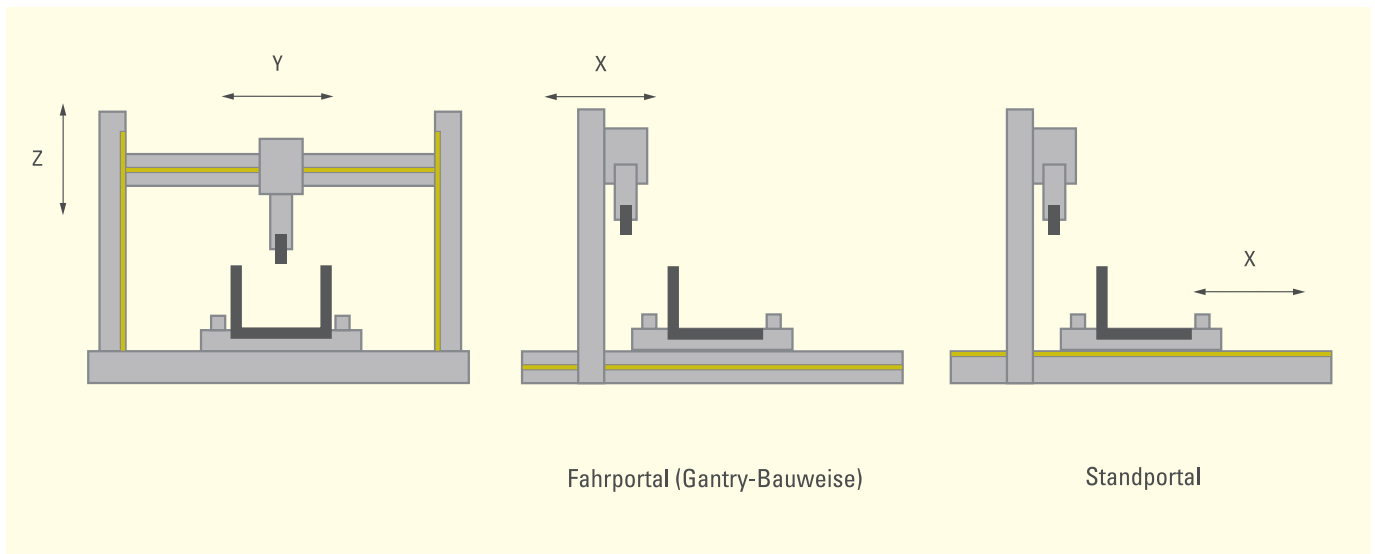


Abbildung 33: Schematische Darstellung der unterschiedlichen Bauweisen in Anlehnung an⁴²

Kapitel 3

Bei den Antriebssystemen existieren am Markt Zahnstangen-, Kugelumlaufspindel- und Lineardirektantriebe. Für eine Aussage, wie häufig die jeweiligen Systeme zum Einsatz kommen, müssen jedoch alle Achsen unabhängig voneinander betrachtet werden. Grund hierfür ist die Tatsache, dass in einem Bearbeitungszentrum in der Regel für die Achsen unterschiedliche Antriebssysteme eingesetzt werden, um deren jeweilige Vorteile auszunutzen. In Hinsicht auf das Achsantriebssystem, sind Zahnstangen die am häufigsten benutzten Komponenten bei großen Maschinen bzw. bei langen Achswegen.

Dies wird durch Abbildung 34 belegt, welche die minimale Länge der X-Achse gegenüber der Genauigkeit und dem Preis für die verschiedenen Achsantriebssysteme aufzeigt (in dieser Abbildung repräsentieren kleine Kreisflächen eine höhere erreichbare Fertigungsgenauigkeiten der Baureihe). Diese Aussage gilt vor allem für Achsen über 2 m Länge. In Maschinen mit Achslängen über 10 m werden von einigen Anbietern Lineardirektantriebe verwendet. In den X- und Y-Achsen verwenden rund 50 % der Baureihen Zahnstangenantriebe.

Abbildung 34 zeigt eine Tendenz, die besagt, dass Maschinen, die höhere Bearbeitungsgenauigkeiten bieten, zu höherem Investment bei der Anschaffung führen. Dies beruht auf dem Mehraufwand bei Antriebssystem, Steuerung, Steifigkeit der mechanischen Komponenten oder auch auf den aufwendigeren Einspannsystemen. An dieser Stelle sei noch einmal ausdrücklich darauf hingewiesen, dass ein direkter Vergleich der Kosten aufgrund der oben angeführten Gründe nur bedingt möglich ist.

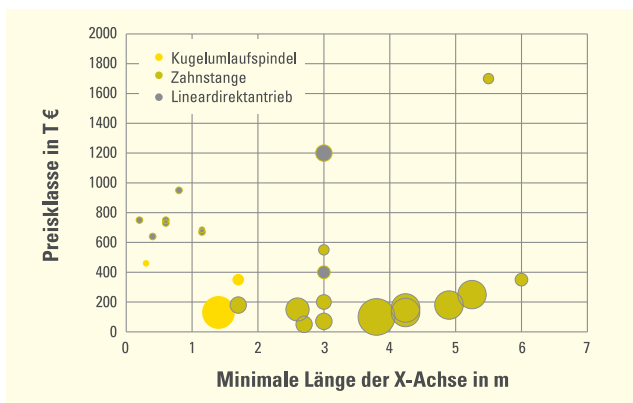


Abbildung 34: Beziehung zwischen Genauigkeit (kleine Kreisfläche = hohe Genauigkeit, große Kreisfläche = niedrige Genauigkeit), Preisklasse und Länge der X-Achse für verschiedene Achsantriebssysteme

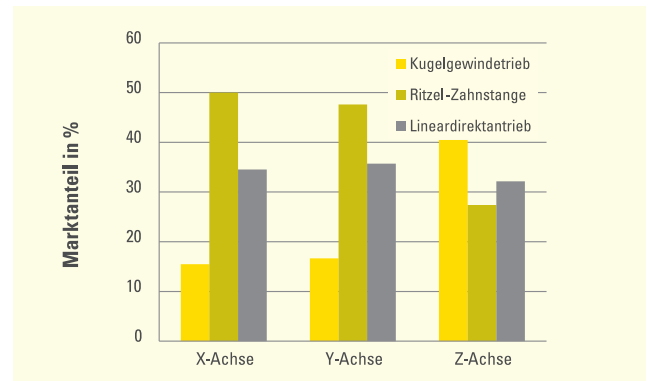


Abbildung 35: Verteilung unterschiedlicher Achsantriebssysteme in X-, Y- und Z-Achse

Die Häufigkeit des Auftretens von Linearantrieben bleibt bei allen Achsen konstant. Dies resultiert daraus, dass diese Technik bei eher kleinen Maschinen bevorzugt herangezogen wird. Bei den betreffenden Baureihen der erfassten Maschinen sind alle 3 Achsen relativ kurz und es wird eine hohe Präzision von Seiten des Anwenders gefordert.

3.2.5 ARBEITSLEISTUNG

Ähnlich den bisher betrachteten Aspekten unterscheiden sich die einzelnen Baureihen auch hinsichtlich ihrer Spindelleistung und des maximalen Drehmoments deutlich. Abbildung 36 zeigt den Zusammenhang.

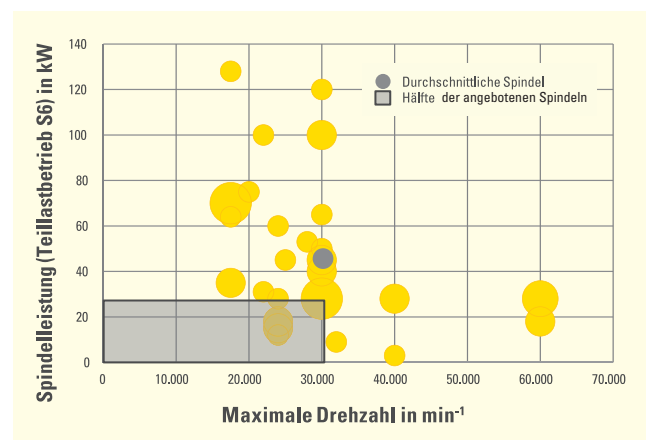


Abbildung 36: Vergleich zwischen maximaler Drehzahl und Spindelleistung bei Teillastbetrieb (S6)

Abbildung 36 stellt dazu vergleichend die Spindelleistung im Teillastbetrieb (S6) zu der maximalen Drehzahl dar. Hierbei repräsentiert die Größe der einzelnen Kreisflächen die Anzahl an Baureihen mit dem jeweiligen Verhältnis. Der Teillastbetrieb S6 ist ein ununterbrochener periodischer Betriebsmodus mit Aussetzbelastung. Der Großteil der analysierten Baureihen verfügt über eine maximale Drehzahl zwischen 20.000 und 30.000 min^{-1} . Für den höheren Drehzahlbereich von 40.000 bis 60.000 min^{-1} sind lediglich 19 % der betrachteten Baureihen geeignet. Das Spektrum der Spindelleistung erstreckt sich von 3 kW bis zu 128 kW. Die durchschnittliche Spindel besitzt eine maximale Drehzahl von 30.200 min^{-1} und eine Leistung von 46 kW. Der Median liegt bei einer Drehzahl von 30.000 min^{-1} bei einer Leistung von 28 kW. Damit liegt die Hälfte aller Maschinen in diesem Bereich.

Hinsichtlich der Datenbasis sei Folgendes angemerkt: Existierten innerhalb einer Baureihe mehrere Werte für Drehzahl oder Spindelleistung, da zum Beispiel vom Hersteller mehrere Spindeln optional angeboten werden, wurde jeweils die höchsten Werte von Spindelleistung und Drehzahl zum Vergleich herangezogen.

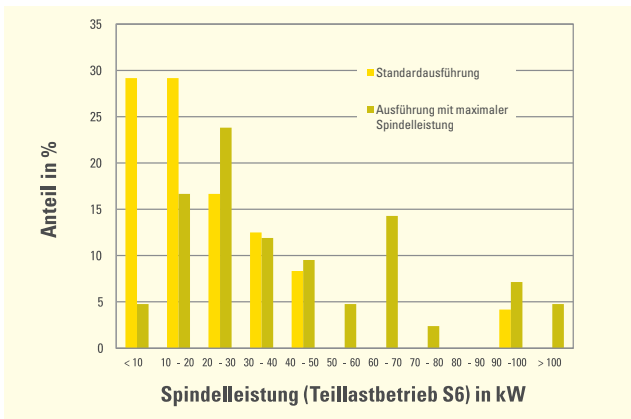


Abbildung 37: Gegenüberstellung von Standard- und Maximalleistung (Teillastbetrieb S6) der Hauptspindeln

Innerhalb einer Baureihe zeigen sich große Unterschiede zwischen den Standardspindeln und den Spindeln mit maximaler Leistung. Der Unterschied zwischen der maximalen und minimalen Leistung der Hauptspindel für alle untersuchten Baureihen ist in Abbildung 37 veranschaulicht.

Abbildung 38 vergleicht die maximale Drehzahl mit der maximalen Vorschubgeschwindigkeit der X-Achsen der unterschiedlichen Baureihen miteinander. Die Größe der Kreisflächen repräsentiert jeweils die Menge betroffener Baureihen. Es wird deutlich, wie breit gefächert das angebotene Spektrum der abgefragten Bearbeitungszentren ist. So verfügen zum Beispiel einzelne Baureihen über eine maximale Vorschubgeschwindigkeit von lediglich 20 m/min, während andere in der Lage sind 180 m/min zu realisieren. Hierbei liegt die durchschnittliche Vorschubgeschwindigkeit bei 70 m/min. Nahezu 85 % der Baureihen besitzen dabei einen Vorschub zwischen 50 und 100 m/min. Die Vorschubgeschwindigkeiten der restlichen 15 % der Baureihen liegen je zur Hälfte über bzw. unter diesem Bereich.

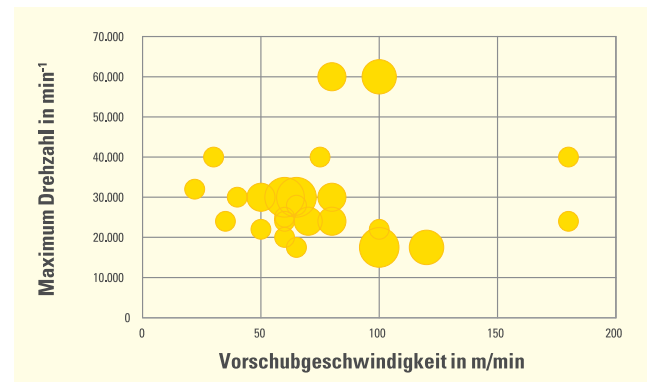


Abbildung 38: Vergleich der maximalen Vorschubgeschwindigkeit mit der maximalen Drehzahl

Für die Datenbasis die Abbildung 38 zugrunde liegt, gelten dieselben Randbedingungen wie beim Vergleich der maximalen Spindelleistungen und der Maximaldrehzahlen. Auch hier wurde bei Mehrfachnennungen jeweils der maximale Wert der Hersteller verwendet.

3.2.6 WERKZEUGMAGAZINE

Die Verteilung hinsichtlich der verfügbaren Werkzeugwechselplätze wird mit Abbildung 39 verdeutlicht. Die Angaben der Maschinenhersteller zur maximalen Größe des Werkzeugmagazins machen deutlich, dass ein großer Teil der Baureihen Platz für 1 bis 50 Werkzeuge besitzt. In diesem Bereich liegen rund 40 % der Baureihen. Bezieht man zusätzlich die Magazine mit 75 und

Kapitel 3

100 Plätzen mit in die Betrachtung ein, so entspricht dies 55 % der betrachteten Baureihen. Bei größeren Werkzeugmagazinen handelt es sich eher um spezielle Lösungen, wobei zu beachten ist, dass 20 % der Bearbeitungssysteme auch die Speicherung von mehr als 200 Werkzeugen ermöglichen.

Die Bandbreite an Werkzeugplätzen variiert nicht nur zwischen den Baureihen sondern auch innerhalb einer Baureihe teilweise sehr deutlich. So haben 70 % aller Baureihen weniger als 50 Wechselplätze als Standard. Seitens der Hersteller besteht in diesem Bereich eine hohe Flexibilität, auch sehr hohe Anzahlen an Werkzeugplätzen zu realisieren. Dies äußert sich dadurch, dass 60 % der Baureihen optional mit über 50 Werkzeugplätzen ausrüstbar sind.

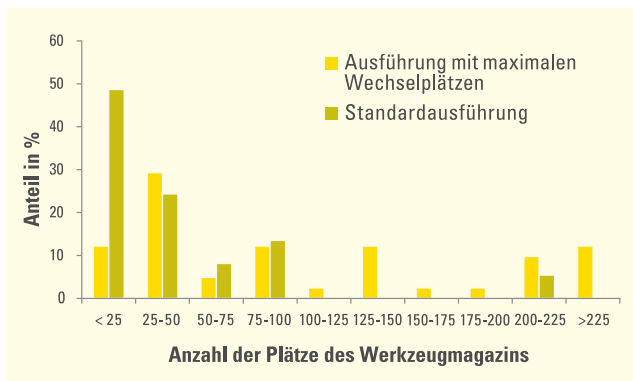


Abbildung 39: Verteilung der maximalen und minimalen Anzahl der Plätze des Werkzeugmagazins

3.2.7 KÜHLUNG UND SCHMIERUNG

Grundsätzlich stehen im Zusammenhang mit der Nassbearbeitung von Werkstoffen sowohl die Überflutungsschmierung als auch die interne Zuführung von Kühlmittel zur Verfügung.

Mit 78 % besteht bei der Mehrzahl der am Markt angebotenen Anlagen die Möglichkeit zum Einsatz von Überflutungsschmierung. Hierbei ist diese Technik bei rund der Hälfte der Baureihen bereits Standard und bei weiteren 33 % zumindest als Option verfügbar. Die Angaben zur internen Kühlmittelzufuhr weichen nur sehr gering von denen der Überflutungsschmierung ab. Dies liegt daran, dass eine Vielzahl der Baureihen beide Systeme ermöglichen.

19 % der Baureihen bieten keine Möglichkeit zur Nassbearbeitung an. Dieser Sachverhalt wird in Abbildung 40 zusammengefasst.

Minimalmengenschmierung und Druckluft zur Kühlung lassen sich mit allen hier aufgeführten Baureihen einsetzen. Beide Verfahren sind bei rund der Hälfte der Baureihen bereits als Standard integriert. Interessant ist in diesem Zusammenhang, dass mehr als 26 % der Baureihen keine Kühlungs-Technik als Standard verwenden. Dies zeigt, dass für einige Baureihen Kühlung nur vereinzelt nachgefragt wird bzw. eine gewisse Anzahl der Kunden darauf verzichtet. Ein möglicher Grund hierfür sind unter Umständen die Kosten, welche durch die notwendige zusätzliche Anlagentechnik entstehen.

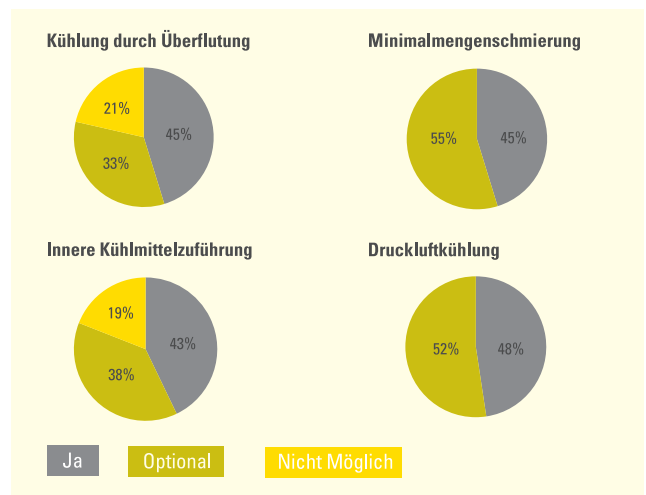


Abbildung 40: Verfügbare Kühlungs- und Schmierungsmethoden

3.2.8 SPANNTÉCHNIK

Die grundsätzliche Frage, wie ein Werkstück für die anstehende Bearbeitungsaufgabe innerhalb der Maschine fixiert wird, hat grundsätzlichen Einfluss sowohl auf die Bearbeitungsqualität, als auch auf die Prozessdauer. Mechanische Spannsysteme werden in fast 80 % der Baureihen eingesetzt, wobei in weiteren 20 % die Option für deren Einsatz besteht. Lediglich in einer Baureihe besteht keine Möglichkeit, die Werkstücke mechanisch zu spannen. Die Häufigkeit der unterschiedlichen Aufspanntechniken der erfassten Maschinen ist in Abbildung 41 aufgetragen.

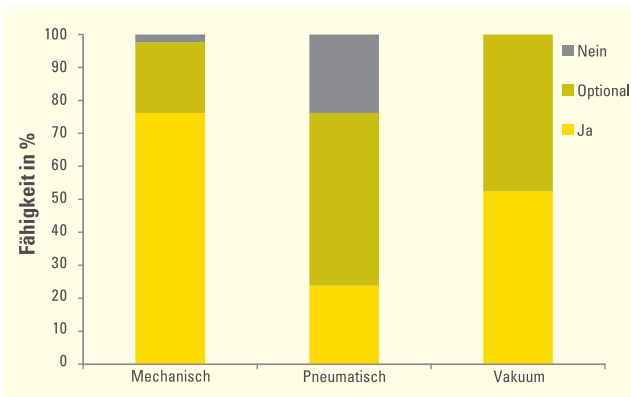


Abbildung 41: Häufigkeit unterschiedlicher Aufspanntechniken

Die Vakuumtechnik ist die am zweithäufigsten verbreitete Technik hinsichtlich der Spanntechnik. Die Vakuumtechnik ist in allen Baureihen vorhanden bzw. optional verfügbar. Die pneumatische Spanntechnik ist nur in 20 % der Anlagen als Standard vorhanden. 50 % der Baureihen bieten jedoch diese Technik als Option.

Grundsätzlich besteht innerhalb einer Baureihe die Möglichkeit der Kombination unterschiedlicher Spanntechniken. 50 % der Baureihen verwenden zwei unterschiedliche Spanntechniken, wobei die Kombination von mechanischer Spanntechnik und Vakuumtechnik die häufigste Kombination darstellt.

3.2.9 AUTOMATISIERUNG

Für jedes Unternehmen im Bereich der Bearbeitung stellt sich die grundsätzliche Frage, inwieweit eine automatisierte Zuführung oder Entnahme der Bauteile wirtschaftlich sinnvoll ist. Sowohl bei der Beladung wie auch beim Entnehmen der Werkstücke ist eine Automatisierung in nur 5 % der Baureihen Standard, wie in Abbildung 42 deutlich wird. Einschränkend muss dabei betrachtet werden, dass es sich im Bereich der Automatisierung häufig um spezielle Lösungen handelt, welche darüber hinaus nicht allein durch den Maschinenhersteller bereitgestellt bzw. angeboten werden.

Es zeigt sich jedoch, dass eine grundsätzliche Nachfrage nach Automatisierungseinrichtungen besteht, da bei 75 % der Baureihen eine Automatisierung möglich ist. Es sollte jedoch nicht unbeachtet bleiben, dass mit 20 % eine doch relativ hohe Anzahl

der Baureihen keine Option zur Ausrüstung mit Automatisierungseinrichtungen bietet. Dieser Sachverhalt und die geringe standardmäßige Ausstattung mit Automatisierungseinrichtungen der Baureihen zeigen, dass für einige Unternehmen in der Branche lediglich die manuelle Bestückung ihrer Baureihen von Bedeutung ist, bzw. im Umkehrschluss ein vollautomatisierter Prozess für ihre Applikationen nicht vonnöten ist.

Diese These wird ebenfalls durch die Häufigkeit der Werkstückidentifizierung untermauert. Dabei erkennt die Maschine automatisch das jeweilige Werkstück und wählt automatisch das jeweilige Bearbeitungsprogramm aus. Diese Technik wird von den Maschinenherstellern in keiner Baureihe als Standard angeboten, kann jedoch bei fast 75 % der Baureihen optional nachgerüstet werden.

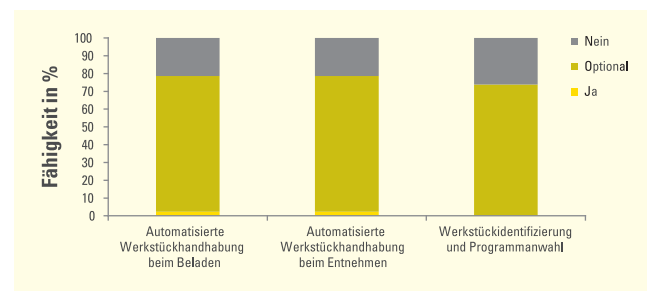


Abbildung 42: Automatisierungsfähigkeit der Baureihen

3.2.10 MASCHINENSICHERHEIT

Bei der Bearbeitung von CFK-Bauteilen entstehen je nach Verfahren und Werkstoff große Mengen an Spänen und Stäuben. Vor allem die Stäube sind aufgrund ihrer elektrischen Leitfähigkeit und ihrer Partikelgröße eine Gefahr für die elektrischen Bauteile einer Maschine. Darüber hinaus muss der Maschinenbediener vor dem übermäßigen Einatmen dieser Stäube sowie vor herausgeschleuderten Bruchstücken von Werkzeug und Werkstück geschützt werden. Die Gefährdungspotentiale bei der Bearbeitung von faserverstärkten Kunststoffen wurden ausführlich im Kapitel „Sicherheit“ beschrieben.

Kapitel 3

Wie in Abbildung 43 deutlich wird, besteht für nahezu alle Baureihen die Möglichkeit einer kompletten Kapselung der Maschine, wobei diese Technik nur bei 38 % der Baureihen den Standard darstellt. Der Einsatz von staubdichten elektronischen Komponenten ist bei über 50 % der Baureihen Standard und kann bei weiteren 30 % nachgerüstet werden. Bei den 20 % der Baureihen, die über keinen derartigen Schutz verfügen, ist zu bedenken, dass sich die Marktanalyse nicht ausschließlich auf die Bearbeitung von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen beschränkt. Für die Bearbeitung von Kunststoffen, glasfaserverstärkten Kunststoffen oder Metallen ist eine staubdichte Abdichtung der Elektronikkomponenten von geringerer Bedeutung.

Eine weitere Problematik ist die Verunreinigung von Lagern oder Gleitbahnen durch generierte Späne und Stäube. Hierfür bieten die Maschinenhersteller zwei grundsätzliche Lösungen an. Es besteht die Möglichkeit einer einfachen staubdichten Abdeckung der Gleitbahnen oder dem gezielten Erzeugen eines Überdrucks in diesen Bereichen, um ein Eindringen der Stäube zu verhindern.

Beide Techniken werden bei weniger als 20 % der Baureihen als Standard verwendet. Die Anzahl an Baureihen, bei denen eine staubdichte Abdeckung verfügbar ist, liegt bei 65 % bzw. bei 55 % für den Schutz durch Überdruck. Betrachtet man speziell Baureihen, welche für die Bearbeitung von faserverstärkten Kunststoffen geeignet sind, besitzen 90 % der Baureihen eines der beiden Systeme oder wenigstens die Option zum Schutz der Gleitbahnen.

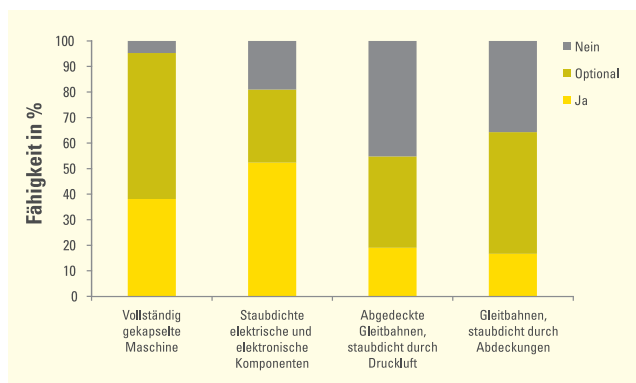


Abbildung 43: Auftreten verschiedener Sicherheitskonzepte zur Minimierung des Gefährdungspotentials von Werker, Umwelt und Maschine

Aus Abbildung 44 geht hervor, dass die werkzeugnahe Absaugung am häufigsten realisiert ist. 38 % der Baureihen setzen diese Technik als Standard ein. 24 % der Baureihen haben ab Werk eine Raumabsaugung. Werkzeuginterne Absaugungssysteme haben lediglich 12 %, wobei diese Möglichkeit den Angaben zu Folge bei 60 % der Baureihen nicht vorhanden ist.

Über die Option, den Volumenstrom an die aktuelle Bearbeitungssituation anzupassen, verfügen fast 75 % der Baureihen nicht. Lediglich 7 % der Hersteller bieten diese Möglichkeit an. Dies zeigt, dass diese Maßnahme zur Energieeinsparung durch Absaugung mit geregelterm Volumenstrom nur von sehr wenigen Marktteilnehmern genutzt wird.

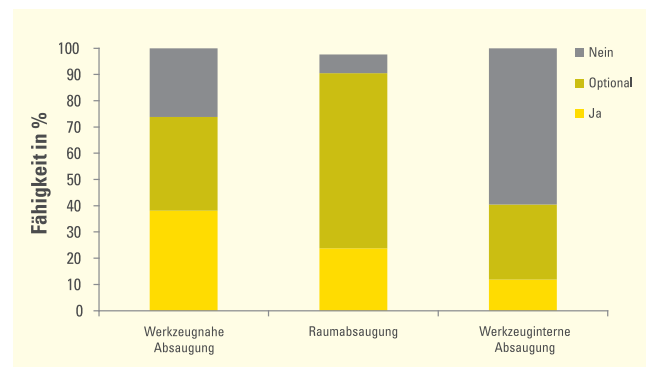


Abbildung 44: Marktanteile verschiedener Absaugkonzepte

FRAUNHOFER IPA, ABTEILUNG LEICHTBAUTECHNOLOGIEN

Die Schwerpunkte der Abteilung Leichtbautechnologien liegen auf der Bearbeitung und Montage sowie auf Automatisierungsprozessen von Leichtbauwerkstoffen. Die Abteilung Leichtbautechnologien ist mit dem Institut für Werkzeugmaschinen IfW der Universität Stuttgart verbunden, das als grundlagenorientierte Basis fungiert. Organisatorisch ist die Abteilung in das Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA integriert, eines der größten Institute für angewandte Forschung der Fraunhofer-Gesellschaft. Um die Wettbewerbsfähigkeit in den Unternehmen zu verbessern und Arbeitsplätze zu erhalten, entwickelt das Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA innovative, umweltfreundliche und kostengünstige Produkte und Produktionsabläufe.

Vielfältige Forschungs- und Entwicklungsfragen am Fraunhofer IPA beschäftigen sich mit dem Themengebiet Leichtbau. So werden z.B. im Bereich der Orthopädie Leichtbaulösungen entwickelt. Die Abteilung Biomechanische Systeme setzt bei der Entwicklung eines neuen Prothesenfußes konsequent auf neue Materialien im Bereich Faserverbund, Hochleistungskunststoffe und neue Herstellungserfahren, um dem permanenten Spagat zwischen hohen Lasten bei minimaler Masse und höchster Ausfallsicherheit (bei der Realisierung von Orthesen und Prothesen) gerecht zu werden.

Die Abteilung Funktionale Materialien entwickelt Werkstoffe und die dazu benötigten Herstellprozesse für Leichtbauanwendungen. Ausgehend von der Materialsimulation werden gezielt hochfeste Materialpaarungen und Composite entwickelt. Dabei werden alle relevanten Verstärkungsmechanismen und Materialien (kohlenstoffhaltige Filamente, bspw. Carbon Nanotubes, Carbon Nanohorns, Kohlestofffasern, Graphen Nanoplatlets) auf ihren Einsatz hin untersucht und optimiert.

Auf dem Gebiet konstruktiver Leichtbau und Werkstoffleichtbau betätigt sich die Abteilung Generative Verfahren und Digitale Drucktechnologie. Sie entwickelt funktionale Oberflächen und dreidimensionale Strukturen, die durch die generative Fertigung eine erhebliche Systemintegration erlauben.

Die Abteilung Leichtbautechnologien befasst sich unter anderem mit der Entwicklung adaptiver, werkzeugnaher Späneerfassungskonzepte für CFK- und GFK-Verbundwerkstoffe. Es wird an den tribologischen Eigenschaften der Schneiden sowie der Substratvorbehandlung von Zerspanungswerkzeugen geforscht, um die Aufbauschneidenbildung bei der Zerspannung von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen zu verringern. Zudem werden die Geometrien und Grundkörper weiterentwickelt sowie die Prozesse der Werkzeugherstellung simuliert. In einem umfangreichen, interdisziplinären Entwicklungsprojekt werden Bearbeitungsstrategien sowie dazugehörige modulare Werkzeuge und Technologieplattformen konzipiert und umgesetzt. Weitere Tätigkeitsfelder sind der konstruktive und stoffliche Leichtbau in Fertigungs- und Betriebsmitteln zur Material- und Energieeinsparung sowie Erhöhung der Effizienz und Ergonomie.

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1:	Vergleich der mechanischen Eigenschaften unterschiedlicher Leichtbauwerkstoffe ³	8
Abbildung 2:	Sandwichstrukturen mit verschiedenen Kern- und Deckwerkstoffen. GFK-Deckschicht mit Kern aus Polyurethan-Schaum (unten), GFK-Deckschicht mit Wabenkern aus Polyethylen (mitte), Holzfaserverplatte mit Papierwabenkern (oben) ⁴	10
Abbildung 3:	Leichtbau durch Formgebung und Werkstoff am Beispiel generativer Fertigung am Fraunhofer IPA ⁴	10
Abbildung 4:	Längsträger aus modernen Stahlvarianten für den Leichtbau im Fahrzeug, links vor und rechts nach einem Crashtest ⁷	11
Abbildung 5:	Aluminiumschaum ohne Deckschicht ⁴	12
Abbildung 6:	Mittels spanender Verfahren gefertigtes, komplexes Werkstück aus Aluminium ⁴	13
Abbildung 7:	Beispiele für keramische Bauteile. Erodierendes Zahnrad (links) und drahtgeschnittener Schneidstempel aus DIMACER® (ZTA-TiC) (rechts) ⁹	15
Abbildung 8:	Unterschiedliche Lamine aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff, teils mit GFK-Deckschichten ⁴	16
Abbildung 9:	Beispiele für Sandwichmaterialien aus faserverstärkten Deckschichten mit Schaum- bzw. Wabenstruktur ¹¹	18
Abbildung 10:	Schadensbild an einer massiven Buchenholzprobe mit Querschnitt 6 mm x 20 mm nach einer Zugbelastung von 1200 kg ⁴	19
Abbildung 11:	Beispiel für moderne Architektur mit dem Werkstoff Holz: Dachfläche von 10 Metern Spannweite bei nur 4 cm Materialstärke ¹²	20
Abbildung 12:	Schädigungsmechanismen und –bilder bei der Zerspannung von CFK-Werkstoffen ¹³	23
Abbildung 13:	Composite Router ⁴	24
Abbildung 14:	Kompressionsfräser und deren Funktionsprinzip ⁴	25
Abbildung 15:	Schaftfräser mit PKD-Schneiden ⁴	26
Abbildung 16:	Kreissägen von CFK mit PKD-bestücktem Kreissägewerkzeug mit angepasster Schneidengeometrie ⁴	26
Abbildung 17:	Bohrer mit speziell für Faserverbundwerkstoffe geschliffener Spitze ⁴	29
Abbildung 18:	Thermographische Aufnahme der Fräsbearbeitung eines FVK-Werkstoffs ⁴	29
Abbildung 19:	Bearbeitungsergebnisse bei der Zerspannung mit (oben) und ohne (unten) Kühlschmierstoff ²⁵	30
Abbildung 20:	Einfluss von Kühlschmierstoff auf den Werkzeugverschleiß, nach Weinert (2004) ²¹	31
Abbildung 21:	Einsatz von Minimalmengenschmierung zur Kühlschmierung der Werkzeugschneide ²⁹	32
Abbildung 22:	Äußere Kryokühlung: Kaltaerosoles Schmiermittel wird außen auf das Werkzeug gesprüht ³¹	33
Abbildung 23:	Innere Kryokühlung: Kühlmittel wird intern zugeführt, wobei sich auf der Oberfläche des Werkzeugs Eiskristalle gebildet haben ³²	33

Abbildung 24: Leichtbaueinhausung nach Beschussprüfung (links) und Schutzvorhang an Holzbearbeitungsmaschine (rechts) ³³	34
Abbildung 25: Verteilung der Grundpreise der erfassten Baureihen	38
Abbildung 26: Kostenstruktur der Baureihen deutscher und anderer europäischer Maschinenhersteller	39
Abbildung 27: Auf den erfassten Baureihen bearbeitbare Werkstoffe	39
Abbildung 28: Typische Anwendungsbereiche der erfassten Baureihen	41
Abbildung 29: 5-Achs-Fahrportal Bearbeitungszentrum ³⁹	41
Abbildung 30: 5-Achs-Bearbeitungszentrum mit Schwenktisch ⁴⁰	42
Abbildung 31: 3-Achs-Fahrportal Bearbeitungszentrum ⁴¹	42
Abbildung 32: Vergleich der Grundstrukturen der analysierten Baureihen	43
Abbildung 33: Schematische Darstellung der unterschiedlichen Bauweisen in Anlehnung an ⁴²	43
Abbildung 34: Beziehung zwischen Genauigkeit (kleine Kreisfläche = hohe Genauigkeit; große Kreisfläche = niedrige Genauigkeit), Preisklasse und Länge der X-Achse für verschiedene Achsantriebssystem	44
Abbildung 35: Verteilung unterschiedlicher Achsantriebssysteme in X-, Y- und Z-Achse	45
Abbildung 36: Vergleich zwischen maximaler Drehzahl und Spindelleistung bei Teillastbetrieb (S6)	46
Abbildung 37: Gegenüberstellung von Standard- und Maximalleistung (Teillastbetrieb S6) der Hauptspindeln	46
Abbildung 38: Vergleich der maximalen Vorschubgeschwindigkeit mit der maximalen Drehzahl	47
Abbildung 39: Verteilung der maximalen und minimalen Anzahl der Plätze des Werkzeugmagazins	48
Abbildung 40: Verfügbare Kühlungs- und Schmierungsmethoden	49
Abbildung 41: Häufigkeit unterschiedlicher Aufspanntechniken	49
Abbildung 42: Automatisierungsfähigkeit der Baureihen	50
Abbildung 43: Auftreten verschiedener Sicherheitskonzepte zur Minimierung des Gefährdungspotentials von Werker, Umwelt und Maschine	51
Abbildung 44: Marktanteile verschiedener Absaugkonzepte	52

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

BAZ	Bearbeitungszentrum
CBN	Kubisches Bornitrid
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
CNC	Computer basierte numerische Steuerung (computerized numerical control)
CVD	Chemische Gasphasenabscheidung (chemical vapor deposition)
DIN	Deutsches Institut für Normung
FVK	Faserverstärkter Kunststoff
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
GLARE	Glasfaserverstärktes Aluminium (glass laminate aluminium reinforced epoxy)
MDF	Mitteldichte Faserplatte
MMS	Minimalmengenschmierung
PKD	Polykristalliner Diamant
PKW	Personenkraftwagen
TRGS	Technische Regeln für Gefahrstoffe
WHO	World Health Organisation

LITERATURVERZEICHNIS

1 McKinsey & Company

Heuss, R., Müller, N., van Sintern, W., Starke, A., & Tschiesner, A. (2012), Lightweight, heavy impact. McKinsey & Company.

2 Seiwert, Hennersdorf, Kiani-Kreß & Brück

Seiwert, M., Hennersdorf A. Kiani-Kreß, R., & Brück, M., (01.12.2011). BMWs riskante Karbon-Wette. Abgerufen am 23.10.2012 von: <http://www.wiwo.de/unternehmen/auto/elektro-autos-bmws-riskante-karbon-wette/5889372.html>

3 e-mobil BW

e-mobil BW GmbH - Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Institut für Werkzeugmaschinen (IfW) Universität Stuttgart, & Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) Institut für Fahrzeugkonzepte. (2012). Leichtbau in Mobilität und Fertigung - Chancen für Baden-Württemberg. Abgerufen am 03.10.2012 von: http://www.e-mobilbw.de/Resources/e-papers/TEAMSTRUNZ_LEICHTBAU_MOBILITAET_FERTIGUNG/

4 Fraunhofer IPA

Eigene Darstellung. Foto.

5 Henning & Moeller

Henning, F. & Moeller, E. (2011). Handbuch Leichtbau: Methoden, Werkstoffe, Fertigung. 1. Aufl. München: Carl Hanser Verlag

6 Klein

Klein, B. (2005). Leichtbau-Konstruktion: Berechnungsgrundlagen und Gestaltung. 6. Aufl. Wiesbaden: Vieweg.

7 ThyssenKrupp Steel AG

www.thyssenkrupp.at. (27.11.2007) Hochfeste Stähle N-A-XTRA und XABO. Abgerufen am 01.10.2012 von: http://www.thyssenkrupp.at/files/qs/Kataloge/Grobblech/N-a-xtra_Xabo%20Flyer.pdf

8 Schulz

Schulz, D. (04.07.2012) Magnesium Walzhälbzeuge - mit Leichtigkeit zerspanen. Abgerufen am 01.10.2012 von: <http://www.pressebox.de/presse-meldungen/Impv-leichtmetall-produktion-verarbeitung-gmbh/boxid/521547>

9 IFKB Universität Stuttgart

Institut für Fertigungstechnologie keramischer Bauteile IFKB. Foto.

10 Witten & Jahn

Witten, E., & Jahn, B. (09.2011). Composites-Marktbericht 2011 AVK. Abgerufen am 01.10.2012 von: http://www.avk-tv.de/files/20110929_marktbericht_2011__deutsch.pdf

11 Propex Fabrics GmbH

Propex Fabrics GmbH. Foto.

12 ILEK Universität Stuttgart

Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren ILEK. Foto.

13 Heisel, Schneider, & Pfeifroth

Heisel, U., Schneider, M. & Pfeifroth, T. (22.06.2012). Spanende Bearbeitung von CFK-Werkstoffen - Lösungskonzepte und technologische Entwicklungen. LMT Kundensymposium 2012.

14 Müller-Hummel

Müller-Hummel, P. (2012). Bearbeiten von modernen Faserverbundwerkstoffen: Herausforderungen bei der mechanischen Bearbeitung von Leichtbaumaterialien. VDI-Z 154 S. 40–43.

15 Giroto, López de Lacalle, Lamikiz, Iliescu & Gutiérrez,

Giroto, L., López de Lacalle, L.N., Lamikiz, A., Iliescu, D., & Gutiérrez, E. (2010), Machinability Aspects of Polymer Matrix Composites. In Paulo Davim, J. Machining Composite Materials. S. 39–107. John Wiley & Sons (ed.).

16 Hufschmied

Hufschmied, R. (2011). GFK- und CFK-Bauteile effizient bearbeiten. Abgerufen am 01.10.2012 von: <http://www.maschinenmarkt.vogel.de/themenkanale/konstruktion/werkstoffe/articles/321033/>

17 Pauksch, Holsten, Linß, & Tikal

Pauksch, E., Holsten, S., Linß, M., & Tikal, F. (2008). Zerspantechnik: Prozesse, Werkzeuge, Technologien. 12. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner.

18 fertigung.de

fertigung.de. (04.07.2011). Composites und kein Ende: Leichtbau/Composites: Trends bei CFK und Composites bei Kennametal. Abgerufen am 15.10.2011 von: <http://www.fertigung.de/2011/07/composites-und-kein-ende/>.

19 Denkena & Tönshoff

Denkena, B., & Tönshoff, H. K. (2011). Spanen: Grundlagen. 3. Aufl. Berlin: Springer Berlin.

20 Hufschmied

Hufschmied, R. (11.2008). Eurocopter bevorzugt Hufschmied Bohrwerkzeuge: Partnerschaft auf Grundlage markanter Kosteneinsparungen!. Abgerufen am 04.10.2011 von: <http://www.hufschmied.net/media/Eurocopter0708.pdf>

21 Weinert & Kempmann

Weinert, K., & Kempmann, C. (2004). Cutting Temperatures and Their Effects on the Machining Behaviour in Drilling Reinforced Plastic Composites. *Advanced Engineering Materials* 8, S. 684–689.

22 Köpf, Feistritzer & Udier

Köpf, A., Feistritzer, S., & Udier, K. (2006). Diamond coated cutting tools for machining of non-ferrous metals and fibre reinforced polymers. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* 24, S. 354–359.

23 Gaitonde, Karnik, Rubio, Correia, Abrão & Davim

Gaitonde, V., Karnik, S., Rubio, J. C., Correia, A. E., Abrão, A., & Davim, J. P. (2008). Analysis of parametric influence on delamination in high-speed drilling of carbon fiber reinforced plastic composites. *Journal of Materials Processing Technology* 203, S 431 – 438.

24 Karnik, Gaitonde, Rubio, Correia, Abrão, & Davim

Karnik, S., Gaitonde, V., Rubio, J. C., Correia, A. E., Abrão, A. & Davim, J. P. (2008). Delamination analysis in high speed drilling of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using artificial neural network model. *Materials & Design* 29, S 1768–1776.

25 Blaser Swissslube AG

Blaser Swissslube AG. Foto.

26 Richter

Richter, A. (08.2007). Hole-some and Clean. *Cutting Tool Engineering*. Abgerufen am 15.10.2012 von: <http://www.ctemag.com/pdf/2007/0708-Holemaking.pdf>

27 Korn

Korn, D. (11.2005). Machining Composites by Conventional Means. *Modern Machine Shop*. Abgerufen am 15.10.2012 von: <http://www.mmsonline.com/articles/machining-composites-by-conventional-means>

28 Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV)

Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV). (November 2010). Minimalmengenschmierung in der spanenden Fertigung. Abgerufen am 29.10.2012 von: http://www.bghm.de/uploads/tx_ttproducts/datasheet/BGI_718_02.pdf

29 CERATIZIT Austria GmbH

CERATIZIT Austria GmbH. Foto.

30 Bhattacharya, Allen, & Mander

Bhattacharyya, D., Allen, M. & Mander, S. (1993). Cryogenic Machining of Kevlar Composites. *Materials and Manufacturing Processes* 8, S 631–651.

31 Rother Technologie GmbH & Co. KG.

Rother Technologie GmbH & Co. KG. Foto.

32 MAG IAS, LLC

MAG IAS, LLC. Foto.

33 IfW Universität Stuttgart

Institut für Werkzeugmaschinen IfW. Foto.

34 www.baua.de

Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA), Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS). Technische Regeln für Gefahrstoffe 900 (TRGS 900) Arbeitsplatzgrenzwerte. (Januar 2006). Abgerufen am 13.09.2012 von: http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Gefahrstoffe/TRGS/pdf/TRGS-900.pdf?__blob=publicationFile&v=12

35 World Health Organization

World Health Organization. (1997). Determination of airborne fibre number concentrations. Angerufen am 16.10.2012 von: http://www.who.int/occupational_health/publications/en/oehairborne-fibre.pdf

36 www.baua.de

Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA), Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS). Technischen Regeln für Gefahrstoffe 500 (TRGS 500) Schutzmaßnahmen. (Januar 2008). Abgerufen am 13.09.2012 von: http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Gefahrstoffe/TRGS/pdf/TRGS-500.pdf?__blob=publicationFile&v=3

37 Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV)

Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (Februar 2008). Schleifen, Bürsten und Polieren von Aluminium: Vermeiden von Staubbränden und Staubexplosionen. Abgerufen am 19.10.2012 von: <http://publikationen.dguv.de/dguv/pdf/10002/bgr109.pdf>

38 Berufsgenossenschaft Metall Süd

Berufsgenossenschaft Metall Süd. (23.12.2005). BGR 204 Umgang mit Magnesium. Abgerufen am 19.10.2012 von: http://www.bghm.de/fileadmin/user_upload/Arbeitsschuetzer/Gesetze_Vorschriften/BG-Regeln/BGR/BGR_204.pdf

39 FOOKE GmbH

FOOKE GmbH. Foto.

40 CHIRON-WERKE GmbH & Co. KG

CHIRON-WERKE GmbH & Co. KG. Foto.

41 BIESSE DEUTSCHLAND GmbH

BIESSE DEUTSCHLAND GmbH. Foto.

42 Weck & Brecher

Weck, M.; Brecher, C. (2006). Werkzeugmaschinen - Konstruktion und Berechnung. 8. Aufl. Berlin: Springer-Verlag.

MARKTÜBERSICHT

Hersteller				vorge-sehene Werk-stoffe	typischer Anwen-dungsbe-reich	Bauart			Achsen							Aufspann-technik			Spin-deln				
Hersteller	Maschinentyp und Baureihe	Anzahl Maschinen innerhalb der Baureihe	Preisklasse (Tausend €)	FVK=Faserverstärkte Kunststoffe / K=Kunststoffe / Al=Aluminium / M=Magnesium / T=Titan / S=Stahl	Au=Automotive / Ae=Aero / W=Windkraft / S=sonstige	Grundstruktur: F=Fahrportal (Gantry) / P=Portal fest / A=Ausleger / GS=Gelenkstab / S=sonstige			Achsantriebssysteme: K=Kugelumlaufspindeln / L=Lineardirektantriebe / Z=Zahnstange			Achswerte [m]			Achswerte [Grad]	Achsgeschwindigkeiten [m/min]	Achsbeschleunigungen [m/s ²]	Axialschub [kN]	wiederholbare Konturgenauigkeit am Bauteil [µm]	mechanisch	pneumatisch	mit Vakuumtechnik	Antriebsleistung (Teillastbetrieb S6) [kW]
						x-Achse	y-Achse	z-Achse	x-Achse	y-Achse	z-Achse	(A / B / C)	(x / y / z)	(x / y / z)	(x / y / z)	(x / y / z)	(x / y / z)	j / n / o	j / n / o	j / n / o			
Belotti	FLA	7	150 - 400	FVK, K	Au, Ae, W, S	F	Z	Z	Z	2,6 - 6,5	1,8 - 3,2	0,9 - 2	±120 / - / 540	80 / 80 / 60	3 / 3 / 3	0,7	100 / 100 / 80	j	o	o	15		
Belotti	FLU	3	180 - 260	FVK, Al, K, M	Au, Ae	F	Z	Z	Z	1,7 - 4	2,6 - 4	0,9 - 1,3	±120 / - / 540	80 / 80 / 50	3 / 3 / 3	0,7	50 / 50 / 25	j	o	o	15		
Belotti	MDL	6	350 - 800	FVK, K, Al, M	Au, Ae, W, S	F	Z	Z	Z	6 - 30	3 - 7,5	1,3 - 4	±120 / - / 540	50 / 50 / 30	2 / 2 / 2	1,2	30 / 30 / 30	j	o	o	20 bis 40		
Belotti	SKY	3	350 - 650	FVK, K, Al, M	Au, Ae, S	F	K	K	K	1,7 - 3	2,6 - 3,6	1,3	±120 / - / 540	50 / 50 / 30	1,5 / 1,5 / 1,5	1,2	25 / 25 / 25	j	o	o	20 bis 40		
BIESSE	Klever FT	4	ab 50	FVK, K, Al	Au, S	F	Z	Z	K	2,7 - 4	1,4 - 2	0,26	- / - / -	22 / 22 / 12	3 / 3 / 3	-	50	j	n	o	9		
BIESSE	Rover A G FT / Skill G FT	9	ab 70	FVK, K, Al	Au, S	F	Z	Z	K	3 - 7	1,8 - 2,8	0,326	- / - / endlos	60 / 60 / 20	5 / 5 / 5	-	50	n	n	j	12		
CHIRON-WERKE	MILL	7	ab 160	FVK, K, Al, M, T, S	Au, Ae, S	S	K / L	K	K	0,8 - 8	bis 0,92	bis 0,63	±120 oder endlos / ±110 / endlos	60 / 60 / 60	5 / 5 / 5	5 / 5 / 10	15	o	o	o	75		
CMS	Antares	4	ab 155	FVK, K, Al, M	Au, Ae, W, S	F	Z	Z	Z	2,6	1,5	1,2	- / ±120 / ±270	80 / 80 / 70	5 / 5 / 5	-	-	j	j	j	7,5 bis 18		
CMS	ARES	18	ab 170	FVK, K, Al, M	Au, Ae, W, S	F	Z	Z	Z	2,6 - 6	1,5 - 2,6	1,2	- / ±120 / ±270	80 / 80 / 70	5 / 5 / 5	-	-	j	j	j	7,5 bis 18		
CMS	AVANT	84	ab 150	FVK, K, Al, M	Au, Ae, W, S	F	Z	Z	K	2,05 - 3,97	3,5 - 9,8	0,3 - 0,77	- / ±120 / ±270	100 / 100 / 30	3 / 3 / 3	-	-	j	j	j	7,5 bis 28		
CMS	KARAT	36	ab 135	FVK, K, Al, M	Au, Ae, W, S	P	Z	Z	K	2,61 - 7,93	2,49 - 7	0,3 - 1,2	- / ±120 / ±270	100 / 100 / 30	3 / 3 / 3	-	-	j	j	j	7,5 bis 28		
CMS	POSEIDON	64	ab 200	FVK, K, Al, M	Au, Ae, W, S	F	Z	Z	Z	2,6 - 8,5	3 - 60	2,6 - 8,5	- / ±120 / ±270	100 / 100 / 40	3 / 3 / 3	-	-	j	j	j	7,5 bis 28		
DATRON	M10pro	1	ab 100	Al, FVK, K, M, S	S	F	K	K	K	1,08	0,8	0,24	-110 bis +15 / - / endlos	30 / 30 / 30	5 / 5 / 5	-	-	o	o	o	3		
EiMa	Gamma S	2	ab 200	FVK, K, Al	Au, Ae	F	Z	Z	Z	3	2	1	±100 / - / ±230	70 / 70 / 40	4 / 4 / 4	-	40	j	o	o	18		
EiMa	Gamma T	2	ab 400	FVK, K, Al	Au, Ae	F	L	L	Z	3 - 8	2 - 5	1 - 2	±100 / - / ±230	100 / 100 / 40	4 / 4 / 4	-	30	j	o	o	31		
EiMa	Gamma XT	2	ab 550	FVK, K, Al, S, T	Au, Ae, S	F	Z	Z	Z	3 - 8	2 - 5	1,5 - 2	±100 / - / ±360	50 / 60 / 40	4 / 4 / 4	-	20	j	o	o	100		
F. Zimmermann	FZ33-5	-	ab 960	FVK, K, Al, M, S	Au, Ae, S	F	Z	Z	Z	3 - 40	2,5 - 5	1,25 - 2,5	±110 / - / ±360	60 / 60 / 60	5 / 5 / 5	49,8 / 21,7 / 32,5	-	j	o	o	45		
Fooke	ENDURA® 1000LINEAR	4	-	FVK, K, Al, S	Au, Ae, W, S	F	Z	L	L	5 - 60	2 - 8	1 - 3	±275 / - / ±110	40 / 65 / 65	5 / 5 / 5	-	-	o	o	o	bis 100		
Fooke	ENDURA® 600LINEAR	2	-	FVK, K, Al	Au, Ae, W, S	F	L	L	L	4 - 10	2,8 oder 3,5	1,2 oder 1,5	±275 / - / ±110	65 / 65 / 65	3,5 / 3,5 / 3,5	-	-	o	o	o	bis 45		
Fooke	ENDURA® 700LINEAR	3	-	FVK, K, Al, S	Au, Ae, W, S	F	L	L	L	2,2	2,8 oder 3,5	1,2	±275 / - / ±110	65 / 65 / 65	3,5 / 3,5 / 3,5	-	-	o	o	o	bis 45		
Fooke	ENDURA® 900LINEAR	4	-	FVK, K, Al, S, T	Au, Ae, W, S	F	L	L	L	3 - 30	2 - 4,5	1 - 3	±275 / - / ±110	65 / 65 / 65	10 / 10 / 10	-	-	o	o	o	bis 100		
Forest-Liné	V-Star	-	ab 1200	FVK, K, Al	Au, Ae	F	L	L	L	3 - 40	2 - 4,5	0,75 - 1,5	±110 / - / ±400	60 / 60 / 40	3 / 3 / 3	-	50	o	o	o	bis 120		

Spindeln		Kühlung und Schmierung				Aggregate				Steuerung	Automatisierung				Absaugung				Sicherheit						
maximales Moment [Nm]	maximale Drehzahl [1/min]	Kühlschmierstoffe	Minimalmengenschmierung	innerer Kühlmittelzuführung	Druckluft	Bohraggregate	Kreissäge	Nebenspindel	Winkelgetriebe	Werkzeugmagazin: Anzahl der Plätze	Fabrikat und Typ	Werkzeugcodiersystem	automatisierte Werkstückhandhabung beim Beladen	automatisierte Werkstückhandhabung beim Entnehmen	Werkstückidentifizierung mit automatisierter Programmwahl	werkzeugnahe Absaugung (N)	Raumabsaugung (R)	werkzeugeinterne Absaugung	Absaugvolumenstrom [m³/h]	Regelung des Volumenstrom nach Bearbeitungssituation	CNC-gesteuerte Ausrichtung der Absaughaube	vollständig gekapselte Maschine	Staubdichte elektrische und elektronische Komponenten	abgedeckte Gleitbahnen, staubdicht durch Druckluft	Gleitbahnen, staubdicht durch Abdeckungen
		j/n/o	j/n/o	j/n/o	j/n/o	j/n/o	j/n/o	j/n/o	j/n/o			j/n/o	j/n/o	j/n/o	j/n/o	j/n/o	j/n/o	j/n/o		j/n	j/n/o	j/n/o	j/n/o	j/n/o	j/n/o
12	24000	o	j	o	j	o	j	n	o	8 - 40	FANUC / Siemens / Heidenhain	j	o	o	o	j	o	n	R=16000 N=2000	n	j	o	o	o	o
12	24000	o	o	o	j	o	n	n	o	8 - 24	Siemens / Heidenhain	j	o	o	o	j	j	n	R=10000 N=2000	n	j	o	o	o	o
42 bis 60	18000 oder 30000	o	j	o	j	o	j	n	o	16 - 60	Siemens / Heidenhain	j	o	o	o	j	o	n	N=3300	n	j	o	o	o	o
42 bis 60	18000 oder 30000	j	o	o	j	n	n	n	o	24 - 48	Siemens / Heidenhain	j	o	o	o	o	o	n	R=16000 N=3300	n	j	o	o	j	o
-	32000	n	o	n	j	j	n	n	o	6 - 10	-	n	n	n	n	j	n	n	3000	j	n	n	j	n	n
-	24000	n	o	n	j	j	o	o	o	12 - 21	Baluff	j	o	o	n	j	n	n	3000 - 5000	j	j	n	j	n	o
180	bis 20000	o	o	o	o	j	o	n	o	24 / 40 / 60 / 92 / 163	Siemens / FANUC / Heidenhain	o	o	o	o	n	j	n	1600 - 2200	n	n	j	o	n	n
42	24000 oder 60000	j	j	j	j	o	o	o	o	8 / 16 / 32 / 48	FANUC / Siemens / Heidenhain	o	o	o	o	j	j	j	-	n	j	o	j	j	o
42	24000 oder 60000	j	j	j	j	o	o	o	o	8 / 16 / 32 / 48	FANUC / Siemens / Heidenhain	o	o	o	o	j	j	j	-	n	j	o	j	j	o
78	24000 oder 60000	j	j	j	j	n	j	o	o	8 / 16 / 32 / 48	OSAI / FANUC / Siemens	o	o	o	o	j	j	j	-	n	j	o	j	j	o
78	24000 oder 60000	j	j	j	j	n	j	o	o	8 / 16 / 32 / 48	OSAI / FANUC / Siemens	o	o	o	o	j	j	j	-	n	j	o	j	j	o
78	24000 oder 60000	j	j	j	j	n	j	o	o	8 / 16 / 32 / 48 / 120	FANUC / Siemens / Heidenhain	o	o	o	o	j	j	j	-	n	j	o	j	j	o
1	40000	n	j	n	j	n	n	n	n	22	DATRON	n	o	o	n	o	o	n	-	n	n	j	j	n	n
14	24000	n	j	j	j	n	j	n	j	12	Sinumeric 840 Dsl	o	o	o	o	o	j	n	1000	n	o	j	j	o	n
50	22000	j	j	j	j	n	j	n	j	30	iTNC530 / 840 Dsl	o	o	o	o	o	j	n	-	n	o	j	j	o	n
142	22000	j	j	j	j	n	j	n	j	30 / 60 / 100	iTNC530 / 840 Dsl	o	o	o	o	o	j	n	-	n	o	j	j	o	n
67	25000	o	o	o	o	o	n	n	o	-	Heidenhain iTNC 530 Hsci / Siemens 840 D	o	o	o	o	o	o	n	-	o	o	o	o	o	j
bis 600	bis 30000	o	o	o	o	j	o	o	o	bis 250	Heidenhain / Siemens / Fidia	o	o	o	o	o	-	o	-	o	o	o	o	o	o
bis 80	bis 30000	o	o	o	o	j	n	o	o	bis 140	Heidenhain / Siemens / Fidia	o	o	o	o	o	o	o	-	o	o	o	o	o	o
bis 150	bis 30000	o	o	o	o	j	n	o	o	bis 68	Heidenhain / Siemens / Fidia	o	o	o	o	o	o	o	-	o	o	o	o	o	o
bis 600	bis 30000	o	o	o	o	j	o	o	o	bis 250	Heidenhain / Siemens / Fidia	o	o	o	o	o	o	o	-	o	o	o	o	o	o
163	30000	j	o	o	o	j	n	o	o	30 - 100	Siemens 840 Dsl	j	o	o	o	o	o	n	R=6000 N=700	n	o	o	j	j	n

Hersteller				vorge-sehene Werk-stoffe	typischer Anwen-dungsbe-reich	Bauart			Achsen										Aufspann-technik			Spin-deln					
Hersteller	Maschinentyp und Baureihe	Anzahl Maschinen innerhalb der Baureihe	Preisklasse (Tausend €)	FK= Faserverstärkte Kunststoffe / K= Kunststoffe / Al= Aluminium / M= Magnesium / T= Titan / S= Stahl	Au= Automotive / Ae= Aero / W= Windkraft / S= sonstige	Grundstruktur: F= Fahrportal (Gantry) / P= Portal fest / A= Ausleger / GS= Gelenkstab / S= sonstige			Achsantriebssysteme: K= Kugelumlaufspindeln / L= Lineardirektantriebe / Z= Zahnstange			Achswerte [m]			Achswerte [Grad]		Achsgeschwindigkeiten [m/min]		Achsbeschleunigungen [m/s ²]		Axialschub [kN]		wiederholbare Konturgenauigkeit am Bauteil [µm]	mechanisch	pneumatisch	mit Vakuumtechnik	Antriebsleistung (Teillastbetrieb S6) [kW]
						x-Achse	y-Achse	z-Achse	x-Achse	y-Achse	z-Achse	(A / B / C)	(x / y / z)	(x / y / z)	(x / y / z)	(x / y / z)	(x / y / z)	j / n / o	j / n / o	j / n / o							
GEISS	FZ Direct Drive	-	ab 350	Al, FVK, K, M	Ae, Au, S	P	L	L	L	bis 6	bis 8	bis 1,7	±135 / - / ±260	180 / 180 / 71	15 / 7 / 10	1	50	j	o	j	19 bis 28						
GEISS	FZ ECO-Plus	-	ab 130	Al, FVK, K, M	Ae, Au, S	P	K	K	K	ab 1,4	ab 1	ab 0,4	±135 / - / ±260	75 / 75 / 70	4 / 3 / 7	ab 0,5	200	j	o	j	6 bis 28						
GEISS	FZ LIN	-	ab 170	Al, FVK, K, M	Ae, Au, S	P	L	L	K	bis 6	bis 8	bis 1,7	±135 / - / ±260	180 / 180 / 70	15 / 7 / 7	ab 0,5	100	j	o	j	6 bis 28						
GROB-WERKE	G350	1	288	Al, M, T, S, K, FVK	Au, Ae, S	-	K	K	K	0,6	0,77	0,805	-180 bis +60 / endlos / -	65 / 42 / 90	5 / 4 / 7	8	-	j	o	o	35 bis 53						
GROB-WERKE	G550	1	360	Al, M, T, S, K, FVK	Au, Ae, S	-	K	K	K	0,8	0,95	1,02	-180 bis +60 / endlos / -	65 / 50 / 80	6 / 5 / 8	8	-	j	o	o	35 bis 65						
Handt-mann	Gantry RS	6	800	Al, FVK	Au, Ae	F	Z	Z	Z	2,5 - 3,5	2,6	1	-120 bis +5 / - / ±220	70 / 70 / 55	4,9 / 4,9 / 4,9	50 / 25 / 35	-	o	o	o	bis 60						
Homag	BMG300	3	100	FVK, K, AL	Au, Ae, S	F	Z	Z	K	3,8 - 6,5	2,38	0,45	±100 / - / ±361	35 / 60 / 25	2,5 / 2,5 / 4	-	250	j	j	j	18,5						
Homag	BMG500	12	130	FVK, K, AL	Au, Ae, W, S	F	Z	Z	K	4,24 - 8,34	2,85 - 3,55	0,6	±100 / - / ±361	60 / 60 / 25	2,5 / 2,5 / 4	-	150	j	j	j	28						
Homag	BMG600	12	160	FVK, K, AL	Au, Ae, W, S	F	Z	Z	K	4,24 - 8,34	2,85 - 3,55	0,91	±100 / - / ±361	60 / 60 / 25	2,5 / 2,5 / 4	-	150	j	j	j	28						
Homag	BOF600	4	180	FVK, K, AL	Au, Ae, W, S	P	Z	Z	K	4,9 - 7,15	2,55 - 5,44	0,6	±100 / - / ±361	80 / 60 / 30	6 / 6 / 4	-	150	j	j	j	28						
Homag	BOF700	12	250	FVK, K, AL	Au, Ae, W, S	P	Z	Z	K	5,25 - 7,8	-	0,6 oder 0,95	±100 / - / ±361	80 / 60 / 30	6 / 6 / 4	-	150	j	j	j	28						
Mtorres	TorresMill	2	1700 - 2500	Al, FVK, T, S	Ae, W	F / A	Z	Z	Z / L	5,5 - 50	3 - 6	1 - 2	±110 / - / ±360	60 / 60 / 30	1,5 / 1,5 / 1,5	1,5	20	o	o	o	50						
SW-machines	BA322	1	460	Al, M, K, T, S	Au, Ae, W, S	F	K	K	K	0,3	0,45	0,375	-	65 / 75 / 75	10 / 10 / 15	8	8	j	n	j	2 x 32						
SW-machines	BAW04-22	1	640	Al, M	Au, Ae, W, S	F	L	L	L	0,4	0,5	0,425	-	100 / 100 / 100	13 / 12 / 23	10	8	j	n	j	2 x 35						
SW-machines	BAW04-42	1	750	Al, M	Au, Ae, W, S	F	L	L	L	0,2	0,5	0,425	-	100 / 100 / 100	10 / 10 / 22	10 / 15 / 15	8	j	n	j	4 x 32						
SW-machines	BAW06-12	1	685	Al, M	Au, Ae, W, S	F	L	L	L	1,15	0,6	0,5	-	120 / 120 / 120	16 / 12 / 30	6 / 10 / 6	6	j	n	j	35						
SW-machines	BAW06-1W	1	670	Al, M	Au, Ae, W, S	F	L	L	L	1,15	0,6	0,5	-	120 / 120 / 120	16 / 10 / 30	6 / 10 / 6	8	j	n	j	35						
SW-machines	BAW06-22	1	750	Al, M	Au, Ae, W, S	F	L	L	L	0,6	0,6	0,5	-	100 / 100 / 100	10 / 10 / 20	10 / 10 / 2 x 5	8	j	n	j	2 x 35						
SW-machines	BAW06-2W	1	730	Al, M	Au, Ae, W, S	F	L	L	L	0,6	0,6	0,5	-	100 / 100 / 100	10 / 10 / 20	10 / 10 / 2 x 5	8	j	n	j	2 x 35						
SW-machines	BAW08-22	1	950	Al, M	Au, Ae, W, S	F	L	L	L	0,8	0,9	0,65	-	120 / 120 / 120	10 / 10 / 20	2 x 6 / 20 / 2 x 6	8	j	n	j	2 x 35						

Spindeln		Kühlung und Schmierung				Aggregate				Steuerung	Automatisierung				Absaugung				Sicherheit						
maximales Moment [Nm]	maximale Drehzahl [1/min]	Kühlschmierstoffe	Minimalmengenschmierung	innerer Kühlmittelzuführung	Druckluft	Bohraggregate	Kreissäge	Nebenspindel	Winkelgetriebe	Werkzeugmagazin: Anzahl der Plätze	Fabrikat und Typ	Werkzeugcodiersystem	automatisierte Werkstückhandhabung beim Beladen	automatisierte Werkstückhandhabung beim Entnehmen	Werkstückidentifizierung mit automatisierter Programmwahl	werkzeugnahe Absaugung (N)	Raumabsaugung (R)	werkzeugeinterne Absaugung	Absaugvolumenstrom [m³/h]	Regelung des Volumenstrom nach Bearbeitungssituation	CNC-gesteuerte Ausrichtung der Absaughaube	vollständig gekapselte Maschine	Staubdichte elektrische und elektronische Komponenten	abgedeckte Gleitbahnen, staubdicht durch Druckluft	Gleitbahnen, staubdicht durch Abdeckungen
		j/n/o	j/n/o	j/n/o	j/n/o	j/n/o	j/n/o	j/n/o	j/n/o			j/n/o	j/n/o	j/n/o	j/n/o	j/n/o	j/n/o	j/n/o		j/n	j/n/o	j/n/o	j/n/o	j/n/o	j/n/o
11,5	bis 24000	o	o	o	o	o	o	o	o	12 - 48	Sinumerik 840D SL	o	o	o	o	o	o	o	nach Bedarf	o	-	o	j	o	o
11,5	bis 40000	o	o	o	o	o	o	o	o	12 - 48	Sinumerik 840D SL	o	o	o	o	o	o	o	nach Bedarf	o	-	o	j	o	o
11,5	bis 40000	o	o	o	o	o	o	o	o	12 - 48	Sinumerik 840D SL	o	o	o	o	o	o	o	nach Bedarf	o	-	o	j	o	o
47 bis 223	12.000 bis 28.000	j	o	j	o	n	n	n	n	40 - 205	Siemens / Heidenhain / usw.	j	o	o	o	n	o	n	600	n	n	j	o	n	o
47 bis 575	12.000 bis 30.000	j	o	j	o	n	n	n	n	60 - 221	Siemens / Heidenhain / usw.	j	o	o	o	n	o	n	800	n	n	j	o	n	o
bis 60	20000 bis 24000	o	o	o	o	n	n	n	o	28	Siemens / Heidenhain	o	j	j	o	o	o	n	4000	j	o	j	j	o	o
15	24000	n	o	n	j	o	o	o	o	26	Homag Power Control	n	o	o	o	j	o	o	N=6200	n	j	o	j	n	j
21	30000	n	o	n	j	o	o	o	o	90	Homag Power Control	o	o	o	o	j	o	o	N=7000	n	j	o	j	n	j
21	30000	n	o	n	j	o	o	o	o	90	Homag Power Control	o	o	o	o	j	o	o	N=7000	n	j	o	j	n	j
21	30000	n	o	n	j	o	o	o	o	216	Homag Power Control	o	o	o	o	j	o	o	N=7000	n	j	o	j	n	j
21	30000	n	o	n	j	o	o	o	o	216	Homag Power Control	o	o	o	o	j	o	o	N=7000	n	j	o	j	n	j
120	30000	o	o	o	o	j	o	o	o	20 - 240	Siemens 840D	j	o	o	o	j	n	n	3600	n	o	o	j	j	j
2 x 72	bis 17500	j	j	j	o	n	n	n	n	2 x 20 / 2 x 32 / 2 x 40	Siemens 840D / Bosch MTX / Fanuc 31i	o	n	n	n	n	o	n	1200	n	n	j	n	n	n
2 x 80	bis 17500	j	j	j	o	n	n	n	n	2 x 36 - 2 x 116	Siemens 840D / Bosch MTX	o	n	n	n	n	o	n	1200	n	n	j	n	n	n
4 x 72	bis 17500	j	j	j	o	n	n	n	n	4 x 18 - 4 x 58	Siemens 840D	o	n	n	n	n	o	n	1200	n	n	j	n	n	n
80	bis 17500	j	j	j	o	n	n	n	n	42 / 84 / 144	Siemens 840D	o	n	n	n	n	o	n	1200	n	n	j	n	n	n
80	bis 17500	j	j	j	o	n	n	n	n	42 / 84 / 144	Siemens 840D	o	n	n	n	n	o	n	1200	n	n	j	n	n	n
2 x 80	bis 17500	j	j	j	o	n	n	n	n	2 x 42 / 2 x 72	Siemens 840D	o	n	n	n	n	o	n	1200	n	n	j	n	n	n
2 x 80	bis 17500	j	j	j	o	n	n	n	n	2 x 42 / 2 x 72	Siemens 840D	o	n	n	n	n	o	n	1200	n	n	j	n	n	n
2 x 80	bis 17500	j	j	j	o	n	n	n	n	2 x 42 / 2 x 70 / 2 x 91	Siemens 840D	o	n	n	n	n	o	n	1200	n	n	j	n	n	n

Impressum

Herausgeber

e-mobil BW GmbH – Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie Baden-Württemberg
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA)
Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg
Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg

Redaktion

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA)
Marco Schneider, Christoph Birenbaum, Alistair Forbes, Tim Mayer, Jochen Burkhardt

Koordination Studie

e-mobil BW GmbH
Anja Walter
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA)
Alistair Forbes

Layout/Satz/Illustration

TEAM STRUNZ | tswa.de
Agentur für Marketing & Kommunikation

Fotos

@ Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA)

Druck

Karl Elser Druck GmbH
Kißlingweg 35
75417 Mühlacker
Germany

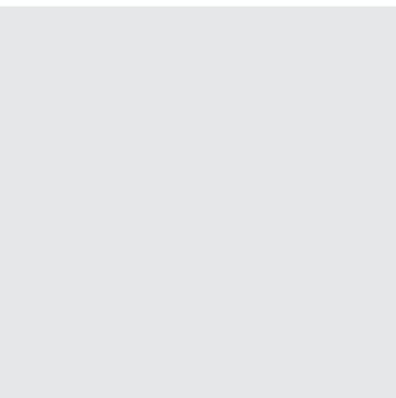
Auslieferung und Vertrieb

e-mobil BW GmbH
Leuschnerstraße 45
70176 Stuttgart
Phone: 0711 / 892385-0
Fax: 0711 / 892385-49
E-Mail info@e-mobilbw.de
www.e-mobilbw.de

Erscheinungsjahr 2012

© Copyright liegt bei den Herausgebern

Alle Rechte vorbehalten. Dieses Werk ist einschließlich seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Herausgebers unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen. Für die Richtigkeit der Herstellerangaben wird keine Gewähr übernommen.



e-mobil BW GmbH

Leuschnerstr. 45 | 70176 Stuttgart

Telefon: +49 711 892385-0

Telefax: +49 711 892385-49

info@e-mobilbw.de | www.e-mobilbw.de

