

# 1

## Einleitung

Dr. Ruben Schlutter

Der deutsche Werkzeugbau gehört zu den am höchsten entwickelten weltweit und gehört zu den Allstars der Werkzeugmärkte. Die weiteren Allstars sind China, die USA, Japan, Südkorea. Diese zeichnen sich durch eine hohe Werkzeugkompetenz und ein großes Produktionsvolumen aus. Der deutsche Werkzeugmarkt zeichnet sich dabei durch die höchste Werkzeugbaukompetenz und den fünftgrößten Markt aus. Damit ist der deutsche Werkzeugbau der wichtigste in Europa. Im Jahr 2020 hatte der deutsche Werkzeugmarkt ein Marktvolumen von ca. 1,84 Mrd € für Spritzgießwerkzeuge und ca. 400 Mio € für Druckgusswerkzeuge. Besonders hochpreisige und komplexe Werkzeuge werden in Deutschland gefertigt. [BLK+22]

Ebenso wie die Qualität der Spritzgießwerkzeuge immer weiter steigt, steigen auch die Anforderungen an die produzierten Kunststoffformteile. Neben den Anforderungen an das Design und die Oberfläche des Kunststoffformteils spielt auch die Fertigung eine wesentliche Rolle im Anforderungsprofil. Die Spritzgießwerkzeuge müssen dafür immer größeren Belastungen standhalten, sei es durch den Einsatz abrasiver oder korrosionsfördernder Kunststoffe, Füll- und Verstärkungsstoffe oder Additive oder auch durch technologische Forderungen, wie das Erreichen eines bestimmten Fließweges oder das optische Kaschieren einer Bindaht. Innerhalb des Spritzgießprozesses können dabei vielfältige Fehler an den Formteilen und den Werkzeugen auftreten, die durch den Einsatz von Beschichtungen in den Werkzeugen gelöst oder minimiert werden können.

Das vorliegende Fachbuch fasst den gegenwärtigen Stand der Wissenschaft und Technik im Bereich der Beschichtungstechnologie zusammen. Die Auswahl geeigneter Schichten ist dabei immer ein Zusammenspiel zwischen dem Werkzeugbauer, dem Fertiger der Kunststoffformteile, dem Abnehmer der Kunststoffformteile und dem Beschichter.

## ■ 1.1 Mögliche Fehler an Formteilen

### **Glanzunterschiede und Tigerlines**

Der Glanz eines Formteils entsteht dadurch, dass auf das Formteil einfallendes Licht reflektiert wird. Je glatter und gleichmäßiger die Oberfläche des Formteils ist, desto gleichmäßiger wird das Licht reflektiert und desto kleiner ist der Streuwinkel des reflektierten Lichtes. Strukturierte Oberflächen im Werkzeug, aber auch eine unterschiedliche Abbildung der Formteilkavität durch den Kunststoff führen zu Unterschieden im Glanzgrad. Im Bereich von Kühlkanälen, Auswerfern oder Wanddickenunterschieden treten Glanzunterschiede häufig auf, da hier Unterschiede in der lokalen Werkzeugwandtemperatur bestehen, die zu einer anderen Abbildungsgenauigkeit der Werkzeugwand im Vergleich zur umliegenden Formteilkavität führen. Beschichtungen beeinflussen ebenfalls den Glanzgrad. Durch unterschiedliche Eigenschaften und Wirkungsweisen der Beschichtungen kann hier keine allgemeingültige Aussage getroffen werden. [KI21]

Ein Spezialfall beim Auftreten von Glanzunterschieden sind Tigerlines. Sie treten vor allem bei der Verwendung von Blends oder Mehrphasensystemen auf. Durch die unterschiedliche Abformung der Formteilkavität durch die jeweilige Phase entstehen alternierende Glanzeindrücke, die zu einer optischen Streifenbildung führen. Hauptursachen für die Bildung von Tigerlines sind das partielle Ankrystallisieren der Randschicht unter hohen Schubspannungen und Unterschiede in der Schmelzeelastizität. Auch die Änderung der Fließfrontgeschwindigkeit kann das Auftreten von Tigerlines begünstigen. [KI21]

### **Matte Stellen im Anschnittbereich**

Im Anschnittbereich werden die Polymerketten der Schmelze stark gedehnt und orientiert. Da die Schmelze an der Werkzeugwand sofort einfriert, können diese Dehnungen und Orientierungen nicht durch Relaxation abgebaut werden. Die Bereiche hoher Orientierung weisen dabei schlechte mechanische Eigenschaften auf und sind sehr empfindlich gegenüber Rissen. Während die Schmelze unter der erstarrten Randschicht entlangfließt, reißt diese auf, sodass die Schmelze in die Risse strömen kann und wieder an der Werkzeugwand erstarrt. Es entstehen Mikrokerben, die zu einer stark gestreuten Lichtreflektion im Bereich des Anschnittes führen. [KI21]

### **Bindenähte**

Wenn mehrere Fließfronten in der Kavität aufeinandertreffen, entsteht eine Binde-naht. Beim Zusammentreffen werden die Fließfronten abgeplattet, durchmischen sich teilweise und verkleben. An der Werkzeugwand entsteht eine Kerbe. Bei strukturierten Oberflächen können zusätzlich Glanzunterschiede auftreten. Diese stellen eine optische und mechanische Fehlstelle dar. [KI21]

### **Entformungsriefen**

Entformungsriefen entstehen während des Ausstoßens des Formteils. Im Speziellen bei strukturierten Oberflächen und Formteilen mit großen Seitenflächen steigt die Entformungskraft stark an. Durch die Strukturierung oder die Oberflächenrauheit, die an den Seitenflächen quer zur Entformungsrichtung liegt, bilden sich mikroskopische Hinterschnitte, die zu Entformungsriefen führen können. [KI21]

### **Schallplatteneffekt**

Schallplatteneffekte treten vor allem bei hochviskosen Kunststoffschmelzen in Verbindung mit einer niedrigen Einspritzgeschwindigkeit auf. Während des Einspritzens erstarrt die Randschicht hinter der Fließfront. Parallel kühlt der wandnahe Fließfrontbereich ebenfalls ab, wodurch der Quellstrom der Schmelze in Richtung der Werkzeugwand erschwert wird. Die nachströmende heiße Schmelze kann daher nicht bis zur Fließfront gefördert werden und sich an die Werkzeugwand anlegen. Stattdessen bewirkt sie eine Dehnung innerhalb des Strömungskanal. Wenn der Druck steigt, kommt die Fließfront wieder mit der Werkzeugwand in Berührung. Da diese Bereiche der Fließfront aber stark abgekühlt sind, kann sich kein vollständiger Kontakt mit der Werkzeugwand ausbilden. [KI21]

### **Raue Oberfläche durch Belagbildung**

Belagbildung in der Werkzeugkavität kann vielfältige Ursachen haben. Zum einen neigen verschiedene Kunststoffe, wie unter anderem POM, PP, ABS, PC, PET und PBT, zu Bildung von Belegen. Darüber hinaus kann eine erhöhte Belagbildung bei der Verwendung von Flammschutzmitteln, UV-Absorbern und Farbstoffen oder Gleitmitteln beobachtet werden. Bei der Verwendung der Additive ist die Belagbildung häufig auf eine Mischungsunverträglichkeit zwischen dem Polymer und dem Additiv zurückzuführen. Teilweise begünstigt der Einsatz der Additive auch chemische Reaktionen innerhalb des Polymers oder einen oxidativen Abbau der Polymerketten. [KI21]

Zum anderen kann eine ungünstige Werkzeugauslegung oder Prozessführung die Belagbildung begünstigen. Vor allem bei einer langen Verweilzeit oder hohen Scherung der Kunststoffschmelze kann eine Belagbildung in der Werkzeugkavität auftreten. Eine schlechte Werkzeugentlüftung kann dazu führen, dass die Luft und die Ausgasungen aus der Kunststoffschmelze nicht aus der Formteilkavität entweichen können. Der Einsatz von Schmier- und Trennmitteln führt ebenfalls zu einer Belagbildung. [KI21]

### **Deformation beim Entformen**

Während der Entformung werden Kräfte durch das Entformungssystem auf das Kunststoffformteil aufgebracht. Das Kunststoffformteil kann durch diese Entfor-

mungskraft deformiert werden, weshalb die Entformungskraft kleingehalten werden muss. Die Schwindung wirkt sich dabei direkt auf die Entformungskraft aus und kann durch den Prozess günstig beeinflusst werden. Parallel neigen verschiedene Kunststoffe dazu, auf metallischen Oberflächen zu haften, was zu einer deutlichen Erhöhung der Entformungskraft führt. Auch der Einsatz einer variothermen Prozessführung kann, im Speziellen bei teilkristallinen Kunststoffen, zu einer Erhöhung der Entformungskraft führen, da die Werkzeugkavität detaillierter abgeformt werden kann. [KI21]

### **Auswerferabdrücke und Weißbrüche**

Neben den Glanzunterschieden im Bereich von Auswerfern können auch sichtbare Abdrücke durch die Auswerfer im Formteil entstehen. Diese können unterschiedliche Ursachen haben, wie eine falsche Einpassung der Auswerferlängen oder einen Fehler bei der Dimensionierung des Entformungssystems. Prozessseitig können hohe Entformungskräfte oder ein frühzeitiges Entformen, aber auch hohe Temperaturdifferenzen innerhalb des Werkzeugs oder zwischen Werkzeug und Auswerfer zu Auswerferabdrücken führen. [KI21]

Weißbrüche entstehen durch das Überschreiten einer maximal zulässigen materialabhängigen Verformung. Durch den Weißbruch werden die eingebrachten Spannungen abgebaut. Weißbrüche treten häufig bei der Entformung unter Restdruck oder im Bereich von Auswerfern auf. Dabei werden die äußeren Schichten des Formteils durch die inneren gedehnt. [KI21]

### **Unvollständig gefüllte Formteile**

Bei einem unvollständig gefüllten Formteil wird die Kavität nicht vollständig gefüllt. Dafür kann es verschiedene Ursachen geben. Neben einem zu geringen Dosiervolumen und Entlüftungsschwierigkeiten ist häufig der Einspritzdruck nicht ausreichend oder die Fließweglänge zu hoch, sodass die Kunststoffschmelze einfriert, bevor sie das Ende des Fließweges erreicht. [KI21]

## **■ 1.2 Ableitung eines Lasten- und Pflichtenheftes**

Im Umfeld der Produktentwicklung hat sich ein dreistufiger Entwicklungs- und Dokumentationsprozess, bestehend aus dem Lastenheft, dem Pflichtenheft und der Anforderungsliste, weitgehend durchgesetzt. Tabelle 1.1 beschreibt den Zweck, die Inhalte und die Abgrenzungen der Dokumente. [Con10, Ehr07, PBF+07]

Das Lastenheft wird zuerst vom Auftraggeber erstellt und beschreibt alle Anforderungen und Randbedingungen aus der Sicht des Auftraggebers. Es dient als Grundlage für die Ausschreibung und das Angebot.

Das Pflichtenheft wird vom Lieferanten erstellt. Es enthält das Pflichtenheft und beschreibt die Kundenvorgaben mit den entsprechenden Anforderungen und wie diese bearbeitet und gelöst werden sollen.

Die Anforderungsliste enthält eine systematische Zusammenstellung aller Daten und Informationen. Sie wird durch den Entwickler erstellt und wird zur exakten Klärung der Aufgabe genutzt. Nach der Genehmigung durch den Auftraggeber sind das Pflichtenheft und die Anforderungsliste bindende Dokumente. [Con10, Ehr07, PBF+07]

**Tabelle 1.1** Die verschiedenen Dokumente zur Aufgabenklärung [Con08]

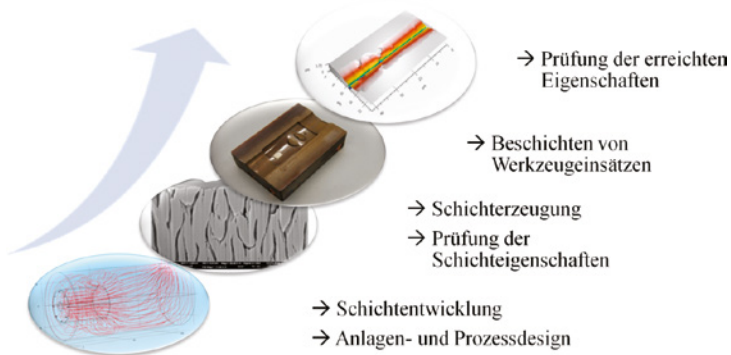
	Lastenheft	Pflichtenheft	Anforderungsliste
Definition	Die Anforderungen des Kunden werden als Liefer- und Leistungsumfang zusammengestellt.	Die Realisierung aller Anforderungen wird durch den Lieferanten beschrieben.	Die Zusammenstellung der Daten und Informationen durch den Entwickler für die Produktentwicklung.
Ersteller	Kunde	Lieferant	Konstrukteur/ Entwickler
Aufgabe	Definition, was und wofür zu lösen ist.	Definition, wie und womit Anforderungen realisiert werden.	Definition von Zweck und Eigenschaften der Anforderungen.
Bemerkung	Das Lastenheft enthält alle Anforderungen und Randbedingungen.	Das Pflichtenheft enthält das Lastenheft mit den Realisierungen der Anforderungen.	Die Anforderungsliste entspricht einem erweiterten Pflichtenheft.

Dieses Vorgehen lässt sich auch auf die Entwicklung von Beschichtungen übertragen, wobei die Fragestellungen aus den unterschiedlichen notwendigen Einzeldisziplinen (u. a. das später zu fertigende Formteil, das zu beschichtende Bauteil, der spätere Fertigungsprozess) definiert und beantwortet werden müssen. Daraus ergibt sich die prinzipielle Gliederung des Lasten- und Pflichtenheftes zur Auswahl und Entwicklung eines geeigneten Beschichtungsprozesses:

- Anforderungen an das Formteil
  - Bauteilgeometrie
  - Bauteiloberfläche und relevante Oberflächen
  - verwendeter Kunststoff

- Anforderungen an das Werkzeug
  - zu beschichtender Werkzeugwerkstoff
  - zu beschichtende Oberfläche (Rauheit, Narbung, ...)
  - infrage kommende Beschichtungstechnologien
  - prinzipielle Entwicklung der Schicht
- Anforderungen an die Funktionalität der Schicht
  - angestrebte Spritzgießparameter
  - Methoden zur Werkzeugreinigung
  - systemspezifische Vorgaben und Restriktionen
- Funktionsprüfungen
  - Mess- und Charakterisierungsverfahren
  - Versuche zur Prüfung der Schichtqualität und Schichthaftung
  - Anwendung im Produktionswerkzeug
  - Effizienzuntersuchungen

Aus dieser prinzipiellen Gliederung entwickelt sich die Methodik zur Entwicklung der Beschichtungen nach Bild 1.1. Dabei werden zuerst mögliche Abscheidungsprozesse simuliert, um das Prozessfenster und die Lage des zu beschichtenden Bauteils im Reaktor für die spätere Beschichtung abschätzen zu können. Im zweiten Schritt erfolgt dann die eigentliche Beschichtung. Neben dem zu beschichtenden Bauteil werden dabei immer auch Metallmünzen an verschiedenen Stellen im Reaktor positioniert. An diesen Münzen werden die nachfolgenden Untersuchungen durchgeführt, um das Bauteil nicht zu beschädigen. Hier wird die Schichtdicke untersucht. Auch der Aufbau mehrlageriger Schichten, das Vorhandensein von Beschichtungsfehlern, die Haftung der Beschichtung auf dem Substrat oder die Härte der Schicht können an dieser Stelle untersucht werden. Eine Bewertung der Schichtoberfläche ist ebenfalls möglich. Je nach Zweck der applizierten Beschichtung werden weitere Untersuchungen durchgeführt, um die Eigenschaften der Beschichtung zu untersuchen und ihre Eignung in Hinblick auf die im Pflichtenheft und der Anforderungsliste definierten Anforderungen sicherzustellen. Die praktische Eignung der Beschichtung muss dann aber immer im realen Anwendungsfall erfolgen. Dabei werden die Beschichtungen im Neuzustand untersucht und nach der Anwendung der Beschichtung erneut, um ein Abtragen oder eine Beschädigung der Beschichtung charakterisieren zu können.



**Bild 1.1** Vorgehensweise bei der Entwicklung von Beschichtungen (Bildquelle: KIMW-F)

## ■ 1.3 Literatur

- [BLK+22] BOOS, W.; LUKAS, G.; KESSLER, N.; ET AL.: *World of Tooling 2022*. Studie der WBA Werkzeugbauakademie Aachen, 2022
- [Con10] CONRAD, K.: *Grundlagen der Konstruktionslehre*. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2010, 5. Auflage
- [Ehr07] EHRENSPIEL, K.: *Integrierte Produktentwicklung*. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2007, 3. Auflage
- [KI21] N. N.: *Ratgeber Formteilfehler Thermoplast*. Firmenschrift der K.I.M.W. NRW GmbH, 2021, 14. Auflage
- [PBF+07] PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHUSEN, J.; GROTHE K.-H.: *Konstruktionslehre*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2007, 7. Auflage

# 2

## Werkzeugstähle und deren Beschichtbarkeit

Markus Pothmann

### ■ 2.1 Einführung in Werkzeugstähle

#### 2.1.1 Definition von Werkzeugstählen

Werkzeugstähle sind eine Gruppe hochfester, hochverschleißfester Stähle, die speziell für die Verwendung bei der Herstellung von Werkzeugen und anderen Komponenten entwickelt wurden, die wiederholten Stößen, Abrieb und hohen Belastungen ausgesetzt sind. Diese Stähle haben in der Regel eine hohe Härte, Zähigkeit und Verformungsbeständigkeit, wodurch sie sich ideal für den Einsatz in Anwendungen eignen, die eine hohe Präzision und lange Werkzeuglebensdauer erfordern.

Die spezifischen Eigenschaften von Werkzeugstählen werden durch sorgfältiges Legieren und Wärmebehandeln erreicht. Legierungselemente wie Wolfram, Molybdän, Chrom und Vanadium werden dem Stahl zugesetzt, um seine Festigkeit, Verschleißfestigkeit und andere wichtige Eigenschaften zu verbessern. Die genaue Kombination dieser Elemente variiert je nach den spezifischen Anforderungen des herzustellenden Werkzeugs.

Werkzeugstähle werden aufgrund ihrer spezifischen Eigenschaften und ihres Verwendungszwecks typischerweise in mehrere Kategorien eingeteilt. Beispielsweise sind Schnellarbeitsstähle für den Einsatz in Hochgeschwindigkeitsbearbeitungsanwendungen konzipiert, während Kaltarbeitsstähle für den Einsatz in Anwendungen konzipiert sind, bei denen das Werkzeug extrem niedrigen Temperaturen ausgesetzt ist. Andere Kategorien von Werkzeugstählen umfassen Warmarbeitsstähle, Stähle für Kunststoffformen und stoßfeste Stähle.

Die hohe Festigkeit und Verschleißfestigkeit von Werkzeugstählen machen sie zu einem idealen Material für den Einsatz in einer Vielzahl industrieller Anwendungen, einschließlich Spritzguss. Die Auswahl des geeigneten Werkzeugstahls für eine bestimmte Anwendung kann jedoch ein komplexer Prozess sein, der eine sorgfältige Berücksichtigung von Faktoren wie der Art des zu formenden Kunststoffes, der gewünschten Oberflächenbeschaffenheit und der erforderlichen Werkzeugstandzeit erfordert.



## 2.1.2 Entwicklung der Werkzeugstähle

Die Entwicklung von Werkzeugstählen wurde durch die Notwendigkeit vorangetrieben, die Leistung und Langlebigkeit von Werkzeugen zu verbessern, die in verschiedenen industriellen Anwendungen verwendet werden. Im Laufe der Zeit haben Fortschritte in der Metallurgie, Wärmebehandlung und Herstellungstechniken zur Schaffung einer breiten Palette von Werkzeugstählen mit unterschiedlichen Eigenschaften und Merkmalen geführt.

Ein wichtiger Meilenstein in der Entwicklung von Werkzeugstählen war die Erfindung des Tiegelstahls Mitte des 19. Jahrhunderts. Diese neue Stahlsorte wurde durch Schmelzen von Eisen und Hinzufügen verschiedener Legierungselemente hergestellt, um ein homogeneres und konsistenteres Material zu schaffen. Es war auch möglich, größere Mengen von Tiegelstahl als andere Stahlsorten herzustellen, was ihn für Hersteller zugänglicher machte.

Im späten 19. und frühen 20. Jahrhundert wurden Werkzeugstählen neue Legierungselemente hinzugefügt, darunter Wolfram, Molybdän, Chrom und Vanadium. Diese Elemente verbesserten die Festigkeit, Zähigkeit und Verschleißfestigkeit von Werkzeugstählen erheblich und machten sie für anspruchsvolle industrielle Anwendungen besser geeignet.

Während des Zweiten Weltkriegs stieg die Nachfrage nach Werkzeugstählen dramatisch an, da sie in großem Umfang bei der Herstellung von Militärausrüstung verwendet wurden. Dies führte zu weiteren Fortschritten in der Werkzeugstahltechnologie, einschließlich der Entwicklung von Schnellarbeitsstählen, die den hohen Temperaturen widerstehen konnten, die durch die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung erzeugt werden.

Heute sind Werkzeugstähle nach wie vor ein wichtiger Werkstoff für eine Vielzahl von industriellen Anwendungen, einschließlich des Spritzgusses. Technologische Fortschritte erweitern weiterhin die Grenzen dessen, was mit Werkzeugstählen möglich ist, und es werden ständig neue Materialien und Fertigungstechniken entwickelt, um ihre Leistung und Zuverlässigkeit zu verbessern.

## 2.1.3 Arten von Werkzeugstählen

Werkzeugstähle werden aufgrund ihrer Eigenschaften und Verwendungszwecke in verschiedene Typen eingeteilt. Die Klassifizierung basiert typischerweise auf den Legierungselementen und der Wärmebehandlung, die erforderlich sind, um bestimmte Eigenschaften zu erreichen.

### **Kohlenstoff-Werkzeugstähle**

Kohlenstoff-Werkzeugstähle wie etwa C75 oder C100S sind die älteste und einfachste Art von Werkzeugstahl. Sie haben einen Kohlenstoffgehalt von 0,6% bis 1,5%. Diese Stähle sind preiswert und einfach zu wärmebehandeln, was sie ideal für kleine Werkzeuge macht, die keine hohe Präzision erfordern. Kohlenstoff-Werkzeugstähle werden üblicherweise für Meißel, Messer und Handwerkzeuge verwendet.

### **Schnellarbeitsstähle**

Schnellarbeitsstähle sind für Hochgeschwindigkeitsbearbeitungsanwendungen ausgelegt, bei denen die Schnittgeschwindigkeit 50 Meter pro Minute übersteigt. Sie enthalten Wolfram, Molybdän und Vanadium als Legierungselemente. Diese Stähle haben ein hohes Maß an Härte, Verschleißfestigkeit und Zähigkeit, was sie ideal für Schneid- und Bohrwerkzeuge macht. Schnellarbeitsstähle werden üblicherweise für Schneidwerkzeuge in der Automobil-, Luft- und Raumfahrt- und medizinischen Industrie verwendet.

### **Stoßfeste Werkzeugstähle**

Stoßfeste Werkzeugstähle wie etwa 1.2714 oder 1.2355 sind darauf ausgelegt, Stoßbelastungen standzuhalten. Sie enthalten Chrom, Molybdän und Vanadium als Legierungselemente. Diese Stähle werden für Anwendungen verwendet, die eine hohe Zähigkeit und Beständigkeit gegen Rissbildung erfordern, wie z. B. Kaltmeißel, Hämmer und andere handgeführte Werkzeuge.

### **Warmarbeitsstähle**

Warmarbeitsstähle wie etwa 1.2343 oder 1.2344 sind für den Einsatz in Hochtemperaturanwendungen konzipiert, bei denen das Werkzeug hoher Beanspruchung und Verschleiß ausgesetzt ist. Sie enthalten Wolfram, Molybdän und Chrom als Legierungselemente. Diese Stähle haben ein hohes Maß an Zähigkeit, Verschleißfestigkeit und thermischer Stabilität, wodurch sie ideal für den Einsatz in Schmiedewerkzeugen, Strangpresswerkzeugen und anderen Warmarbeitsanwendungen sind.

### **Kaltarbeitsstähle**

Kaltarbeitsstähle wie etwa 1.2379 oder 1.2510 sind für den Einsatz in Kaltarbeitsanwendungen konzipiert, bei denen das Werkzeug hoher Beanspruchung und Verschleiß ausgesetzt ist. Sie enthalten Wolfram, Molybdän und Vanadium als Legierungselemente. Diese Stähle haben ein hohes Maß an Härte, Zähigkeit und Verschleißfestigkeit, was sie ideal für den Einsatz in Stanzwerkzeugen und anderen Kaltarbeitsanwendungen macht.

### **Kunststoffformenstähle**

Kunststoffformenstähle wie etwa 1.2311 oder 1.2738 sind für den Einsatz beim Spritzgießen und anderen Kunststoffformen bestimmt. Sie enthalten Chrom, Molybdän und Vanadium als Legierungselemente. Diese Stähle haben ein hohes Maß an Härte, Verschleißfestigkeit und Wärmeleitfähigkeit, was sie ideal für den Einsatz in Kunststoffformanwendungen macht.

### **Hochfeste niedriglegierte (HSLA-) Werkzeugstähle**

HSLA-Werkzeugstähle wie etwa S700MC sind für den Einsatz in hochfesten Anwendungen konzipiert, bei denen das Werkzeug hoher Beanspruchung und Verschleiß ausgesetzt ist. Sie enthalten Molybdän, Chrom und Vanadium als Legierungselemente. Diese Stähle haben ein hohes Maß an Härte, Zähigkeit und Verschleißfestigkeit, was sie ideal für den Einsatz in hochbelasteten Anwendungen wie Zahnrädern und Wellen macht [Tir17].

### **Pulvermetallurgische Werkzeugstähle**

Pulvermetallurgische Werkzeugstähle werden durch Mischen und Pressen feiner Metallpulver hergestellt, die dann bei hohen Temperaturen gesintert werden. Diese Stähle haben ein hohes Maß an Dichte, Zähigkeit und Verschleißfestigkeit, was sie ideal für den Einsatz in hochbelasteten Anwendungen wie Schneidwerkzeugen, Matrizen und anderen Präzisionskomponenten macht.

### **Hochlegierte Werkzeugstähle**

Hochlegierte Werkzeugstähle wie etwa 1.3247 sind für den Einsatz in Anwendungen konzipiert, die eine hohe Festigkeit und Verschleißfestigkeit erfordern. Sie enthalten einen hohen Anteil an Legierungselementen wie Wolfram, Molybdän.

## **2.1.4 Faktoren, die die Materialauswahl bei Spritzguss-Werkzeugstählen beeinflussen**

Die Auswahl des richtigen Werkstoffs für Spritzguss-Werkzeugstähle wird von mehreren Faktoren beeinflusst, darunter:

- **Formteilkomplexität:** Die Komplexität des zu formenden Teils kann sich auf die Auswahl des Werkzeugstahls auswirken. Zum Beispiel können Formteile mit komplizierten Designs einen Werkzeugstahl mit höherer Zähigkeit und Verschleißfestigkeit erfordern, um dem Formprozess standzuhalten.
- **Teilegröße:** Die Größe des zu formenden Teils kann sich auch auf die Auswahl des Werkzeugstahls auswirken. Größere Formteile erfordern möglicherweise einen Werkzeugstahl mit höherer Wärmeleitfähigkeit und besserer Wärmeab-

leitung, um ein Verziehen und Reißen während des Formprozesses zu verhindern.

- Produktionsvolumen: Auch das Volumen der produzierten Formteile kann die Materialauswahl beeinflussen. Die Massenproduktion kann einen Werkzeugstahl erfordern, der der hohen Hitze und Belastung des Dauereinsatzes standhalten kann, während die Produktion in geringeren Mengen die Verwendung von weniger teuren Werkzeugstählen ermöglichen kann.
- Formmaterial: Auch das Formmaterial kann die Auswahl des Werkzeugstahls beeinflussen. Unterschiedliche Materialien haben unterschiedliche Schmelzflusseigenschaften und thermische Eigenschaften, die die Verschleißfestigkeit, Wärmeleitfähigkeit und Gesamtleistung des Werkzeugstahls beeinflussen können.

### **2.1.5 Herausforderungen bei der Auswahl von Spritzguss-Werkzeugstählen**

Die Auswahl des richtigen Werkzeugstahls für den Spritzguss kann aufgrund der zahlreichen Faktoren, die sich auf die Materialauswahl auswirken können, eine Herausforderung darstellen. Einige der Herausforderungen umfassen:

- Abwägen von Leistung und Kosten: Hochleistungs-Werkzeugstähle haben oft einen höheren Preis, was es schwierig macht, die gewünschte Leistung mit den Materialkosten in Einklang zu bringen.
- Kompatibilität mit dem Spritzgussverfahren: Der Werkzeugstahl muss mit dem spezifischen Spritzgussverfahren kompatibel sein, das verwendet wird. Dazu gehört die Fähigkeit des Werkzeugstahls, den Temperatur- und Druckänderungen während des Formprozesses standzuhalten.
- Kundenspezifische Werkzeugstähle: In einigen Fällen können kundenspezifische Werkzeugstähle erforderlich sein, um die spezifischen Anforderungen der Anwendung zu erfüllen. Das kann die Komplexität und die Kosten des Werkzeugstahlauswahlprozesses erhöhen.

### **2.1.6 Zukünftige Entwicklung von Spritzguss-Werkzeugstählen**

Da sich die Fertigungsindustrie ständig weiterentwickelt und die Anforderungen an höhere Qualität, Effizienz und Nachhaltigkeit steigen, wird der Bedarf an fortschrittlichen Materialien und Technologien im Spritzguss immer wichtiger. Die Entwicklung neuer und verbesserter Spritzguss-Werkzeugstähle ist unerlässlich, um den Anforderungen der Industrie gerecht zu werden.

In den letzten Jahren wurden erhebliche Fortschritte bei der Entwicklung von Werkzeugstählen für den Spritzguss erzielt, wobei der Schwerpunkt auf der Verbesserung von Eigenschaften wie Verschleißfestigkeit, Zähigkeit und Korrosionsbeständigkeit lag. Es gibt jedoch noch Raum für Verbesserungen, und die Zukunft der Spritzguss-Werkzeugstähle ist spannend.

Einer der Schlüsselbereiche der Entwicklung von Spritzguss-Werkzeugstählen ist die Einarbeitung fortschrittlicher Legierungselemente. Beispielsweise ist Bor dafür bekannt, die Zähigkeit und Verschleißfestigkeit von Werkzeugstählen zu verbessern, während Stickstoff die Korrosionsbeständigkeit und Ermüdungsfestigkeit verbessern kann. Andere Elemente wie Kupfer und Nickel können ebenfalls eingebracht werden, um spezifische Eigenschaften zu verbessern.

Neben neuen Legierungselementen werden auch Fortschritte in der Mikrostrukturtechnik erforscht. Der Einsatz fortschrittlicher Wärmebehandlungstechniken wie Abschrecken und Anlassen kann eine gleichmäßigere Mikrostruktur erzeugen und die mechanischen Eigenschaften des Werkzeugstahls verbessern. Auch die Einarbeitung nanoskaliger Partikel wie Karbide kann die Verschleißfestigkeit des Werkzeugstahls erhöhen.

Ein weiterer Entwicklungsbereich ist die Verwendung von Oberflächenbeschichtungen oder -behandlungen zur Verbesserung der Leistung von Spritzgusswerkzeugen. Beispielsweise können Beschichtungen mit diamantähnlichem Kohlenstoff (DLC) die Verschleißfestigkeit des Werkzeugstahls erhöhen, während Oberflächenbehandlungen wie Nitrieren die Oberflächenhärte und Korrosionsbeständigkeit verbessern können.

Die zunehmende Forderung nach Nachhaltigkeit in der Fertigung treibt auch die Entwicklung umweltfreundlicherer Spritzguss-Werkzeugstähle voran. Die Verwendung von recycelten Materialien wie Stahlschrott und anderen Metallen wird untersucht, um Abfall zu reduzieren und die Umweltauswirkungen des Herstellungsprozesses zu minimieren.

Insgesamt konzentriert sich die Zukunft der Spritzguss-Werkzeugstähle darauf, die Eigenschaften und Leistung dieser Materialien zu verbessern, um den sich entwickelnden Anforderungen der Fertigungsindustrie gerecht zu werden. Die Integration fortschrittlicher Legierungselemente, Mikrostrukturtechnik, Oberflächenbeschichtungen und Nachhaltigkeitsinitiativen werden alle eine entscheidende Rolle bei der Entwicklung der nächsten Generation von Spritzguss-Werkzeugstählen spielen.

## ■ 2.2 Eigenschaften von Werkzeugstählen

### 2.2.1 Einführung in Spritzguss-Werkzeugstähle

Spritzgießen ist ein Herstellungsverfahren, das zur Herstellung einer breiten Palette von Kunststoffformteilen und -produkten verwendet wird. Beim Spritzgießen werden Kunststoffpellets oder -granulate geschmolzen und in einen Formhohlraum gespritzt, wo sie abkühlen und sich verfestigen, um das gewünschte Formteil zu bilden. Spritzgießen ist ein hocheffizientes und kostengünstiges Verfahren und damit eines der beliebtesten Verfahren zur Herstellung von Kunststoffformteilen.

Spritzgusswerkzeuge sind eine kritische Komponente des Spritzgussverfahrens. Die Werkzeuge müssen so konstruiert und hergestellt werden, dass sie den Belastungen des Formprozesses standhalten. Spritzguss-Werkzeugstähle sind speziell für die Verwendung in Spritzgusswerkzeugen konzipiert und müssen eine einzigartige Kombination von Eigenschaften besitzen, um den Belastungen des Formprozesses standzuhalten.

Werkzeugstähle sind eine Gruppe hochfester Stähle, die zum Schneiden, Umformen und Formen von Materialien verwendet werden. Sie sind bekannt für ihre hohe Härte, Verschleißfestigkeit und Zähigkeit. Spritzguss-Werkzeugstähle müssen ähnliche Eigenschaften wie Standard-Werkzeugstähle aufweisen, müssen aber auch spezifische Eigenschaften aufweisen, um den hohen Drücken, Temperaturen und dem Abrieb im Zusammenhang mit dem Spritzgussverfahren standzuhalten.

Die Eigenschaften von Spritzguss-Werkzeugstählen werden durch ihre Zusammensetzung, Mikrostruktur und Wärmebehandlung beeinflusst. Die Zusammensetzung des Stahls ist entscheidend für die Bestimmung seiner mechanischen Eigenschaften, einschließlich Härte, Zähigkeit und Verschleißfestigkeit. Die Mikrostruktur des Stahls, die durch den Wärmebehandlungsprozess beeinflusst wird, spielt eine entscheidende Rolle bei der Bestimmung der mechanischen Eigenschaften des Stahls.

Die Auswahl des geeigneten Spritzguss-Werkzeugstahls für eine bestimmte Anwendung ist entscheidend für den Erfolg des Formprozesses. Zu den Faktoren, die bei der Auswahl eines Werkzeugstahls berücksichtigt werden müssen, gehören die Art des zu formenden Kunststoffs, das erwartete Produktionsvolumen und die erwartete Werkzeuglebensdauer.

Zusammenfassend sind Spritzguss-Werkzeugstähle eine kritische Komponente des Spritzgussprozesses. Sie müssen sorgfältig ausgewählt werden, um sicherzustellen, dass sie die notwendigen Eigenschaften besitzen, um den Belastungen des Formgebungsprozesses standzuhalten. Auf die spezifischen Eigenschaften von Spritzguss-Werkzeugstählen und ihren Einfluss auf die Eignung für unterschiedliche Anwendungen wird im nächsten Abschnitt näher eingegangen.

## 2.2.2 Eigenschaften von Spritzguss-Werkzeugstählen

Spritzguss-Werkzeugstähle werden aufgrund ihrer Fähigkeit ausgewählt, den Belastungen des Spritzgussverfahrens standzuhalten. Sie müssen bestimmte Eigenschaften aufweisen, um sicherzustellen, dass sie dem hohen Druck, der hohen Temperatur und dem Abrieb im Zusammenhang mit dem Formgebungsprozess standhalten. In diesem Kapitel wird auf die wichtigen Eigenschaften von Spritzguss-Werkzeugstählen eingegangen und wie diese ihre Eignung für den Einsatz im Spritzguss beeinflussen.

### Härte

Die Härte von Spritzguss-Werkzeugstählen ist eine wichtige Eigenschaft, die ihre Beständigkeit gegen Verschleiß und Verformung bestimmt. Je härter der Werkzeugstahl ist, desto widerstandsfähiger ist er gegen Verschleiß und Verformung unter Hochdruckformbedingungen. Mit zunehmender Härte nimmt jedoch die Zähigkeit des Werkzeugstahls ab. Damit der Werkzeugstahl den Belastungen des Formgebungsprozesses standhält, muss ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Härte und Zähigkeit gefunden werden.

### Zähigkeit

Zähigkeit ist die Fähigkeit eines Materials, Rissen oder Brüchen unter Bedingungen hoher Belastung zu widerstehen. Beim Spritzgießen werden Werkzeugstähle stark beansprucht und müssen eine hohe Zähigkeit aufweisen, um Risse oder Brüche zu vermeiden. Die Zähigkeit wird durch die Mikrostruktur des Werkzeugstahls sowie seine Legierungselemente und Wärmebehandlung beeinflusst.

### Verschleißfestigkeit

Spritzguss-Werkzeugstähle müssen eine hohe Verschleißfestigkeit aufweisen, um eine Beschädigung der Werkzeugoberfläche zu vermeiden. Die Verschleißfestigkeit wird durch die Härte des Werkzeugstahls sowie dessen Gefüge und Legierungselemente beeinflusst. Werkzeugstähle mit hoher Verschleißfestigkeit werden typischerweise in Anwendungen eingesetzt, in denen die Werkzeugoberfläche einem hohen Grad an Abrieb ausgesetzt ist, wie z. B. bei der Herstellung von abrasiven Materialien oder Teilen mit rauen Oberflächen.

### Korrosionsbeständigkeit

Korrosionsbeständigkeit ist eine wichtige Eigenschaft für Werkzeugstähle, die beim Spritzgießen verwendet werden, da der Spritzgussprozess korrosiv sein kann. Werkzeugstähle mit hoher Korrosionsbeständigkeit werden typischerweise in Anwendungen verwendet, in denen das Werkzeug korrosiven Materialien oder

Umgebungen ausgesetzt ist. Die Korrosionsbeständigkeit von Werkzeugstählen wird durch ihre Legierungselemente, insbesondere Chrom und Molybdän, beeinflusst.

### **Wärmeleitfähigkeit**

Die Wärmeleitfähigkeit von Spritzguss-Werkzeugstählen ist wichtig, um eine gleichmäßige Temperatur im gesamten Werkzeug aufrechtzuerhalten. Werkzeugstähle mit hoher Wärmeleitfähigkeit sind besser in der Lage, Wärme von der Formteilerfläche abzuleiten, reduzieren das Risiko von Hot Spots und verbessern die Gesamtqualität der Formteile. Die Wärmeleitfähigkeit von Werkzeugstählen wird durch ihre Legierungselemente, insbesondere Kupfer und Nickel, beeinflusst.

### **Bearbeitbarkeit**

Die Bearbeitbarkeit ist eine wichtige Eigenschaft für Spritzguss-Werkzeugstähle, da sie maschinell bearbeitet werden müssen, um die für das Formen erforderlichen komplexen Formen zu erzeugen. Werkzeugstähle mit guter Zerspanbarkeit sind leichter zu bearbeiten und führen zu weniger Verschleiß an den Schneidwerkzeugen. Die Bearbeitbarkeit wird durch die Mikrostruktur des Werkzeugstahls sowie seine Legierungselemente und Wärmebehandlung beeinflusst [RM05].

Zusammenfassend spielen die Eigenschaften von Spritzguss-Werkzeugstählen eine entscheidende Rolle bei der Bestimmung ihrer Eignung für verschiedene Anwendungen. Die in diesem Kapitel erörterten Eigenschaften, einschließlich Härte, Zähigkeit, Verschleißfestigkeit, Korrosionsbeständigkeit, Wärmeleitfähigkeit und Bearbeitbarkeit, müssen bei der Auswahl eines Werkzeugstahls für den Spritzguss sorgfältig berücksichtigt werden. Im nächsten Kapitel gehen werden die verschiedenen Arten von Werkzeugstählen und ihre spezifischen Eigenschaften vorgestellt, die üblicherweise im Spritzguss verwendet werden.

## **2.2.3 Zusammensetzung von Spritzguss-Werkzeugstählen**

Spritzguss-Werkzeugstähle wie 1.2344 oder 1.2311 sind Hochleistungswerkstoffe, die den extremen Bedingungen des Spritzgussverfahrens standhalten. Diese Stähle sind speziell formuliert, um eine hervorragende Festigkeit, Zähigkeit, Verschleißfestigkeit und thermische Stabilität zu bieten und eine lange Lebensdauer und konstante Leistung des Spritzgusswerkzeugs zu gewährleisten. Die Zusammensetzung von Spritzguss-Werkzeugstählen spielt eine entscheidende Rolle bei der Bestimmung ihrer Eigenschaften und Eignung für verschiedene Anwendungen. In diesem Kapitel werden die verschiedenen Arten von Werkzeugstählen und ihre Zusammensetzung vorgestellt, die beim Spritzgießen verwendet werden.



### **Niedriglegierte Werkzeugstähle**

Niedriglegierte Werkzeugstähle werden aufgrund ihrer hervorragenden Kombination aus Zähigkeit und Verschleißfestigkeit häufig bei der Herstellung von Spritzgusswerkzeugen verwendet. Diese Werkzeugstähle enthalten einen geringen Prozentsatz an Legierungselementen, typischerweise weniger als 5%, darunter Chrom, Molybdän und Vanadium. Der Kohlenstoffgehalt in diesen Werkzeugstählen liegt zwischen 0,3% und 0,6% und sie werden oft wärmebehandelt, um die gewünschten Eigenschaften zu erreichen.

### **Hochlegierte Werkzeugstähle**

Hochlegierte Werkzeugstähle sind so konzipiert, dass sie eine außergewöhnliche Verschleißfestigkeit, Zähigkeit und Korrosionsbeständigkeit bieten. Diese Werkzeugstähle enthalten einen höheren Anteil an Legierungselementen als niedriglegierte Werkzeugstähle, oft über 5%. Chrom, Molybdän, Vanadium und Wolfram sind häufig verwendete Legierungselemente in hochlegierten Werkzeugstählen. Der Kohlenstoffgehalt in hochlegierten Werkzeugstählen liegt zwischen 0,7% und 1,5% und sie werden typischerweise wärmebehandelt, um die gewünschten Eigenschaften zu erreichen.

### **Schnellarbeitsstähle**

Schnellarbeitsstähle werden zur Herstellung von Spritzgusswerkzeugen verwendet, die hohe Schnittgeschwindigkeiten und Temperaturen erfordern, wie sie beispielsweise für die Bearbeitung von duroplastischen Kunststoffen verwendet werden. Diese Werkzeugstähle enthalten typischerweise hohe Gehalte an Kohlenstoff, Wolfram, Molybdän und Chrom. Der hohe Kohlenstoffgehalt in Schnellarbeitsstählen reicht von 0,8% bis 1,5%, während die Legierungselemente typischerweise in Mengen von 7% bis 20% vorhanden sind. Schnellarbeitsstähle werden wärmebehandelt, um die gewünschten Eigenschaften zu erreichen, einschließlich hoher Härte, Verschleißfestigkeit und Zähigkeit.

### **Warmarbeitsstähle**

Warmarbeitsstähle sind darauf ausgelegt, den hohen Temperaturen und Drücken beim Spritzgießen standzuhalten. Diese Werkzeugstähle enthalten typischerweise einen hohen Prozentsatz an Chrom, Molybdän und Vanadium sowie andere Legierungselemente wie Wolfram, Kobalt und Nickel. Der Kohlenstoffgehalt in Warmarbeitsstählen liegt zwischen 0,4% und 1,4%, und sie werden wärmebehandelt, um die gewünschten Eigenschaften zu erreichen, einschließlich hoher Härte, Zähigkeit und thermischer Stabilität.

### **Kaltarbeitsstähle**

Kaltarbeitsstähle werden zur Herstellung von Spritzgusswerkzeugen verwendet, die eine hohe Verschleißfestigkeit, Zähigkeit und Maßhaltigkeit erfordern. Diese Werkzeugstähle enthalten typischerweise einen kleinen Prozentsatz an Legierungselementen, einschließlich Chrom, Molybdän, Vanadium und Wolfram. Der Kohlenstoffgehalt in Kaltarbeitsstählen liegt zwischen 0,5% und 1,5%, und sie werden häufig wärmebehandelt, um ihre gewünschten Eigenschaften zu erreichen.

### **Maraging-Werkzeugstähle**

Maraging-Werkzeugstähle sind hochfeste, niedriglegierte Stähle, die üblicherweise bei der Herstellung von Spritzgusswerkzeugen verwendet werden. Diese Werkzeugstähle enthalten einen kleinen Prozentsatz an Kohlenstoff, typischerweise weniger als 0,03%, und einen hohen Prozentsatz an Nickel, Kobalt und Molybdän. Maraging-Werkzeugstähle werden wärmebehandelt, um ihre gewünschten Eigenschaften zu erreichen, zu denen hohe Festigkeit, Zähigkeit und Verschleißfestigkeit gehören.

### **Pulvermetallurgische Werkzeugstähle**

Pulvermetallurgische Werkzeugstähle werden durch ein Verfahren hergestellt, bei dem pulverförmiger Werkzeugstahl mit einem Bindemittel gemischt und die Mischung dann in eine gewünschte Form verdichtet wird. Diese Werkzeugstähle bieten eine hervorragende Verschleißfestigkeit, Zähigkeit und Dimensionsstabilität, wodurch sie sich ideal für den Einsatz in Spritzgusswerkzeugen eignen. Pulvermetallurgische Werkzeugstähle enthalten typischerweise hohe Anteile an Legierungselementen wie Chrom, Molybdän und Vanadium, und ihr Kohlenstoffgehalt liegt im Bereich von 0,4% bis 2,5%. Sie werden wärmebehandelt, um ihre gewünschten Eigenschaften zu erreichen.

### **Edelstähle**

Edelstähle sind eine Gruppe korrosionsbeständiger Stähle, die üblicherweise bei der Herstellung von Spritzgusswerkzeugen verwendet werden. Diese Werkzeugstähle enthalten mindestens 10,5% Chrom, was eine hervorragende Korrosionsbeständigkeit bietet. Sie enthalten auch unterschiedliche Mengen an anderen Legierungselementen wie Nickel und Molybdän, die ihre mechanischen Eigenschaften verbessern können. Rostfreie Stähle sind in mehreren verschiedenen Sorten erhältlich, jede mit ihrer eigenen einzigartigen Kombination von Eigenschaften, und sie werden oft wärmebehandelt, um ihre Festigkeit und Zähigkeit zu verbessern.

# Index

## Symbole

3D-Fähigkeit 59  
3D-Konformität 102  
3-Omega 231

## A

Abbildungsartefakte 124  
Abbildungstreue 164  
Ablagerungsproblem 264  
Abplatzen 284  
Abprodukte 304  
Abrasion 274  
abrasive Füllstoffe 283  
Abrasier Verschleiß 290  
Abrieb 268, 288  
Abriebfestigkeit 271  
Abriebvergleichswert 268, 287  
Abscheidedauer 67  
Abscheiderate 65, 68  
Abscheidetemperatur 60, 305  
Abscheidung  
– elektrolytische 31  
Abscheidungsprozess 46  
Absorption 166, 167  
Absorptionkoeffizienten 183  
Absorptionsbanden 171  
Absorptionsmuster 172  
Abtragsrate 269  
abzuförmende Oberfläche 328  
Aceton-Äquivalent 255  
Acetylacetonate 56  
Adatom 43, 46  
Additive 343  
Adhäsion 339  
Adhäsionstest 278  
adhäsiver Verschleiß 290  
Admittanz 198  
Adsorption 250  
amorphe Thermoplaste 349  
Anfahrverhalten 364  
Anforderungen an die Materialien 268  
Anforderungsliste 5  
Anionen 192  
Anlassen 21  
Anode 32, 75, 185, 300  
anorganische Retrosynthese 81  
Anregungspotential 195  
Ansprechdynamik 361  
Arbeitselektrode 205, 206  
Aspektverhältnis 59, 284  
Atomic Force Microscopy 190  
ATR-FTIR-Spektroskopie 176  
ATR-Kristall 177  
Attenuated Total Reflection 176  
Aufbereitung 257  
Aufladung 131  
Auflagekraft 115  
Auflösungsvermögen 122, 157, 160  
Aufnahme von Emissionen 261  
Aufschubkraft 239  
Aufwachsrate 42  
Aufwölben 222  
Ausscheidungsprozess 329  
Außenstromlose Beschichtung 34  
Austrittstiefe der Fluoreszenz 189

Auswahl von Spritzguss-  
Werkzeugstählen 25  
Auswerfer 241, 343  
Auswerferabdruck 4  
Auswerfersystem 238  
Avogadro-Konstante 183

## B

Backgroundspektrum 178  
Barrierschutzschicht  
– thermische 41  
Bauteiloberfläche 314  
Beanspruchungsprofil 274  
Bearbeitbarkeit 17  
Bedampfen 42  
Belag 308, 328, 335  
Belagbildung 3, 256, 264, 329, 331,  
337, 344  
Belagsreduzierung 336  
Belastungsrate 211  
Berkovich-Pyramide 212  
Beschichtbare Werkstoffe 38  
Beschichtung 291  
Beschichtung der Oberfläche 285  
Beschichtungsbad 30  
Beschichtungsgerechte Konstruktion 37  
Beschichtungsguidelines 39  
Beschichtungstauglichkeit 37  
Beschichtungszeit 69  
Beschleunigungsspannung 124, 129  
Bindenahrt 2, 314, 325, 367  
Bindenahrtfestigkeit 325  
Bindenahrtkerbe 314, 324  
Bindung  
– Ionen 49  
– kovalente 49, 171, 178  
– metallische 49, 178  
– Physikalische 49  
Bindungen in Polymeren 171, 174  
Bindungsenergie 183, 341  
Blasenbildungstemperatur 68  
Blauversprödung 335  
bleibende Verformung 215  
Bode-Diagramm 199, 202

Brechungsindex 122  
Brinellärte 209, 210  
Bruchstücke 253  
BSE 124  
BSE-Sensor 132  
Bulk-Material-Synthese 90

## C

Center-Burst 161  
Chemische Gasphasenabscheidung 53,  
283, 285, 308, 310, 320, 342  
– Feststoffbasierte 65  
– Metallorganische 53  
– Plasmabasierte 74  
chemische Korrosion 300  
chemisch Nickel 34, 294, 304  
chemisch Nickel-Schichten 34  
Chemosynthese 65  
Chromatogramm 260  
chromatographische Säule 250  
Comptonstreuung 182  
Constant Phase Element 198  
Coulombsches Gesetz 253  
Cube-Corner-Pyramide 212  
CVD 53  
CVD-Charakteristik 66  
CVD-Reaktor 103

## D

Dampfdruck 67, 80, 92  
– Precursor 56  
de-Broglie-Wellenlänge 123  
Deformation 342  
Deformation beim Entformen 3  
Deformationsschwingungen 168  
Dehnratenabhängigkeit 211  
Dehnungsmodul 218  
Delamination 49  
Desorption 250  
Desorptionsröhrchen 262  
Dichte 230  
Dichtheit der Beschichtung 303  
Diseleffekt 335

Diffusion *55, 193, 301*  
Diffusionsvorgang *198*  
Dispersionskraft *340*  
Dispersionschichten *35, 294*  
Dispersoide *35*  
Disproportionierung *65*  
DLC-Beschichtung *22, 76*  
Doppelschichtkapazität *200, 202*  
Dosiervorrichtung *71*  
Drehmoment *244*  
Dreielektrodenanordnung *205*  
Druckaufnehmer *351*  
Drucksensor *348*  
Dünnschichtsensor *355, 363*  
Dünnschichtsensorik *348*  
Dünnschichtthermoelement *356*  
dynamische Temperiertechnik *314, 370*  
dynamische Temperierverfahren *367*

## E

Edelstähle *19*  
EDX *129*  
EDX-Sensor *136*  
EDX-Spektrum *136, 138*  
Eigenabsorption *172*  
Eigenspannung *284*  
Einbringen von Ionen *45*  
Eindringarbeit *220*  
Eindringfläche *218*  
Eindringhärte *215*  
Eindringhärte der Schicht *225*  
Eindringkörper *212, 225*  
Eindringkörpergeometrie *216*  
Eindringkriechen *219*  
Eindringmodul *218*  
Eindringmodul der Schicht *224*  
Eindringrelaxation *220*  
Eindringtiefe *118, 209, 211, 216, 220, 223, 224*  
Eindringversuch *222*  
Einfriereffekt *332*  
eingefrorene Randschicht *322*  
einlagige Beschichtung *50*  
Einsinken *222*  
Einspritzgeschwindigkeit *313*  
Einzelschicht *221*  
Einzelwiderstand *194*  
elastischer Arbeit *220*  
elastische Verformung *211*  
elektrische Heizleiter *369*  
elektrische Passivierung *359*  
elektrischer Schwingkreis *203*  
elektrischer Strom *194*  
elektrischer Widerstand *201*  
elektrisches Ersatzschaltbild *203*  
elektrische Spannung *194*  
elektrochemische Doppelschicht  
*198, 200*  
elektrochemische Impedanzspektro-  
skopie *192*  
Elektrode *205*  
Elektrolyse *31*  
Elektrolyt *205, 300*  
elektromagnetische Strahlung *166*  
Elektronen *74, 183*  
Elektronenmangel *300*  
Elektronenreflexionsvermögen *127*  
Elektronenschale *184*  
Elektronenstoß *128*  
Elektronenstrahl  
– Verdampfen mittels *43*  
Elektronenstrahlen *187*  
Elektronentransfer *192*  
Elektronenübergang *184*  
Elektronenüberschuss *300*  
Elementanalyse *141*  
elementweise Aufschlüsselung *137*  
Emissionen *248, 260, 261, 328*  
Emissionsmessung *263, 265*  
Emissionswerkzeug *264*  
Empfindlichkeit *165*  
energiedispersive RFA *185*  
energiedispersives Spektrometer *128*  
Energieeffizienz *367*  
Energieübertragung *168*  
Energieverteilung *127*  
Entformung *338, 342, 352*  
Entformungskraft *238, 239, 341*  
Entformungsprozess *241*

- Entformungsschräge 338  
 Entformungstemperatur 344  
 Entformungsverhalten 336, 343  
 Enthftungseffekte 277  
 Entlastungsrate 211  
 Entlüftung 331, 334  
 Entlüftungskanal 262  
 Entlüftungsmöglichkeiten 334  
 Entlüftungsweg 334  
 Entstehungsbereiche der Elektronen 127  
 erhöhte Temperatur 324  
 Ermüdung 211  
 Ermüdungsprozess 269  
 Ermüdungsverschleiß 290  
 Ersatzschaltbild 201, 306  
 Erweichungstemperatur 314  
 Erzeugung der Röntgenstrahlung 129
- F**
- Faraday-Käfig 206  
 Fehlstelle 357  
 Feilttest 277, 281  
 Festkörperlaser 144  
 Feststoffförderer 70  
 Feststoffpartikel 69  
 Filterelement 261  
 Finite-Elemente-Methode 99  
 flache Bereiche 65  
 Flächenkorrosion 301  
 Flächenrauheit 134  
 Flanschttemperatur 333  
 Fließverhalten 323  
 Fließweg 256, 362  
 Fließwegende 352  
 Fließweglänge 228, 322  
 Flüchtigkeit 84, 85, 88  
 Fluoreszenzstrahlung 182  
 Flüssigkeitsregler 58  
 Fokusebene 144  
 Förderraten 71  
 Förderung des festen Precursors 69  
 Formteilqualität 371  
 Fourier-Transform-Technik 175  
 Fragmentmasse 253
- Frank-van-der-Merwe-Modell 47  
 Freistrahl-Prüfstand 269  
 Frequenz 167  
 Frequenzbereich 193, 203  
 Frequenzganganalysator 205  
 FTIR-Absorptionsspektrum 173, 174  
 FTIR-Spektroskopie 166  
 FTIR-Spektrum 175  
 Füllstudie 350  
 funktionale Schicht 284  
 funktionelle Gruppen 171
- G**
- galvanische Beschichtung 304  
 galvanische Halbzelle 300  
 galvanische Schichten 30, 292  
 galvanisches Element 300  
 Galvanisieren 23  
 Galvanostat 205  
 Gaschromatographie 248, 261  
 Gasgemisch 255  
 Gasgeschwindigkeit  
 – Simulation 106  
 Gasphasenabscheidung  
 – chemische 53  
 – physikalische 41  
 Gefügestruktur 269  
 Gesamtbild 146  
 Gesamtwiderstand 194  
 Gestaltabweichung 157  
 Gitterfehler 47  
 Gittermuster 278  
 Gitterschnitt 277, 278  
 Glanzgrad 268, 315, 321  
 Glanzgradunterschiede 336  
 Glanzunterschiede 2, 328  
 Glasfasern 283  
 Glasübergangstemperatur 229, 319, 370  
 Gleichgewichtsdampfdruck 69  
 Gleichspannung 197  
 Gleichstromspattern 44  
 Gleitintegral 343  
 Gleitreibkoeffizient 240  
 Gleitreibmoment 243, 344

Glimmentladung 74  
Glühen 21  
gradierte Beschichtung 50  
Grenzfläche 215

## H

haftfeste Anbindung 369  
Haftfestigkeit 304  
Haftkräfte 338  
Haftmoment 243, 343, 344  
Haftreibkoeffizient 240  
Haftung 284  
Haftungsbeurteilung 287  
Haftungsbewertung 277  
Haftungsmechanismen 46  
Haftung von Beschichtungen 278  
Härte 16, 283, 288  
Härteeindruck 281  
Härteindringprüfung 287  
Härtemessung 287  
Härten 21  
Härteprüfverfahren 209  
Härtetest nach Rockwell 279  
Hartstoffschicht 76, 283  
Hartverchromung 292  
Hauptschubspannung 222  
Heißgaskorrosion 301, 307, 335  
Heißwandreaktor 53, 58  
Heizelement 367  
Heizschichten 367  
Helmholtzschicht 200  
Hinterschneidungen 59, 238, 284,  
338, 342  
hochfeste niedriglegierte Werkzeug-  
stähle 12  
Hochfrequenzbereich 197  
Hochfrequenzspattern 45  
Hochglanzoberflächen 343, 367  
Hochglanzpolitur 241, 338  
hochlegierte Werkzeugstähle 12, 18  
Hochtemperaturoxidation 192  
Höhenkartierung 164  
Höhenprofil 135  
Höhenunterschiede 144, 157

homogene Beschichtung 59  
Hybridschichten 297  
Hydroxidschicht 192

## I

Identifizierung des Polymers 171  
Impedanz 196  
Impedanzspektroskopie 192, 205, 306  
Impedanzspektrum 205  
Impulsübertragung 44  
Indentation Size Effect 214  
Indikatorelemente 36  
Indikatorschicht 36  
Induktivität 197  
infraroter Spektralbereich 166  
Infrarotspektroskopie 166, 170, 178  
Infrarotstrahl 177  
Innenbeschichtung 59  
innenliegende Bereiche 65  
Intensität 185, 189  
Intensitätsmuster 162  
Intensitätsverteilung 146, 151  
Interferenzmuster 162  
Interferogramm 176  
Interferometer 160  
Ionen 74  
Ionenbindung 49  
Ionenplattieren 45  
Ionisation 253  
Isolationsvermögen 356

## K

Kalibrierstandard 188  
Kalottendurchmesser 118  
Kalottenschliff 115, 152, 189, 287  
Kaltarbeitsstähle 11, 19  
Kaltwandreaktor 53  
Kapazität 197  
Katalysator 65  
Kathode 31, 75, 185, 300  
Kationen 192  
Kavitätsoberfläche 343  
Keimwachstum 47

- kinetische Energie 46  
Kippschwingungen 168  
Kleinlast-Vickers-Prüfgerät 281  
kohärentes Licht 162  
Kohlenstoff-Werkzeugstähle 11  
Kombination einzelner Schichten 50  
Komplexität  
– Precursor 81  
Kondensator 197, 200  
konfokales Messprinzip 143  
Konizität 338  
konstantes Phasenelement 198  
konstruktive Interferenz 163  
Kontaktfläche 339  
Kontakttemperatur 229, 317  
Kontakttiefe 215, 218  
Kontaminierung 342  
konturnahe Heizleiter 367  
Konvektion 55  
Konzentration 189  
Korngrenze 302  
Korngröße 281  
Korrosion 274, 300, 335, 342  
Korrosionsanfälligkeit 308  
Korrosionsbeständigkeit 16, 192, 297, 307  
Korrosionsneigung 302  
Korrosionsprobleme 265  
Korrosionsprodukte 303  
Korrosionsprozess 192  
Korrosionsschutz 203, 302  
Korrosionsschutzschichten 300, 304  
Korrosionsursache 302  
Korrosionsverhalten 310  
Korrosionsvorgang 198  
Korrosionswiderstand 200  
korrosive Nebenprodukte 92  
kovalente Bindung 49, 171, 178  
Kraftaufnehmer 351  
Kraft-Eindringtiefe-Messung 213  
Kraftrücknahmekurve 215  
Kratzstab 278  
Kratztest 277, 278  
Kreiden 330  
Kriech Eigenschaften 211  
kristalline Strukturen 46  
Kunststoffformenstähle 12
- L**
- Lambert-Beer-Gesetz 182  
laminare Strömung 104  
Laser 161  
Lasermikroskopie 143  
Laserstrahl 143, 231  
– Verdampfen mittels 43  
Lastenheft 5  
Lebensdauer 291  
Leerstelle 183  
Lichtbogen  
– Verdampfen mittels 43  
Lichtgeschwindigkeit 167  
Lichtintensitätsverteilung 148  
Lichtquelle 161  
Lichtwellen 160  
Liganden 83, 93  
Linienmessung 159  
Linienspektrum 184  
Lochblende 143  
Lochkorrosion 301  
Löslichkeit 47, 84  
Losrißkraft 239, 339  
Lösungsdruck 300  
Lösungsmittel 56, 58, 84, 249, 260
- M**
- Magnetronspütern 45  
Maraging-Werkzeugstähle 19  
Masse-Ladungs-Verhältnis 253  
Massenflussregler 59  
Massenschwächungskoeffizienten 183  
Massenspektrometrie 248, 252  
Massenspektrum 252, 253, 254  
Massetemperatur 313, 332  
Materialabbau 256  
Materialabtrag 268  
Materialidentifizierung 169  
Materialtrocknung 257



Materialversagen 275  
Matrixmaterial 35  
matte Stellen 2  
mechanische Adhäsion 339  
Mehrkomponentensysteme 82  
mehrlagige Schichtsysteme 50  
Messgeschwindigkeit 165  
Messgröße 348  
Messstrecke 158  
Metallgitter 49  
metallische Bindung 49  
Metallkorrosion 198  
metallorganische chemische Gasphasen-  
abscheidung 53, 305, 311, 321  
Metallprobe 206  
Michelson-Interferometer 161, 175  
Mikrobrechen 269  
mikrophysikalische Effekte 214  
Mikroröntgenfluoreszenzanalyse 190  
Mikrospanen 269  
Mikrostrukturen 215, 304  
Mikrowelle 75  
Mischelemente 70  
Mitlaufprobe 277  
Mittenrauwert 158  
mittlere freie Weglänge 43  
mittlerer Infrarotbereich 166  
MOCVD 54  
MOCVD-Anlage 59  
Modellbildung 99  
molekulare Vorstufen 78  
Moleküleigenschaften 79  
Molekülschwingungen 168  
Morphologie 79  
MS-Signalintensität 264  
Multilagenschicht 321  
Multi-Source-Precursor 82

## N

naher Infrarotbereich 166  
Nanoindentation 209  
Nanolayerschichten 50  
Nanotechnologie 163  
Nasskorrosion 300

Navier-Stokes-Gleichungen 104  
Nebenprodukte 80  
Nebenreaktion 55  
Neigungswinkel 338  
nichtwässrige Korrosion 303  
Niederfrequenz 205  
Niederschlag 256  
niedriglegierte Werkzeugstähle 18  
Niedrigvakuum-REM 124  
Nitrieren 22  
Normalschwingungen 168  
numerische Apertur 122  
Nyquist-Diagramm 199, 202

## O

Oberflächenbeschaffenheit 192  
Oberflächenenergie 340  
Oberflächenfehler 367  
Oberflächengeometrie 304  
Oberflächengüte 271  
Oberflächenmodifikation 241  
oberflächennahe Beheizung 368  
Oberflächennormale 281  
Oberflächenprofil 160  
Oberflächenqualität 351  
Oberflächenrauheit 116, 134, 215, 223,  
245, 272, 339, 341  
Oberflächenstruktur 149, 238, 283, 345  
Oberflächenzerrüttung 269  
Ohmscher Widerstand 194  
Opferanode 303  
Ordnungszahl 126  
organische Moleküle 178  
organische Verbindungen 253  
Oxidation 369  
Oxidationsreaktion 193  
Oxidschicht 192, 303

## P

Paarbildung 182  
PACVD 75, 296  
Pendelschwingungen 168  
Permittivität 203

- Pflichtenheft 5  
 Phasenumwandlung 304, 316  
 Phasenverschiebung 194, 196  
 Photoeffekt 182  
 Photon 128, 182  
 physikalische Adhäsionskräfte 340  
 physikalische Bindung 49  
 physikalische Gasphasen-  
   abscheidung 41, 283, 296, 308, 311,  
   320, 342, 356, 359, 369  
 piezoelektrischer Effekt 351  
 Pinhole 356  
 plasmabasierte chemische Gasphasenab-  
   scheidung 74  
 Plasmanitrieren 299  
 Plasmen 74  
 Plastifizierparameter 333  
 Plastifizierung 257  
 plastische Eigenschaften 222  
 plastische Verformung 211, 221  
 plastische Verformungsarbeit 220  
 Plate-out-Effekt 329  
 Polarisationswiderstand 192  
 Pop-in-Verhalten 214  
 Porenfüllung 193  
 Porenwiderstand 203  
 Postprocessor 99  
 Potentiostat 205  
 Präparation 122  
 Precursoren 53, 58, 62, 65, 78, 285, 318  
   – feste 71, 72  
   – flüssige 58  
   – kommerziell erhältlich 84  
 Preprocessor 99  
 Primärelektronen 126  
 Primärintensität 183  
 Probendicke 186  
 Probenoberfläche 233  
 Probenpräparation 170, 186  
 Probenzuführung 249  
 Produktidentifizierung 36  
 Profil  
   – topologisches 134  
 Prozessdruck 60  
 Prozessemissionen 258  
 Prozessparameter 87  
 Prozesstemperatur 67, 75  
 Prüfkraft 211, 224  
 Prüfoberfläche 241  
 Pull-off Scherfestigkeitstest 277  
 pulvermetallurgische Werkzeugstähle  
   12, 19  
 Pulverpartikel 65  
 PVD 41  
   – Verfahrensvarianten 41  
 PVD-Beschichtung 22  
 Pyrolyse 65
- Q**
- Quantifizierung von Komponenten 174  
 Querschlifffmethode 277, 281
- R**
- Randles Cell 200  
 Rasterelektronenmikroskop 122, 308  
 Raue Oberfläche 3  
 Rauheit 157, 159, 164, 321  
   – des Substrates 48  
 Rauheitsänderung 273  
 Rauheitsmessung 153  
 Rautiefe 158  
 Rautiefenprofil 281  
 Rayleighstreuung 182  
 Reaktand 78  
 Reaktion  
   – chemische 55  
 Reaktionsprodukte 65, 255, 303  
 Reaktivität 79  
 Reaktor 53  
 Reaktortemperatur 65  
 Reaktortyp 58  
 Reduktion der Reibung 291  
 Reduktion des Belages 335  
 Referenzelektrode 205  
 Reflexionseigenschaften 162  
 Reflexion von Licht 156  
 Reibbeiwert 341  
 Reibkraft 342

- Reibpartner 239, 243  
Reibung 291  
Reibungsreduktion 291  
Reibungsverhalten 296  
Reibverhalten 35  
Reibwerterhöhende Schichten 36  
Reibzustände 346  
Reinheit 181  
Reinigungsritzel 71  
Relaxationsvorgang 220  
REM 124  
Resistiv beheizte Oberfläche 368  
Resonanzfrequenz 168  
Restfeuchte 330  
Retentionszeit 250, 251, 260  
RFA 181  
Risse 281, 309  
Risskorrosion 301  
Rissnetzwerk 150  
Rissstruktur 292  
Rockwellhärte 209, 210  
Rockwell-Härteprüfung 287  
Rockwell-Test 277, 279  
Röntgenanalyse 181  
Röntgendiffraktometrie 190  
Röntgenfluoreszenzanalyse 181  
Röntgenstrahlen 124, 128  
Röntgenstrahlung 182, 184, 185  
rückgestreute Elektronen 124  
Rückstreuелеktronen 126, 133
- S**
- Sättigung des Trägergases 66  
Sättigungsdampfdruck 68  
Sauerstoffgehalt 303  
Säulenkopf 249  
Schallplatteneffekt 3  
Schattenmaske 357  
Schäumen 333  
Scherfestigkeitstest 279  
Schichtabscheidung 53  
Schichtaufbau 309, 321  
Schichtbestandteile 188  
Schichtcharakterisierung 115  
Schichtdicke 61, 116, 183, 185, 188, 189,  
203, 284, 304, 308, 309, 311, 321  
– PVD 41  
Schichtgrenzen 50  
Schichthaftung 53, 281, 286  
Schichthärte 284  
Schichtstruktur 65  
Schichtsysteme 50, 284, 305  
Schichtversagen 309  
Schichtwachstum 41, 46, 55  
Schichtwachstumsrate  
– Simulation 105  
Schichtzonenmodell 48  
Schmelzefront 350  
Schmelztemperatur 319  
Schmiermittel 330  
Schneckengröße 333  
Schneckenzuführung 70  
Schnellarbeitsstähle 11, 18  
Schrittweite 145  
Schutzschicht 192  
Schwindung 241  
Schwingungsformen im Molekülen 168  
Schwingungsspektrum 173  
Scratchtest 277, 279  
Scratchtester 287  
SE 124  
Seebeck-Effekt 354  
Sekundärelektronen 124, 126, 131  
Sensorcharakterisierung 360  
Sensorkalibrierung 360  
Sensoroberfläche 364  
Sensorschicht 36  
Sensorträgheit 349  
SE-Sensor 130  
Siegelpunkt 350  
Simulation der Schichtabscheidung 99  
Single-Source-Precursoren 83  
Solver 99  
Solvothermale Reaktion 90  
Spaltgängigkeit 59, 305  
Spaltinnenwand 62  
Spannungsanregung 306  
Spektralbereich 166  
Spektrenauswertung 179

- Spektrometer 176  
 spezialisierte Werkzeugstähle 20  
 spezifische Adhäsion 339  
 spezifischer Widerstand 369  
 spezifische Wärmekapazität 230  
 Spitzenverrundung 222  
 Splitverhältnis 249  
 Spreizschwingungen 168  
 Sprudler 68  
 Spurenanalytik 175  
 Sputtern 44  
 Standardwasserstoffelektrode 205  
 Stoffgemisch 249  
 Stofftransport innerhalb des  
   Reaktors 66  
 stoßfeste Werkzeugstähle 11  
 Stranski-Krastanov-Modell 47  
 Strategien in der Materialsynthese 81  
 Stromantwort 195  
 Stromdichtepotentialmessung 305  
 Strömungssimulation 99  
 Strömungsverhalten 101  
 Strömungsweg 107  
 Strukturierte Oberfläche 321  
 Sublimationsdruck 47  
 Sublimationstemperatur 86  
 Substrat 41, 118, 284  
 Substratoberfläche 55, 65, 77
- T**
- Target 44  
 teilkristalline Thermoplaste 349  
 Temperaturabfall 233  
 Temperaturamplitude 232  
 Temperaturänderung 233  
 Temperaturausgleich 234  
 Temperaturleitfähigkeit von  
   Beschichtungen 228  
 Temperaturmessung 364  
 Temperaturschwankungen 280  
 temperatursensitive Dünnschichten 354  
 Temperatursensor 348, 351, 355  
 Temperaturverlauf 353  
 Tempern 257  
 Tetraethylorthosilikat 57  
 thermische Ausdehnung 316  
 thermische Barrierschicht 313, 316,  
   319, 321  
 thermische CVD 53  
 thermische Eigenschaften 305  
 thermische Leitfähigkeit 232, 321  
 thermischer Ausdehnungskoeffizient 319  
 thermisch isolierende Werkstoffe 228  
 Thermodesorptionsröhrchen 261,  
   262, 264  
 thermodynamische Adhäsions-  
   theorie 341  
 Thermoelemente 349, 353, 355,  
   357, 360  
 Thermoschock 277  
 Thermoschocktest 280  
 Tiefenschärfe 125  
 Tigerlines 2  
 Time Domain Thermoreflectance 230  
 Topcoat 294  
 Topografie 150  
 topografische Darstellung 147  
 topografisches Bild 144  
 Torsionsschwingungen 168  
 Trägergas 250, 251  
 Trägergasstrom 54  
 Trennmittel 330, 342  
 Trennschärfe 251  
 Trennverhalten 251  
 tribologischer Zustand 243  
 tribologische Schichten 290  
 Tribooxidation 291  
 Trockenkorrosion 300
- U**
- Ultra-Variable-Pressure-Detektor 131  
 Unebenheiten 157  
 unvollständig gefüllte Formteile 4  
 UVD-Sensor 131

**V**

Vakuumpumpe 55  
Valenzschwingungen 168, 172  
Verarbeitung 257  
Verbundwerte 223  
Verdampfer 54  
Verdampfungstemperatur 42  
Verformungen 211, 212, 281  
Vergleich des Infrarotspektrums 171  
Vergleichsstelle 354  
Verklumpen 70  
Vernickeln 34, 294  
Versagen der Beschichtung 309  
Verschleiß 267, 271, 274, 275, 283, 288  
Verschleißbeinsatz 272  
Verschleißermittlung 273  
Verschleißerscheinungen 164  
verschleißfest 296  
Verschleißfestigkeit 16, 119, 286, 292  
Verschleißprüfung 154  
Verschleißrate 120  
Verschleißschutzschichten 41, 290  
Verschleißtopf-Prüfstand 269  
Verschleißuntersuchung 267  
Verschleißverhalten 271  
Verschleißvolumen 119  
Verwirbelung des Pulvers 70  
Vickershärte 209, 210  
Vollmaterial 221  
Volmer-Weber-Modell 47  
Vorbehandlung des Substrates 49  
Vorbereitung der Probe 129  
Vorläuferverbindung 53  
Vorlauftemperatur 228, 353, 364  
Vortrocknung 257

**W**

Wanddicke 272, 323  
Warburg-Impedanz 198  
Warmarbeitsstähle 11, 18  
Wärmeableitung 361  
Wärmebehandlung 20  
Wärmeeindringfähigkeit 317

Wärmeeindringkoeffizient 230, 235  
Wärmeerzeugung 369  
Wärmeisolationsschicht 233  
Wärmeleitfähigkeit 17, 230, 233, 313  
Wärmeleitfähigkeitsdetektor 251  
Wärmeleitung  
– dünner Schichten 230  
Wärmeschockbeständigkeit 316  
Wärmeübertragungsanalyse 111  
Wärmezufuhr 353  
Wartung 23  
Wasseraufnahme 198  
Wasserstoffbrücke 340  
Wasserstoffversprödung 32  
wässrige Korrosion 192, 310  
Wechselstrom 194  
Wechselstromkreis 196  
Wechselwirkung 160, 181  
Wechselwirkungsquerschnitt 182  
Weglänge  
– mittlere freie 43  
Weißbruch 4  
Weißlichtinterferometer 272  
Weißlichtinterferometrie 156, 160  
Wellenlänge 167  
Wellenlänge des Laserlichts 144  
wellenlängendispersive RFA 185  
Wellenzüge pro Zentimeter 167  
Welligkeit 157  
Werkstoffhärte 269  
Werkzeugbelag 178  
Werkzeugbeschichtung 345  
Werkzeuginnendruck 348  
Werkzeuginnendruckverlauf 349  
Werkzeugoberfläche 241, 289, 344, 367  
Werkzeugstahl 9  
Werkzeugtemperatur 367  
Werkzeugtemperierung 364  
Werkzeugwand 352, 361, 364  
Werkzeugwandtemperatur 228, 313, 317,  
344, 348, 361, 364  
Werkzeugwandtemperaturverlauf 352  
Werkzeug zur Emissionsaufnahme 262  
Widerstand  
– elektrischer 192, 231

**Z**

Zähigkeit *16*

Z-Ebenen *146*

Zeitverschiebung *195*

Zersetzung *56*

Zersetzungstemperatur *92*

Zusammensetzung *181, 186*

Zustandsgleichungen *104*

Zwischenschicht *50*

Zykluszeit *228*