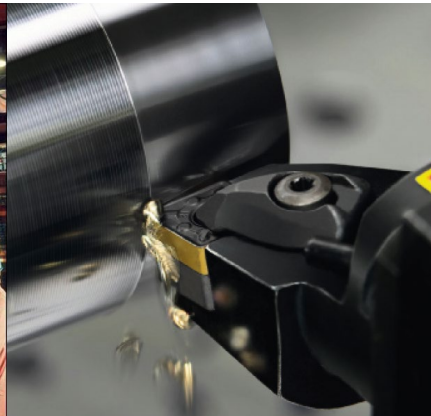




TECHNISCHE UNIVERSITÄT
BERGAKADEMIE FREIBERG

Die Ressourcenuniversität. Seit 1765.

FERTIGUNGSTECHNIK



Wintersemester 2020/21



TU Bergakademie Freiberg | Institut für Maschinenelemente, Konstruktion und Fertigung | Professur für Additive Fertigung
Agricolastraße 1 | 09599 Freiberg DE | Tel.: +49 3731 39 2986 | <http://www.imkf.tu-freiberg.de> | Prof. Dr.-Ing. Henning Zeidler

GLIEDERUNG DER VORLESUNG

1	Einführung: Grundlagen der Fertigungstechnik		
2	Die verschiedenen Fertigungsverfahren		
2.1	Urformen (Gießen, Additiv, ...)	2.4	Fügen (Schweißen, Löten, ...)
2.2	Umformen (Massiv-, Blech-, ...)	2.5	Beschichten
2.3	Trennen (Drehen, Fräsen, ...)	2.6	Stoffeigenschaft ändern
3	Messen in der Fertigung		
4	Prüfungsvorbereitung		

2.5 Beschichten

BESCHICHTEN – DIN 8580

Beschichten ist das **Aufbringen einer fest haftenden Schicht aus formlosem Stoff** auf ein Werkstück. Maßgebend ist der unmittelbar vor dem Beschichten herrschende Zustand des Beschichtungstoffes.

Die **Gliederung** der Hauptgruppe Beschichten erfolgt nach **verfahrenstechnischen Gesichtspunkten** bzw. nach dem **Aggregatzustand des Beschichtungstoffes**. Als Beschichtungsstoffe (Schichtwerkstoffe) kommen metallische (z. B. Kupfer, Nickel, Chrom), anorganisch-nichtmetallische (z. B. Email, Keramik) und organische (Lacke) Werkstoffe in Betracht.

EINTEILUNG

Beschichten

Beschichten aus dem flüssigen Zustand

Beschichten aus dem plastischen Zustand

Beschichten aus dem breiigen Zustand

Beschichten aus dem körnigen oder pulverförmigen Zustand

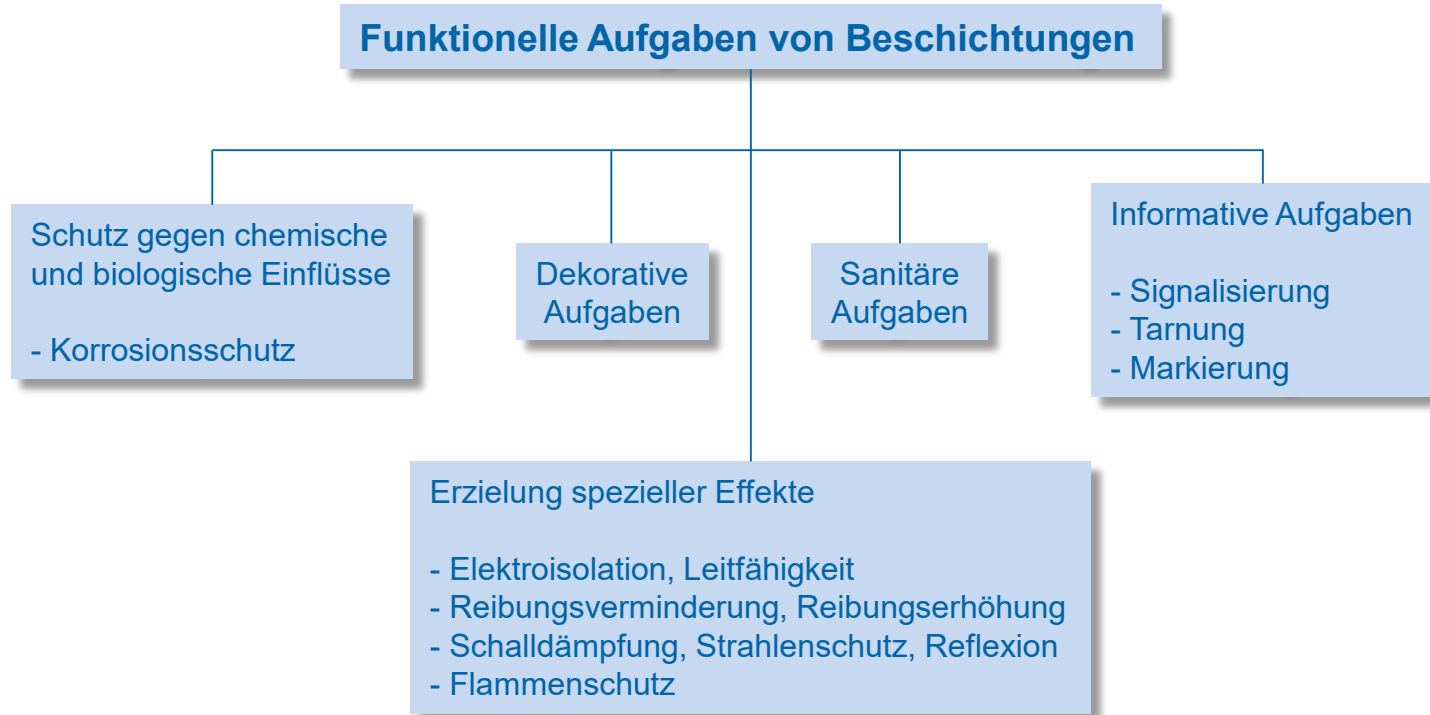
Beschichten durch Schweißen

Beschichten durch Löten

Beschichten aus dem gas- oder dampfförmigen Zustand (Vakuumbeschichten)

Beschichten aus dem ionisierten Zustand

FUNKTIONELLE AUFGABEN VON BESCHICHTUNGEN



2.5 Beschichten

BEANSPRUCHUNGSARTEN

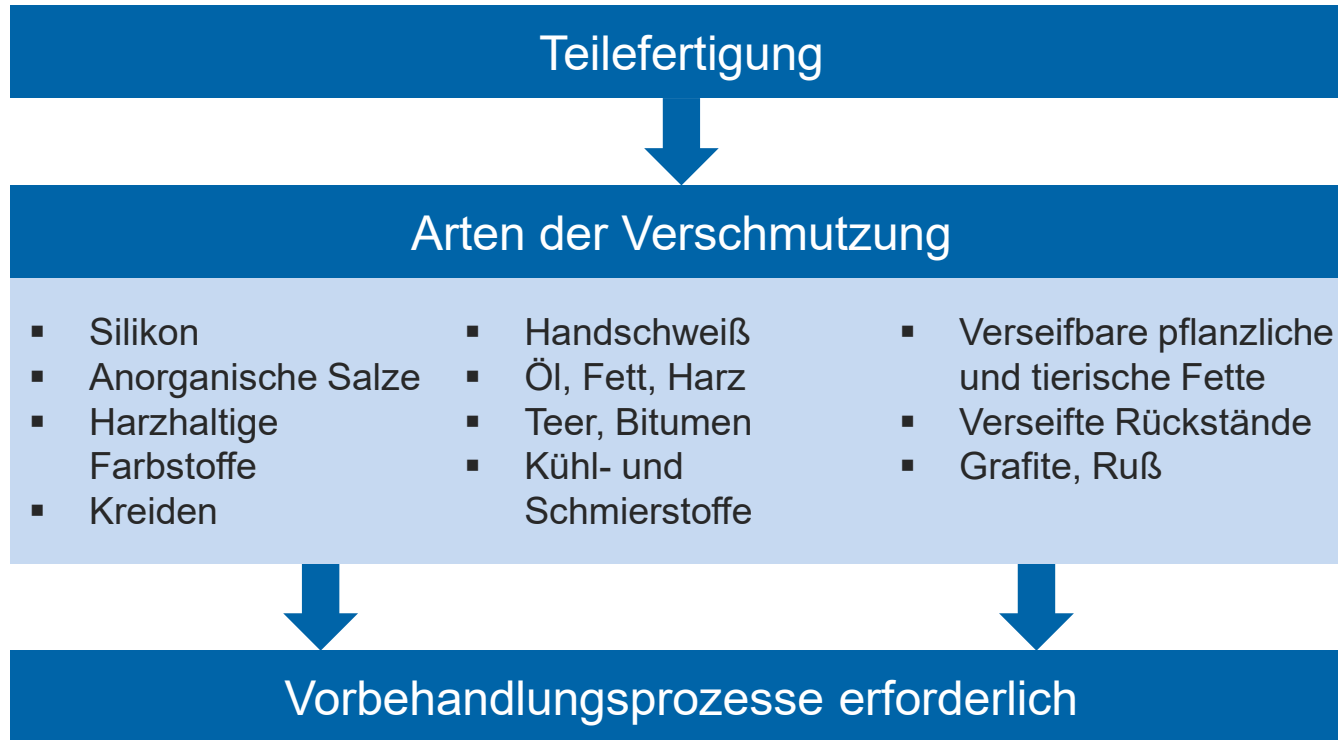
Art und Funktion technischer Oberflächen	Oberflächenbeanspruchung	Oberflächenveränderung bzw. -schädigung
Außenflächen von technischen Produkten aller Art (Sichtflächen, Deckflächen, Signalfächen, ...)	Mechanisch unbeansprucht (Klima- bzw. Umweltbeanspruchung)	Adsorption, Verschmutzung, Verwitterung
Oberflächen, die Wärme, Strahlung oder elektr. Strom ausgesetzt sind (Isolierflächen, el. Kontakte, ...)	Thermische, strahlungsphysikalische, el. Beanspruchung	Passivierung, Oxidation, Verzunderung
Oberflächen in Kontakt mit Flüssigkeiten (Behälter, Karosserien, ...)	Elektrochemische Beanspruchung	Korrosion, Elektrolyse
Oberflächen in Kontakt mit strömenden Medien (Rohrleitungen, Ventile, ...)	Strömungsbeanspruchung	Kavitation, Erosion
Oberflächen in Kontakt mit bewegten Gegenkörpern (Lager, Bremsen, Getriebe,...)	Tribologische Beanspruchung (Reibbeanspruchung)	Kontaktdeformation, Verschleiß
Oberflächen in Kontakt mit Mikroorganismen	Biologische Beanspruchung	Biologische Schädigung

2.5 Beschichten

EIGENSCHAFTEN EINER OBERFLÄCHE

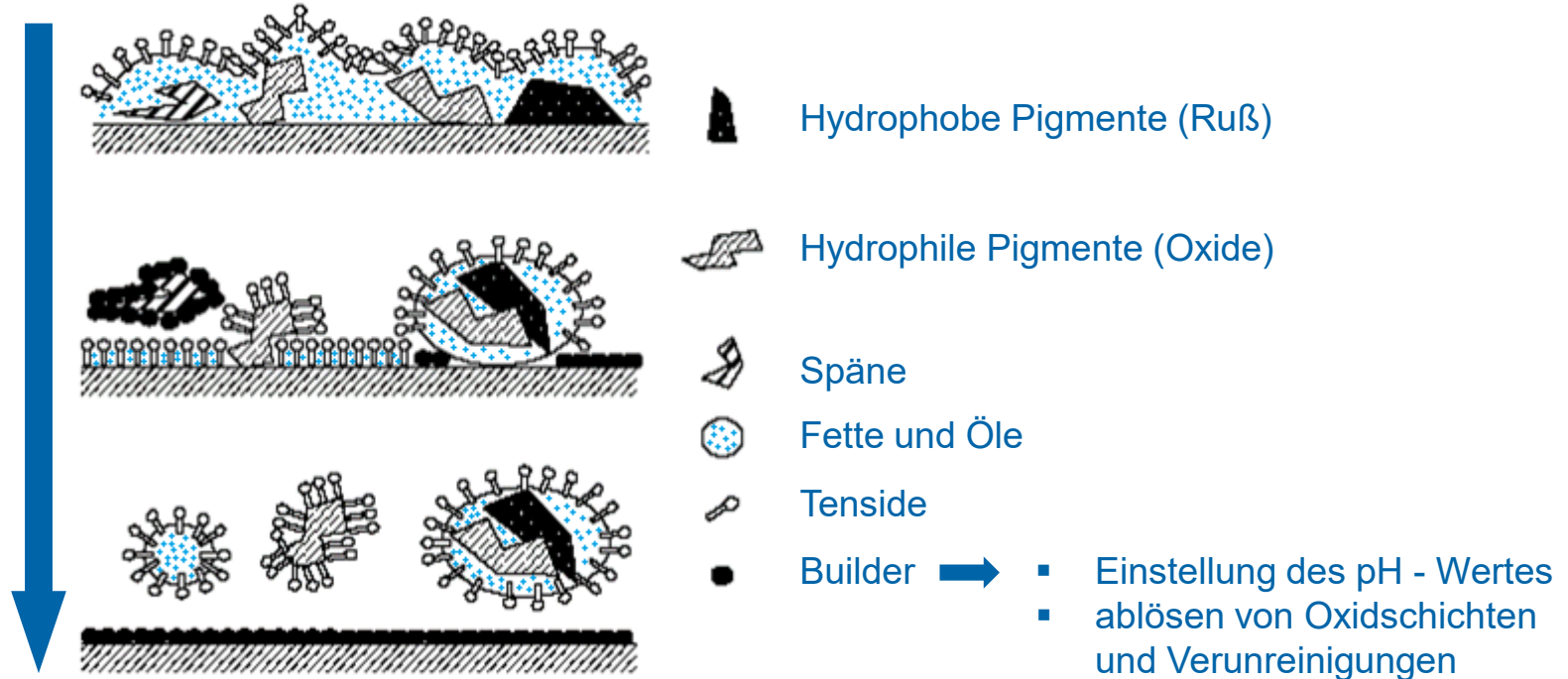
Anforderungen	Typische Eigenschaften	
Dekorative Anforderungen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Farbe ▪ Glanz ▪ Deckvermögen ▪ Rauheit ▪ Einebnung 	
Funktionelle Anforderungen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Korrosionsbeständigkeit ▪ Verschleißbeständigkeit ▪ Gleiteigenschaften ▪ Rauheit 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Härte ▪ Festigkeit ▪ Dichte ▪ Leitfähigkeit

SCHNITTSTELLENPROBLEMATIK DER BESCHICHTUNG



2.5 Beschichten

VORBEHANDLUNG: ENTFETTUNG



- Einstellung des pH - Wertes
- ablösen von Oxidschichten und Verunreinigungen

2.5 Beschichten

REINIGUNGSANLAGE FÜR STAHLBLECHE

Die elektrolytische Entfettungsanlage ist eine Besonderheit im Produktionsprozess. Nach dem Walzen wird die Bandoberfläche von Fetten und anderen Verunreinigungen gereinigt, bevor das Material der Wärmebehandlung zugeführt wird. Durch dieses Verfahren sind die kaltgewalzten Bänder in besonderer Weise für die Oberflächenveredlung geeignet.



2.5 Beschichten

REINIGUNG ROHKAROSSERIE



2.5 Beschichten

BESCHICHTEN AUS DEM FLÜSSIGEN ZUSTAND

Die wichtigsten Verfahren der Gruppe **BESCHICHTEN AUS DEM FLÜSSIGEN ZUSTAND** sind die **Lackierverfahren**. Zum Lackieren wird üblicherweise auch das **Elektrotauchlackieren (ETL)** und das **Pulverlackieren** gezählt.

Lackieren ist nach DIN 55 945 die Herstellung einer zusammenhängenden Beschichtung (Lackfilm) mit einem Beschichtungsstoff (Lack) auf der Basis organischer Bindemittel.

Einteilung des Lackmaterials in Gruppen:

- Bindemittel: Filmbildner und Hilfsstoffe
 - Filmbildner: (synthetische Harze), bestimmen den Filmbildungsmechanismus und Schichteigenschaften (Haftung, Härte, Elastizität, Abriebfestigkeit)
 - Hilfsstoffe: Weichmacher, Dispergierhilfen (Fließverhalten, Aushärtung, Glanz).
- Lösemittel: Bestimmen die Verarbeitungseigenschaften: Verlauf, Schichtdicke. Lösemittel verdunsten beim Filmbildungsprozess.
- Farbmittel: Pigmente, Farbstoffe und Füllstoffe (Farbgebung, Deckkraft)

2.5 Beschichten

BESCHICHTEN AUS DEM FLÜSSIGEN ZUSTAND

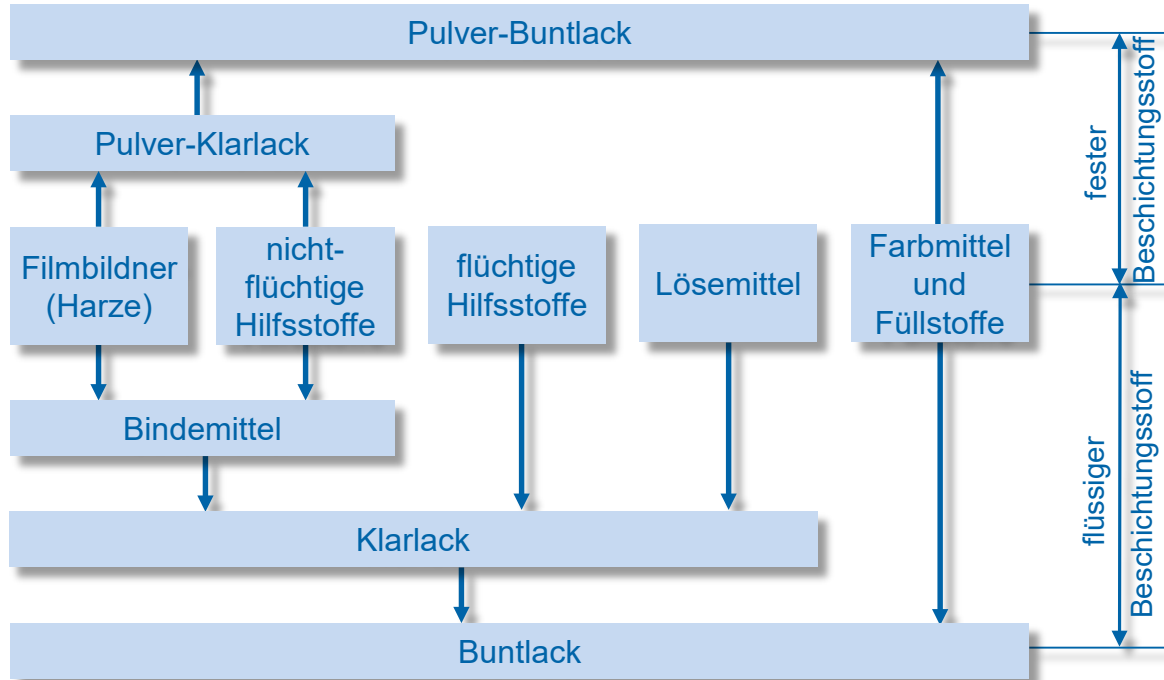
Einteilung der Lacksysteme u.a. nach:

- Art der Zusammensetzung (Art des Binde- und Lösemittels)
- Auftragsverfahren (Spritz-, Tauchlack)
- Filmbildung (Einbrenn-, 2-K-Lack), Glanzgrad (Matt-, Hochglanzlack)
- Verwendung (Holzlack)

Lacksysteme:

- konventionelle lösemittelhaltige Lacke (50-70% Lösemittel, 30-50% Bindemittel, Farbmittel, Hilfsstoffe),
- Wasserlacke (wasserlösliche Systeme oder Dispersionen),
- Festkörperreiche Lacke (High-Solid-Lacke): höherer Festkörperanteil (65-70 Gew.-% bei 1-K-Lacken, 75-80 Gew.-% bei 2-K-Lacken),
- Pulverlacke,
- strahlenhärtende Lacke (UV-Strahlung).

ZUSAMMENSETZUNG VON LACKEN



2.5 Beschichten

VERFAHRENSABLAUF KAROSSERIELACKIERUNG

Vorbehandlung:

Entfernung grober Verunreinigungen aus dem Rohbau (Öle, Fette). Anschließende Phosphatierung als temporärer Korrosionsschutz und zur Verbesserung der Haftfestigkeit der nachfolgenden Lackschicht.

Kathodische Tauchlackierung als Korrosionsschutz.

Versiegelung der Nähte und PVC-Unterbodenschutz. Applikation durch Airless-Spritzverfahren.

Grundlackauftrag (Füller)

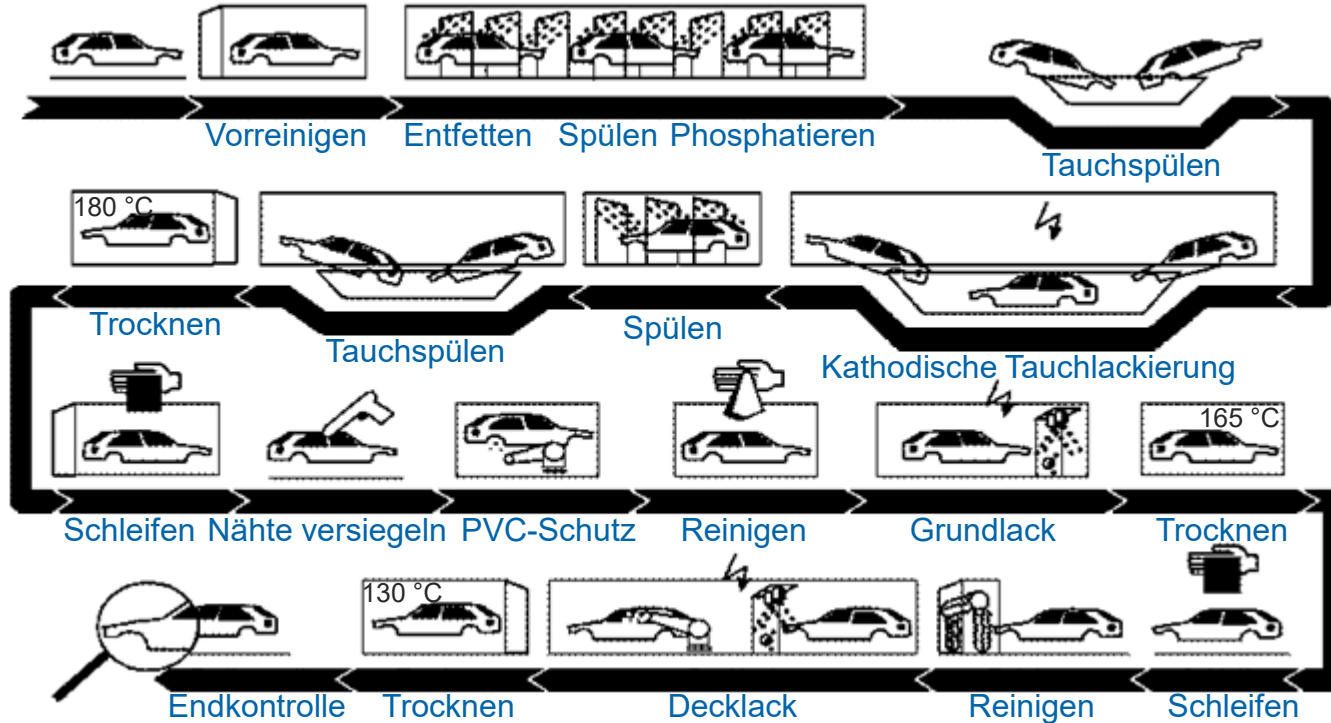
Haftgrund für den Decklack. Fehler aus dem Rohbau (Unebenheiten, Schleifriefen) können hier ausgebessert werden. Applikation durch Hochrotationsverfahren mit elektrostatischer Aufladung des Lackmaterials.

Decklackauftrag

Applikation je nach Lacksystem durch Hochrotation oder Druckluftzerstäubung. Metallic-Lackierungen erfolgen in zwei Schritten Basislack und Klarlack). Gesamttrockenschichtdicke (Pkw): 100 μm ; KTL-Trockenschichtdicke: 30 μm ; Grundlack 30-35 μm ; Einschicht-Decklackauftrag 40 μm .

2.5 Beschichten

VERFAHRENSCHRITTE KAROSSERIELACKIERUNG



2.5 Beschichten

INFRAROTTROCKNER

Infrarottrockner für wärmehärtende, lösemittelhaltige und lösemittelfreie Lacksysteme. Die Wärmeübertragung erfolgt durch Strahlung.



2.5 Beschichten

EMISSIONSVERMINDERUNG

Maßnahmen zur Verminderung der Emissionen beim Lackieren

Der Fertigungsschritt des Lackierens ist mit der Entstehung von Emissionen (Verdunsten der organischen Lösemittel), Abwasser (aus der Vorbehandlung und der Lacknebel-Abscheidung) und Abfall (Lackschlamm) verbunden. Damit keine Umweltschädigung erfolgt, sind geeignete Maßnahmen zu treffen.

Emissionen können durch Primär- und Sekundärmaßnahmen vermindert werden.

Abwasser kann durch Aufbereitung und Wiederverwendung weitgehend vermieden werden. Lackschlammreduzierung kann durch die Verbesserung des Auftragswirkungsgrades und durch den Einsatz neuer Lackmaterialien und Beschichtungstechnologien erfolgen.

MASSNAHMEN

Maßnahmen zur Verminderung von Emissionen beim Lackieren

Primärmaßnahmen

Lösemittel- reduzierung im Lack

- high solids
- Wasserlacke
- Pulverlacke

Verfahrens- und Fertigungstechnik

- Zerstäubung mit reduziertem Tröpfchenfeinanteil
- Oversprayreduzierung durch Steuern und Überwachen des Lackierprozesses
- Einschränken von Farbwechseln (mit Spülen) durch Maßnahmen der Fertigungssteuerung

Sekundärmaßnahmen

Abluftreinigung

- Lösemittelvernichtung durch
 - Verbrennung (thermisch, katalytisch, Thermoreaktor)
 - biologischen Abbau
- Lösemittelrückgewinnung durch
 - Adsorption (Aktivkohle, Molekularsieb) Kondensation

2.5 Beschichten

LACKIEREN DURCH ZERSTÄUBEN

Zerstäubung durch mechanische Kräfte (Spritzverfahren) oder durch elektrische Feldkräfte (Sprühverfahren).

Mechanische Lackzerstäubung durch Druckluft-, Airless-Zerstäubung oder Hochrotationsverfahren. Die mechanische Lackzerstäubung basiert auf einer hohen relativen Geschwindigkeit zwischen Lackstrahl und Umgebung.

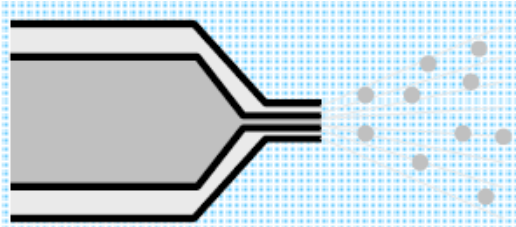
Druckluftzerstäubung:

Hierbei strömt die Zerstäubungsluft aus einer ringförmigen Öffnung, die durch eine Bohrung im Zerstäuberkopf (Luftkappe) und der darin zentrisch angeordneten Lackdüse gebildet wird. Zur Regulierung der Spritzstrahlform dienen Flachstrahl- (Hornluft-) Bohrungen.

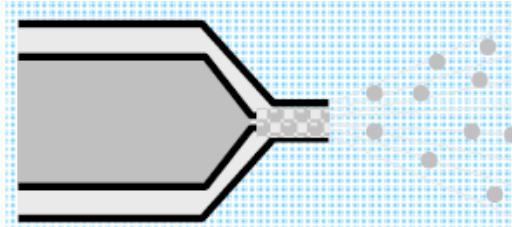
Die aus diesen Bohrungen ausströmende Luft formt einen Spritzstrahl mit annähernd kreisförmiger, senkrecht zur Strahlachse liegenden Grundfläche zu einem Strahl mit elliptischer Grundfläche. Die Druckluft wird durch Kompressoren oder Schaufelradgebläse erzeugt.

2.5 Beschichten

ZERSTÄUBUNGSMECHANISMEN



pneumatische Zerstäubung durch Außenmischung mit Hilfsgas



pneumatische Zerstäubung durch Innenmischung mit Hilfsgas

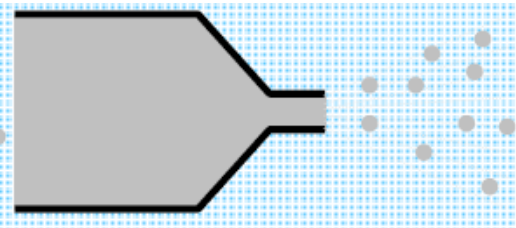
DRUCKLUFTZERSTÄUBUNG

Vorteile:

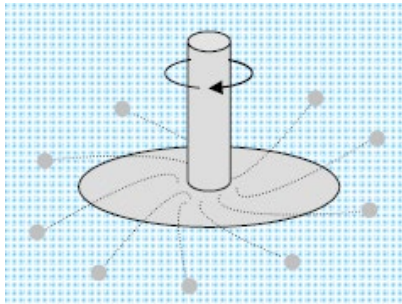
- sehr gute Schichtqualität,
- einfache Handhabung und
- universell einsetzbar.

Nachteil:

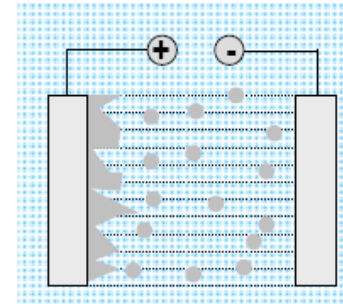
- hohe Lacknebelverluste (50-95 %).



hydraulische Zerstäubung (airless)



Zerstäubung durch Zentrifugalkräfte $F=m \cdot \omega^2 \cdot r$

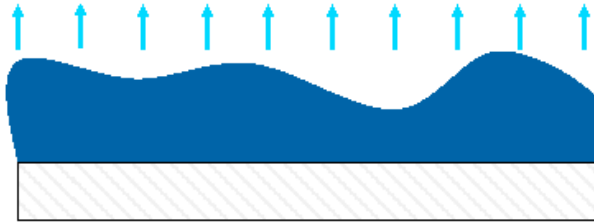


Zerstäubung durch Elektrische Kräfte $F=Q \cdot E$

BILDUNG DER LACKSCHICHT BEIM SPRITZLACKIEREN



Applikation



Abdunsten



Trockenfilm

2.5 Beschichten

GRUNDPRINZIP DES ELEKTROSTATISCHEN SPRÜHENS I

Die **elektrostatische Aufladung** des Lackmaterials erfolgt **durch ein** sich an der hochspannungsführenden Elektrode des Zerstäubers **konzentrierendes elektrisches Feld hoher Feldstärke**.

Je nach Sprühsystem handelt es sich dabei um eine **Leitungsaufladung** des noch nicht zerstäubten Lackmaterials beim direkten Kontakt mit der Elektrode oder um eine **Ionisationsaufladung**, bei der die bereits erzeugten Tröpfchen durch Anlagerung freier Luftionen aufgeladen werden. In diesem Fall erzeugt die Elektrode als Koronaspitze die erforderlichen Luftionen.

Der Transport der Lacktröpfchen erfolgt unter dem Einfluss der elektrischen Feldkräfte zum geerdeten Werkstück.

2.5 Beschichten

GRUNDPRINZIP DES ELEKTROSTATISCHEN SPRÜHENS II

Vorteile:

- höherer Festkörpurnutzungsgrad
- sprühabgewandte Teile werden zum Teil mitbeschichtet
- Lackeinsparung
- geringere Umweltbelastung.

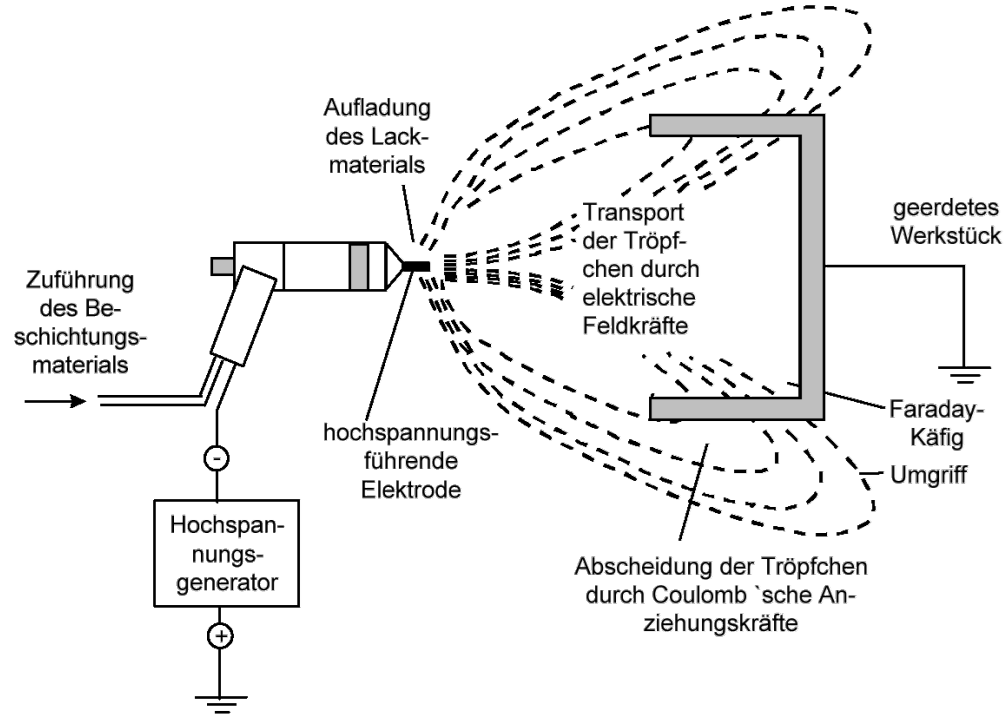
Nachteile:

- keine Beschichtung elektrisch abgeschirmter Bereiche
- Gefahr der Überbeschichtung mit Läufern an den Kanten und Ecken durch Feldkonzentrationen

Je nach Ausbildung des Zerstäuberorgans werden drei Verfahren unterschieden:

1. elektrostatischer Sprühspalt (AEG-Verfahren)
2. elektrostatische Sprühglocke und
3. elektrostatische Sprühscheibe

GRUNDPRINZIP DES ELEKTROSTATISCHEN SPRÜHENS III



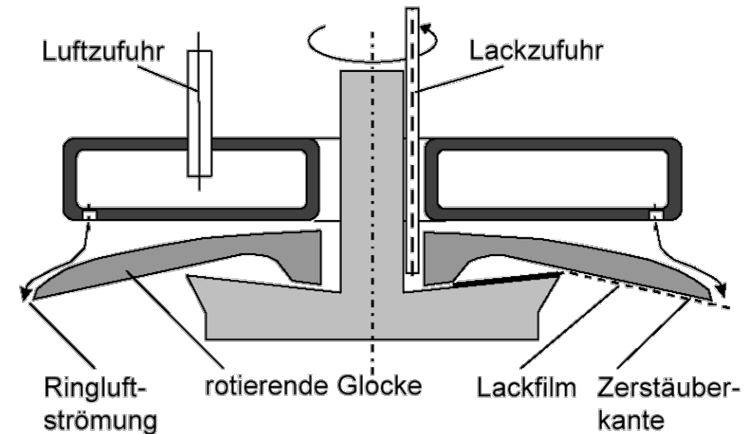
2.5 Beschichten

LACKZERSTÄUBUNG

Die Lackzerstäubung der elektrostatikunterstützten Verfahren erfolgt rein mechanisch. Die wichtigsten elektrostatisch unterstützten Zerstäuber sind die Druckluftzerstäuber, die als Hand- und Automatikpistolen im Einsatz sind und die elektrostatischen **Hochrotationsglocken**.

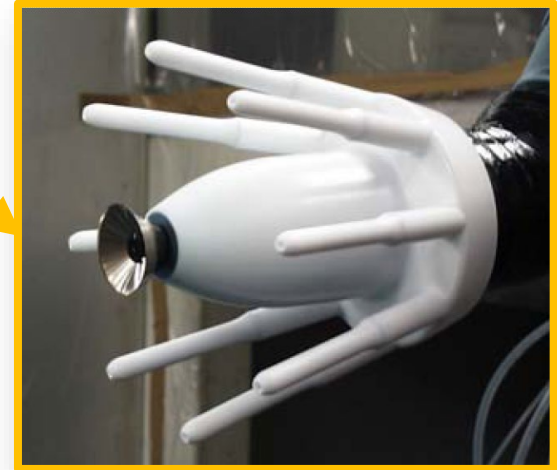
Bei der **Hochrotationsglocke** wird das Lackmaterial aufgrund der hohen Umfangsgeschwindigkeit (Drehzahlen zwischen 15000 und 40000 min^{-1}) zerstäubt.

An den Kanten der Glocke lösen sich feine Fäden ab, die in Tröpfchen zerfallen. Die so entstehenden Lacktröpfchen werden aufgeladen. Der Transport zum Werkstück erfolgt durch die Feldkräfte und eine Ringluftströmung, die gleichzeitig die Breite und Homogenität des Sprühstrahls reguliert.



2.5 Beschichten

AUTOMATEN MIT EL.-STATISCHER AUSSENAUFLADUNG

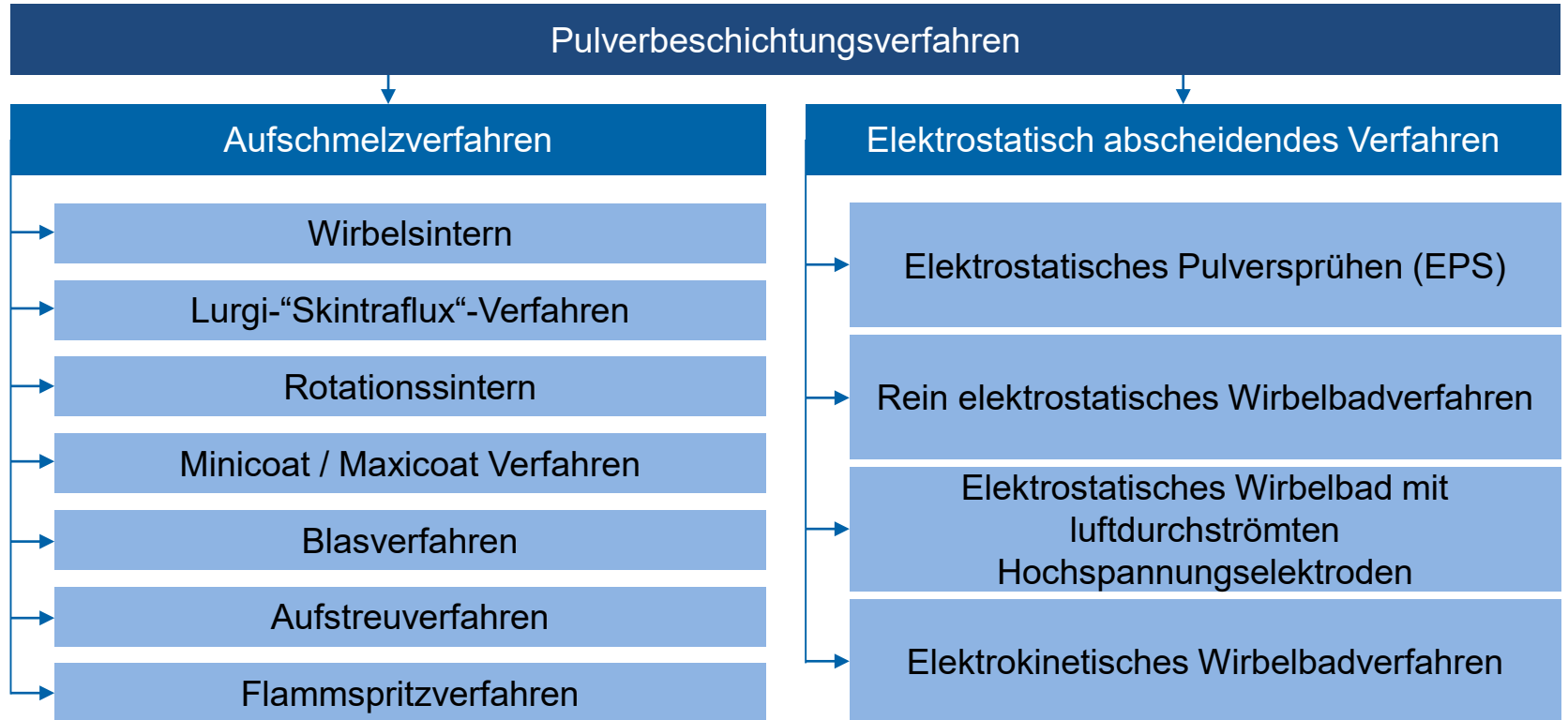


PULVERBESCHICHTUNG



2.5 Beschichten

EINTEILUNG



Quellen: Universität Duisburg – Essen

2.5 Beschichten

PROZESSABLAUF BEIM EL.-STATISCHEN PULVERLACKIEREN

Beschichten aus dem festen Zustand. Aufbringen einer pulverbasierten Schicht und anschließendes Einbrennen (Vernetzungsvorgang zu glatter Schicht) bei 150-200°C.

Verfahren:

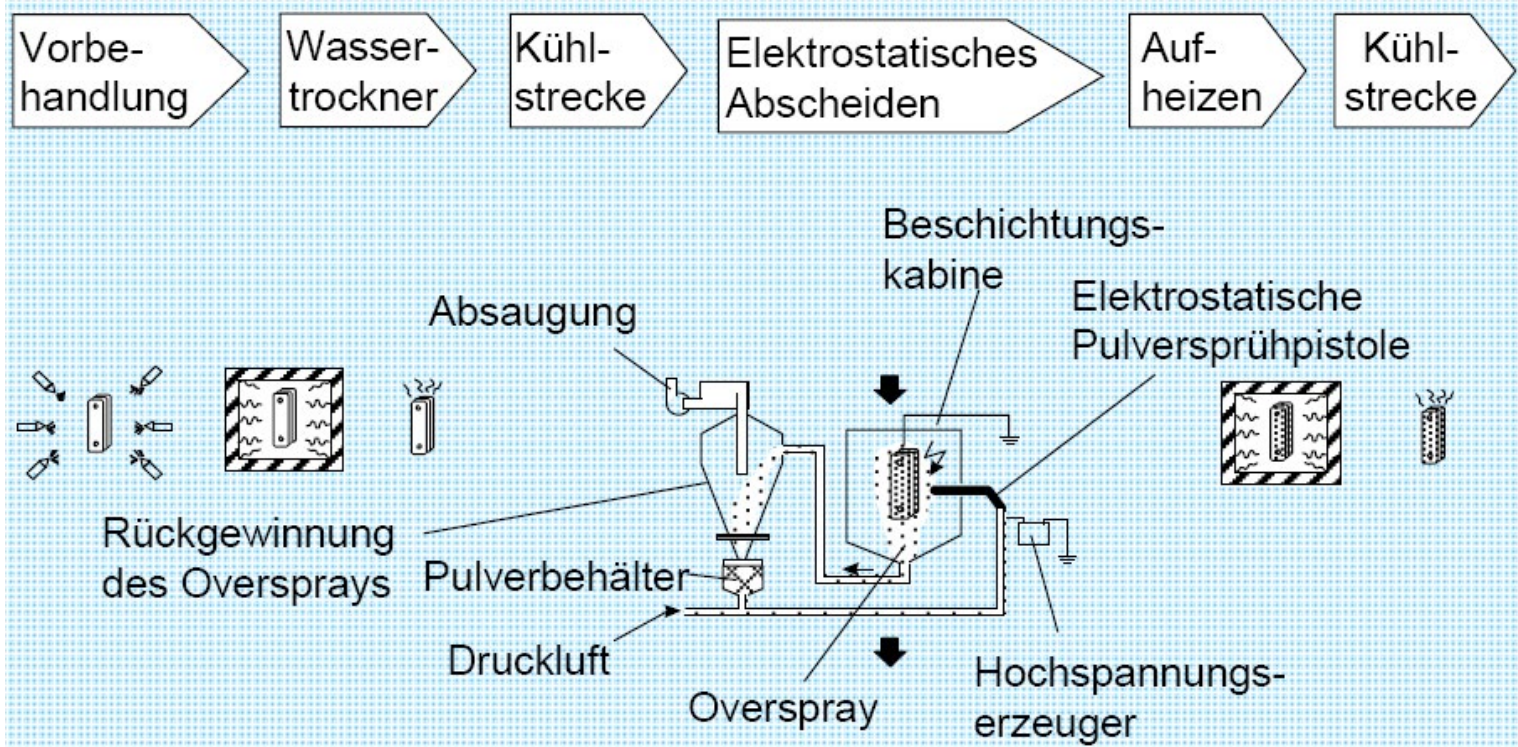
Elektrostatisches Pulversprühen (EPS).

Aufladung des Pulvers kann auf **zwei** unterschiedliche Arten erfolgen:

- **Korona-Sprühpistolen:**
Pulverteilchen können durch Anlagerung freier Luftionen aufgeladen werden, die an den hochspannungsführenden Koronaelektroden der Pistolen erzeugt werden.
- **Tribo-Pistolen:**
Der Aufladungsmechanismus der Pulverteilchen basiert auf reibungselektrischen Vorgängen beim turbulenten Durchströmen eines Kunststoffrohres im Pistolenkörper.

2.5 Beschichten

PROZESSABLAUF BEIM EL.-STATISCHEN PULVERLACKIEREN



BEISPIEL PULVERLACKIEREN



2.5 Beschichten

PVD-VERFAHREN (PHYSICAL VAPOUR DEPOSITION)

Beschichtung durch Sublimation eines festen Werkstoffes und Kondensation

Verfahren: Aufdampfen im Hochvakuum, Kathodenzerstäuben, Ionenplattieren.

Aufdampfen:

Rezipient wird evakuiert (Druck $< 10^{-3}$ Pa). Schichtwerkstoff wird durch Energiezufuhr verdampft (thermisch erzeugte Atome). Atome bewegen sich geradlinig zum Werkstück, wo sie kondensieren. Hochvakuum ist erforderlich, um Kollisionen mit Restgasatomen zu verhindern. Abscheidungsraten bei Elektronenstrahlverdampfern: $1 \mu\text{m/s}$.

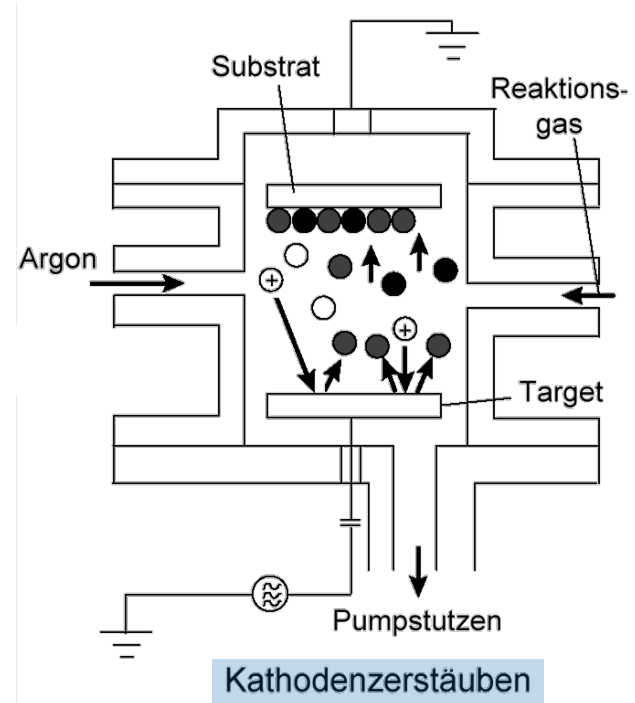
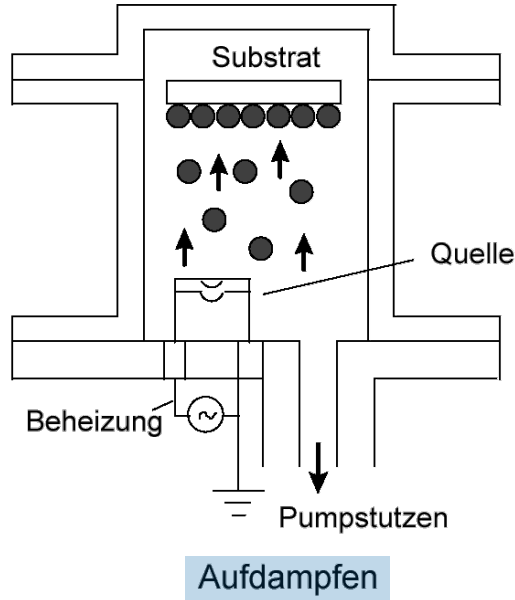
Beschichtung von Scheinwerferreflektoren, Herstellung von Spiegeln, Filtern usw.

Kathodenzerstäuben (Sputtern):

Für höhere mechanische Beanspruchung. Rezipient meist mit Argon (1 Pa) gefüllt. Durch Hochspannung entsteht eine Gasentladung, in der die Ar-Atome ionisiert werden. Ar-Ionen schlagen aus dem Schichtwerkstoff Atome heraus, die auf Werkstück kondensieren.

2.5 Beschichten

PRINZIPIELLE DARSTELLUNG DER PVD-VERFAHREN



2.5 Beschichten

CVD-VERFAHREN (CHEMICAL VAPOUR DEPOSITION)

Beschichtung durch chem. Reaktion eines Gases auf Werkstückoberfläche. Schichtbildung durch chemische Reaktion.

PECVD: Plasma Enhanced CVD und thermische Verfahren.

Plasmapolymerisation: Arbeitsdruck Rezipient: 10^{-1} - 10^2 Pa,

Abscheidungsrate: 1 $\mu\text{m}/\text{min}$, Schichtdicke: 20 μm .

Herstellung von Schichten mit Beständigkeit gegen organische Lösemittel, gutem Korrosionsschutz, elektrischer Isolation, guten mechanischen Eigenschaften.

Anwendung:

- Herstellung von Isolationsschichten,
- Korrosionsschutz,
- Beschichten von Textilfäden,
- Metallfolien,
- Thermisch aktiviertes CVD-Verfahren: Temperatur: 800-1100° C.

2.5 Beschichten

CVD-VERFAHREN (CHEMICAL VAPOUR DEPOSITION)

Vorteile: ggü. PVD-Verfahren:

- verschiedenartigere Schichten,
- gleichmäßigere Beschichtung, geringere Abschirmeffekte (kompliziertere Geometrien),
- meist bessere Haftung.

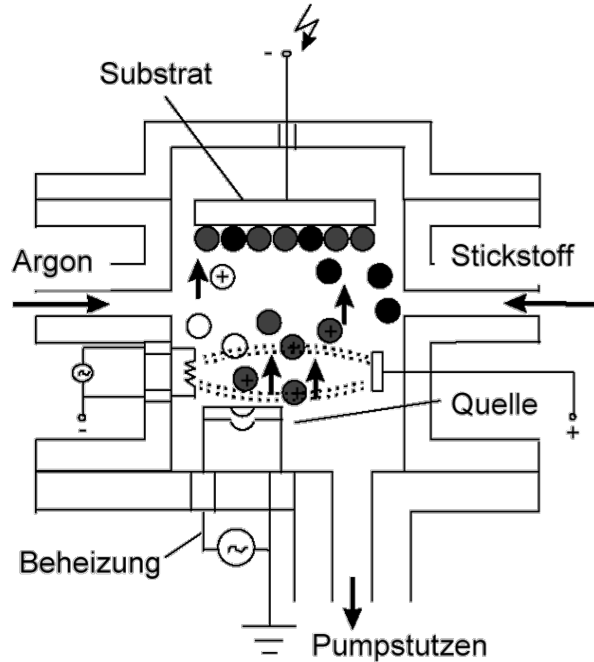
Nachteil:

- hohe Temperaturen notwendig.

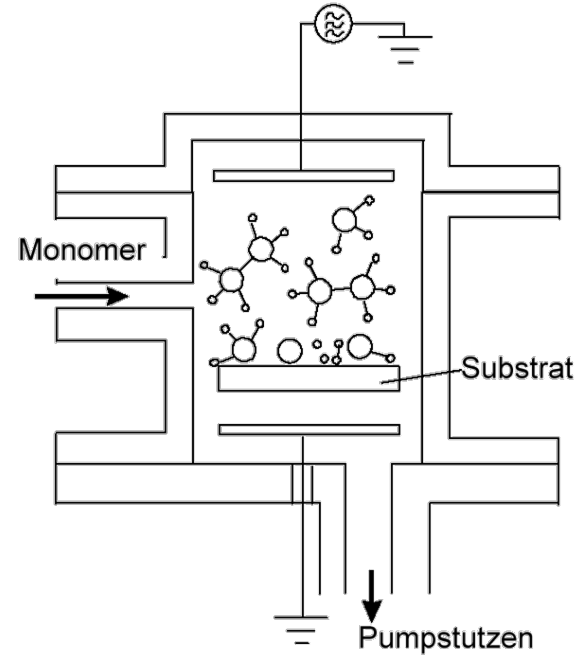
Anwendung:

- Verschleißschutz,
- Mikroelektronik.

PRINZIPIELLE DARSTELLUNG ZWEIER CVD-VERFAHREN



Ionenplattieren



Plasmapolymerisation

2.5 Beschichten

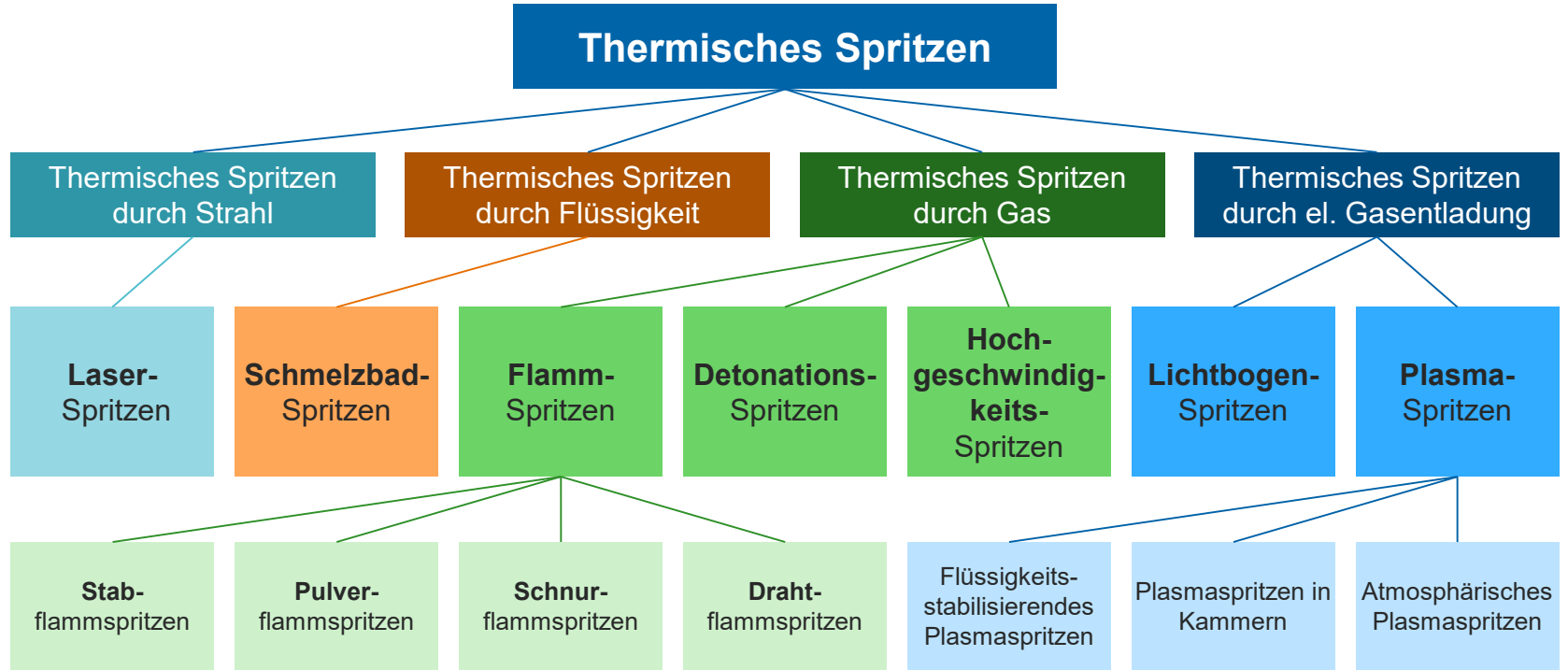
THERMISCHES SPRITZEN

Das Thermische Spritzen ist ein Beschichtungsverfahren, bei dem ein meist pulver- oder drahtförmiger Beschichtungswerkstoff mit hoher thermischer Energie auf eine Bauteiloberfläche aufgeschleudert wird und dort eine Schicht ausbildet.

Man unterscheidet eine Vielzahl von Prozessvarianten, wie z.B. das Plasmaspritzen, Hochgeschwindigkeits-Flammspritzen oder Lichtbogenspritzen, mit denen sich ein breites Spektrum an Werkstoffen wie Metallen, Keramiken und Polymeren zu funktionalen Beschichtungen verarbeiten lässt. Die Schichtdicken reichen von ca. 30 μm bis zu mehreren Millimetern.

Das Thermische Spritzen wird insbesondere bei verschleißfesten Kombinationsschichten eingesetzt, bei denen eine extreme Oberflächenhärte mit Antihaft- und Gleiteigenschaften oder verbesserten Traktionseigenschaften verbunden werden sollen

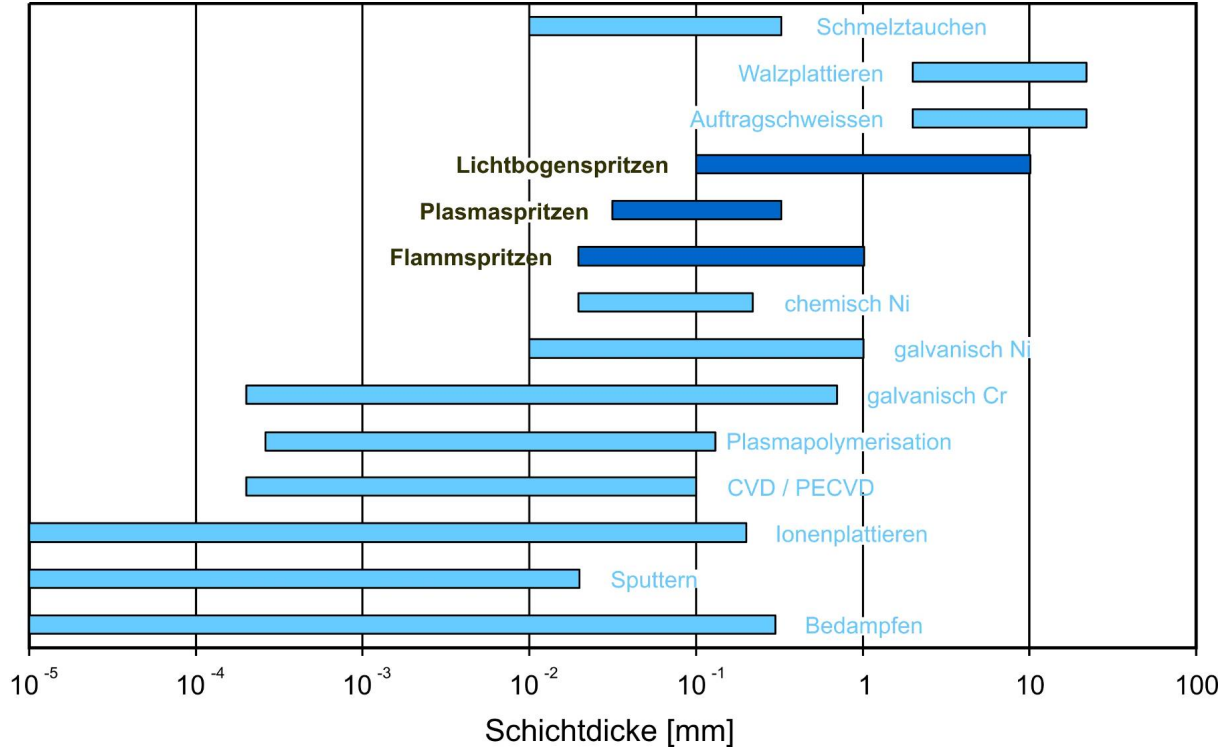
THERMISCHES SPRITZEN



Quellen: Universität Duisburg – Essen

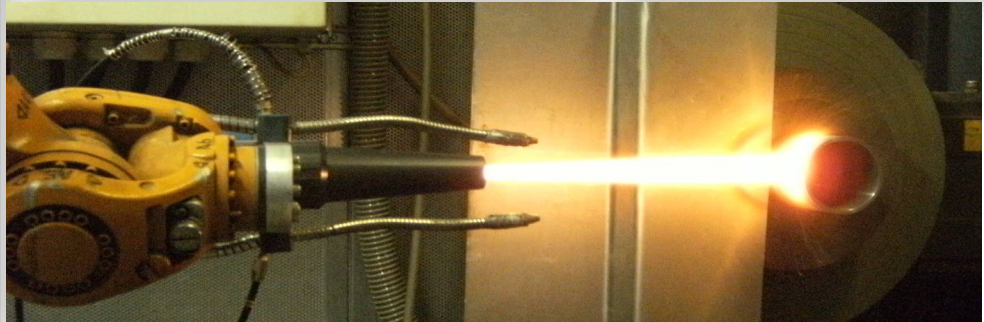
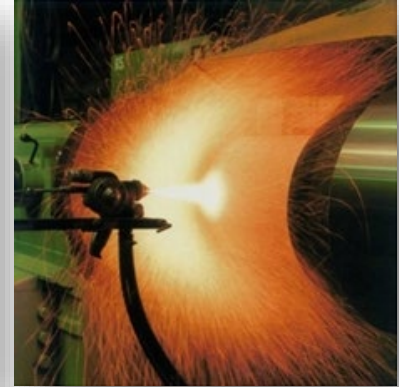
2.5 Beschichten

EINTEILUNG VON SPRITZVERFAHREN

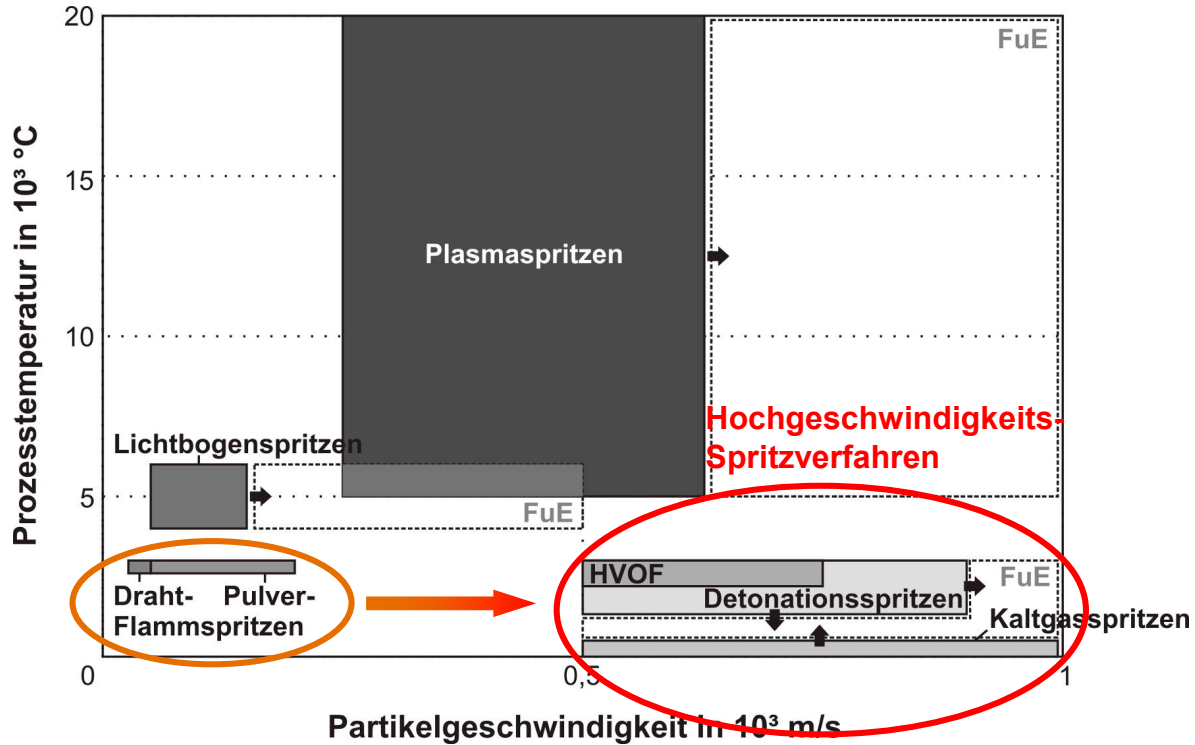


Quellen: TU Chemnitz IWW

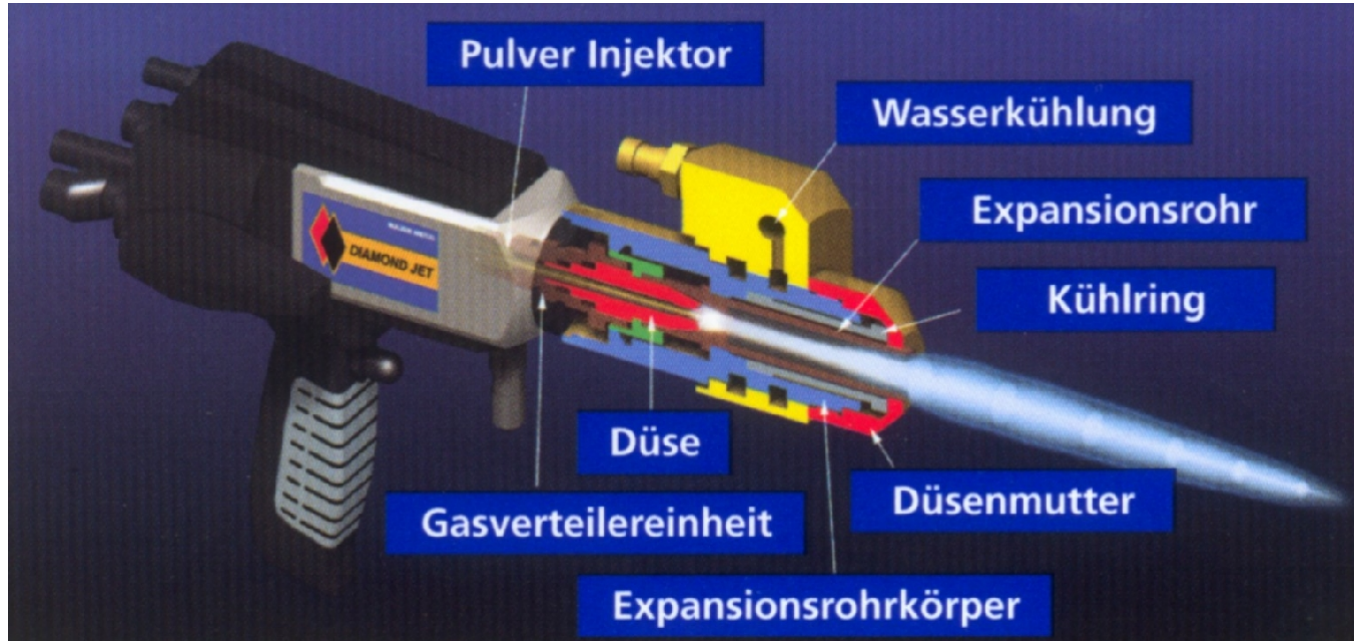
FLAMMSPRITZEN



HOCHGESCHWINDIGKEITSFLAMMSPRITZEN

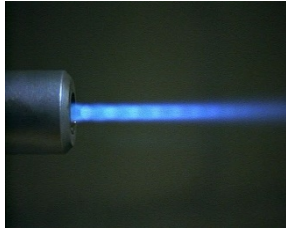


HOCHGESCHWINDIGKEITSFLAMMSPRITZEN



2.5 Beschichten

HOCHGESCHWINDIGKEITSFLAMMSPRITZEN



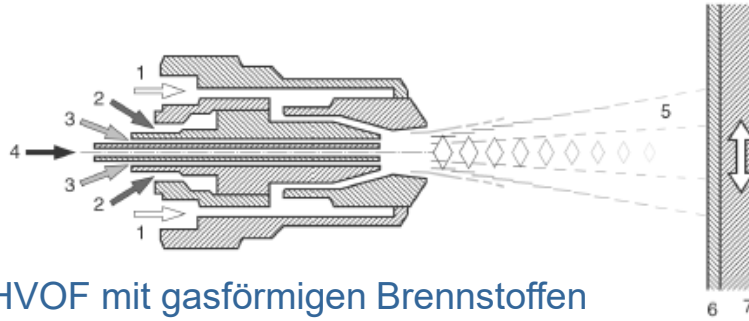
Flammentemperatur:	< 3.160 °C
Max. Partikelgeschwindigkeit:	650 m/s
Max. Auftragleistung:	8 kg/h (Metalle) 4 kg/h (Keramiken)



HVOF: High-velocity oxygen/fuel

2.5 Beschichten

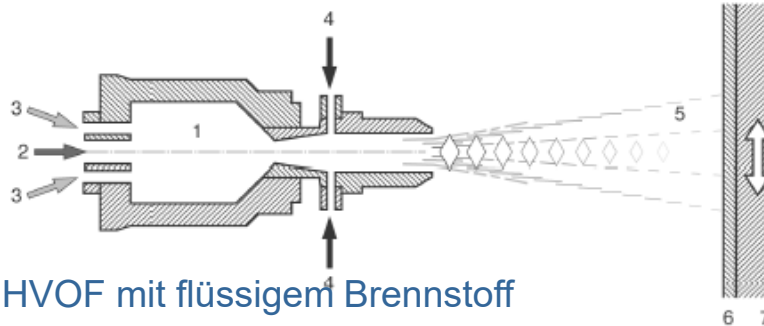
HOCHGESCHWINDIGKEITSFLAMMSPRITZEN



HVOF mit gasförmigen Brennstoffen

Legende

- 1 Druckluft
- 2 Brenngas
- 3 Sauerstoff
- 4 Pulver und Trägergas
- 5 Spritzstrahl
- 6 Spritzschicht
- 6 Grundwerkstoff



HVOF mit flüssigem Brennstoff

Legende

- 1 Brennkammer
- 2 Brenngas
- 3 Sauerstoff
- 4 Pulver und Trägergas
- 5 Spritzstrahl
- 6 Spritzschicht
- 7 Grundwerkstoff

2.5 Beschichten

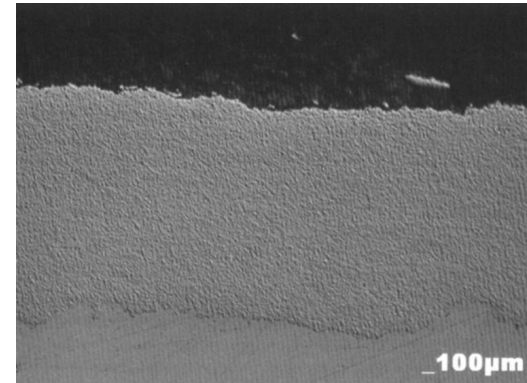
HOCHGESCHWINDIGKEITSFLAMMSPRITZEN

VORTEILE: „High-end“-Anwendungen

- Sehr dichte, gut haftende Hartmetall / Cermetschichten (WC-Co(Cr), Cr_3C_2 -Ni20Cr)
- Supraleitende keramische Überzüge ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$)
- Haftsichten (Ni20Cr, Ni5Al)
- Heißgaskorrosionsschutzschichten (MCrAlY)

NACHTEILE:

- Geräuschemission sehr hoch
- Prozessmitteldurchsatz sehr hoch
- kompliziertere Peripherie als in konventionellen Prozessen
- energetischer Wirkungsgrad relativ gering



HVOF WC-Co 88-12 Schicht

GLIEDERUNG DER VORLESUNG

1	Einführung: Grundlagen der Fertigungstechnik		
2	Die verschiedenen Fertigungsverfahren		
2.1	Urformen (Gießen, Additiv, ...)	2.4	Fügen (Schweißen, Löten, ...)
2.2	Umformen (Massiv-, Blech-, ...)	2.5	Beschichten
2.3	Trennen (Drehen, Fräsen, ...)	2.6	Stoffeigenschaft ändern
3	Messen in der Fertigung		
4	Prüfungsvorbereitung		

2.6 Stoffeigenschaft ändern

STOFFEIGENSCHAFT ÄNDERN

Stoffeigenschaftändern ist Fertigen durch Verändern der Eigenschaften eines Werkstoffes, aus dem ein Werkstück besteht.

Dies geschieht i. a. durch Veränderungen im submikroskopischen bzw. im atomaren Bereich, z. B. durch Diffusion von Atomen, Erzeugung und Bewegung von Versetzungen im Atomgitter und durch chemische Reaktionen.

Unvermeidbar auftretende Formänderungen (z. B. Härteverzug) gehören nicht zum Wesen dieser Verfahren (DIN 8580).

EINTEILUNG

Stoffeigenschaft ändern

Verfestigen durch
Umformen

Wärmebehandeln

Thermomechanisches
Behandeln

Sintern, Brennen

Magnetisieren

Bestrahlen

Photochemische
Verfahren

2.6 Stoffeigenschaft ändern

GRUNDLAGEN

Warum Stoffeigenschaft ändern?

Zur **Fertigung** von Werkstücken werden **Stoffeigenschaften** benötigt, die eine **wirtschaftliche Bearbeitung** zulassen, für das fertige Bauteil aber meist ungeeignet sind.

Definition Wärmebehandlung:

Wärmebehandlung ist eine Folge von Wärmebehandlungsschritten:

→ Zeit-Temperatur-Folgen

Ziel ist eine Änderung des Gefüges und somit der **Werkstoffeigenschaften**, gegebenenfalls eine Änderung der chemischen Zusammensetzung des Werkstoffes.

2.6 Stoffeigenschaft ändern

GRUNDLAGE WÄRMEBEHANDLUNG STAHLWERKSTOFFE

Werkstück wird Zeit-Temperatur-Folgen unterworfen, um eine Änderung des Gefüges und der Eigenschaften herbeizuführen. Die Wärmebehandlungsverfahren werden in **thermische** und **thermochemische** Verfahren unterteilt.

Thermische Verfahren:

Hier werden die Stoffeigenschaftsänderungen der Werkstücke nur durch Umwandeln von Stoffteilchen, d.h. durch Zeit-Temperatur-Folgen herbeigeführt; ein Einbringen oder Aussondern von Stoffteilchen ist nicht beabsichtigt.

Thermochemische Verfahren:

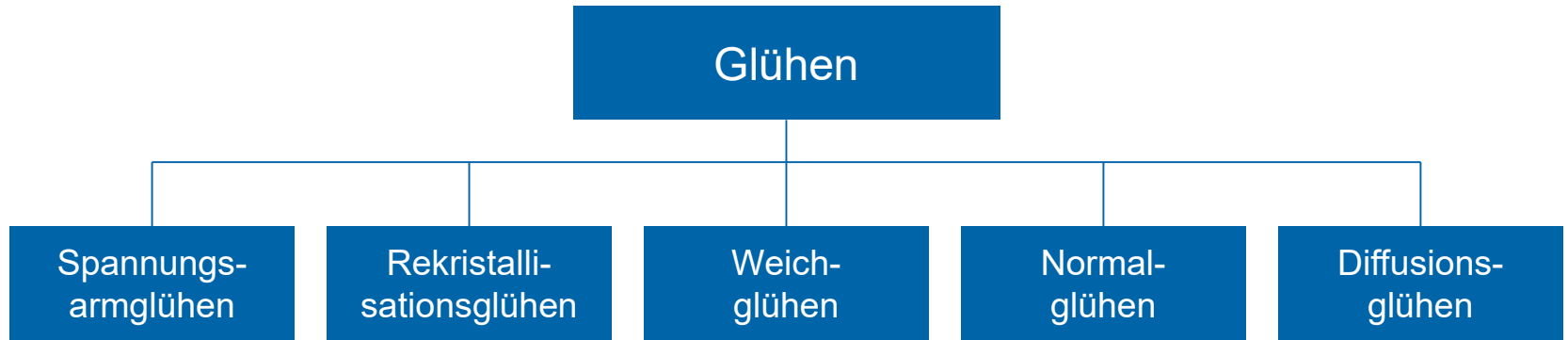
Das Stoffeigenschaftsändern erfolgt durch thermische Behandlung und gezielten Stoffaustausch. Die Wärmeübertragung beim Erwärmen und Abkühlen des Werkstückes hat großen Einfluss auf das Ergebnis der Wärmebehandlung. Sie kann indirekt durch Strahlung oder Konvektion oder direkt auf induktive oder konduktive Weise erfolgen.

In der Fertigungstechnik hat die **Wärmebehandlung** von Stahlwerkstoffen die größte Bedeutung; sie wird auch bei NE-Metallen (z.B. bei Al,- Ti- oder Cu-Legierungen) zur Verbesserung ihrer Eigenschaften angewandt.

2.6 Stoffeigenschaft ändern

GLÜHEN

THERMISCHES WÄRMEBEHANDLUNGSVERFAHREN



2.6 Stoffeigenschaft ändern

GLÜHVERFAHREN

Weichglühen:

Verbesserung der Bearbeitbarkeit von C-Stählen.

Normalglühen:

Beseitigung von Grobkornbildung, Gefüge- und Eigenschaftsänderungen, die durch vorherige Behandlung verursacht wurden. Temperatur: oberhalb GS-Linie bei untereutektoiden Stählen; oberhalb der SK-Linie bei übereutektoiden Stählen.

Grobkornglühen:

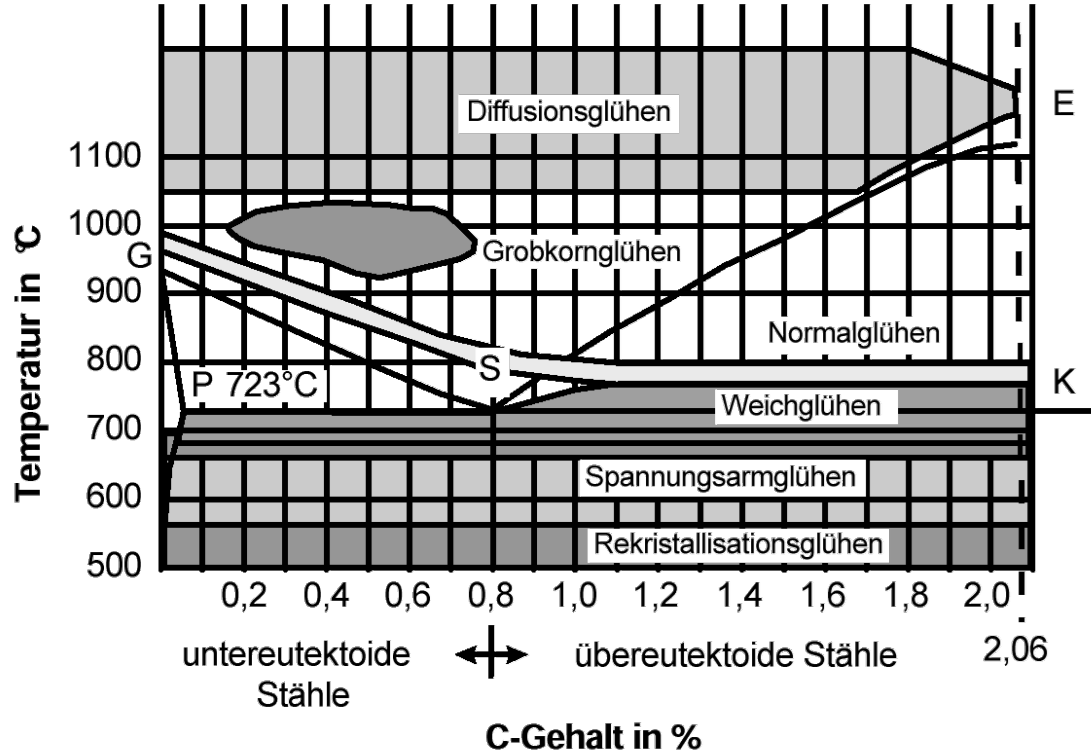
Ziel ist die Verbesserung der Zerspanbarkeit weicher Stähle. Durch Kornvergrößerung entstehen kurzbrüchige Scherspäne. Werkstücke werden auf Temperaturen von ca. 150 °C oberhalb der GS-Linie erwärmt und nach einem mehrstündigen Halten abgekühlt.

Diffusionsglühen:

Beseitigung von Seigerungszone (Konzentrationsunterschiede der Legierungselemente im Werkstoff). Glühbehandlung bei Temperaturen zwischen 1000 und 1300° C (dicht unterhalb der Soliduslinie). Haltezeit: bis 40 h. Anschließendes Normalglühen zur Beseitigung des Grobkornes.

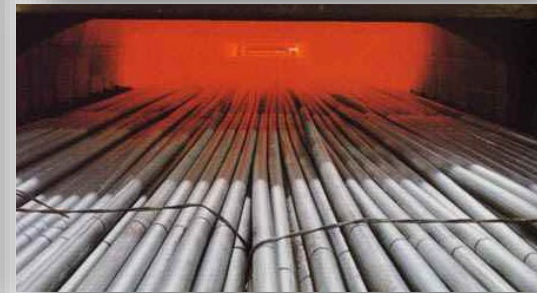
2.6 Stoffeigenschaft ändern

TEMPERATURBEREICHE



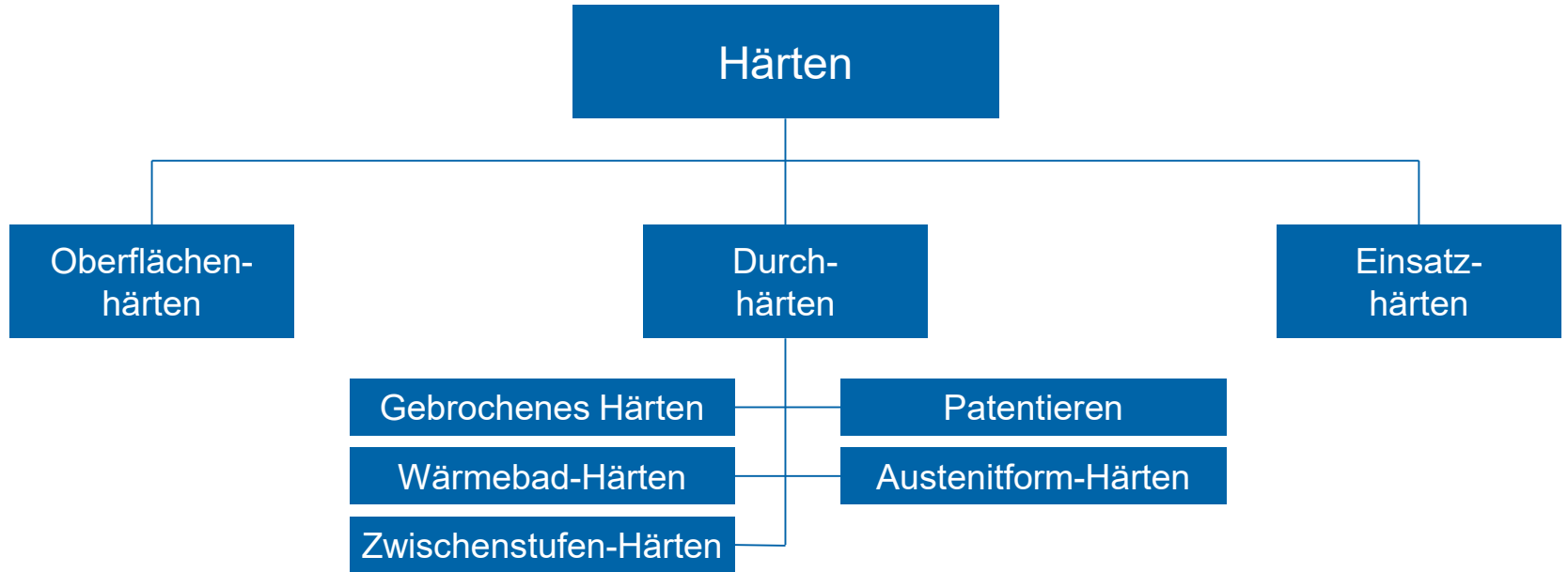
2.6 Stoffeigenschaft ändern

WÄRMEBEHANDLUNG



HÄRTEN

THERMISCHES WÄRMEBEHANDLUNGSVERFAHREN



2.6 Stoffeigenschaft ändern

TEMPERATUR-ZEIT-VERLAUF BEIM VERGÜTEN

Härten:

Wärmebehandlung eines Werkstoffes, bestehend aus Austenitisieren und Abkühlen unter solchen Bedingungen, dass eine Härtezunahme durch mehr oder weniger vollständige Umwandlung des Austenits in Martensit und ggf. Bainit erfolgt.

Anlassen:

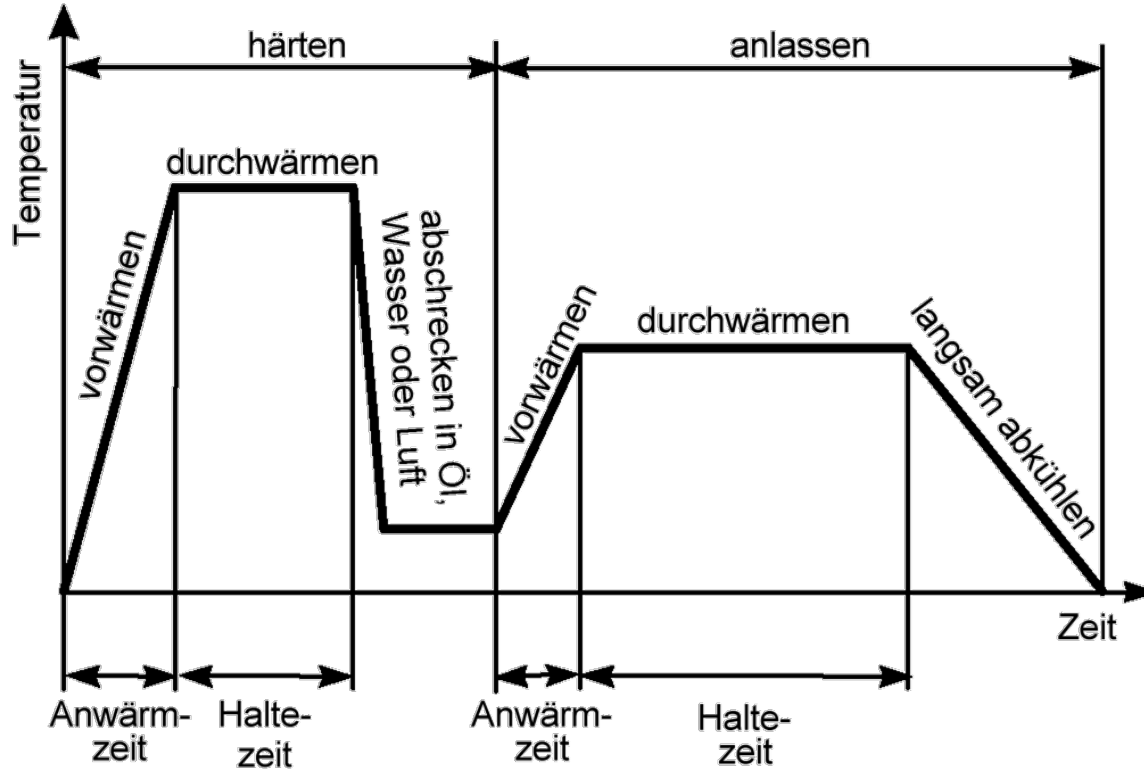
Ein- oder mehrmaliges Erwärmen eines gehärteten Werkstückes auf eine vorgegebene Temperatur, Halten auf dieser Temperatur und anschließendes zweckentsprechendes Abkühlen (DIN 17014).

Vergüten:

Härten mit nachfolgenden Anlassen meist oberhalb 550° C, um eine gewünschte Kombination mechanischer Eigenschaften zu erreichen.

2.6 Stoffeigenschaft ändern

TEMPERATUR-ZEIT-VERLAUF BEIM VERGÜTEN



2.6 Stoffeigenschaft ändern

KRISTALLUMWANDLUNG BEIM HÄRTEN

THERMISCHES HÄRTEN

Unterscheidung nach:

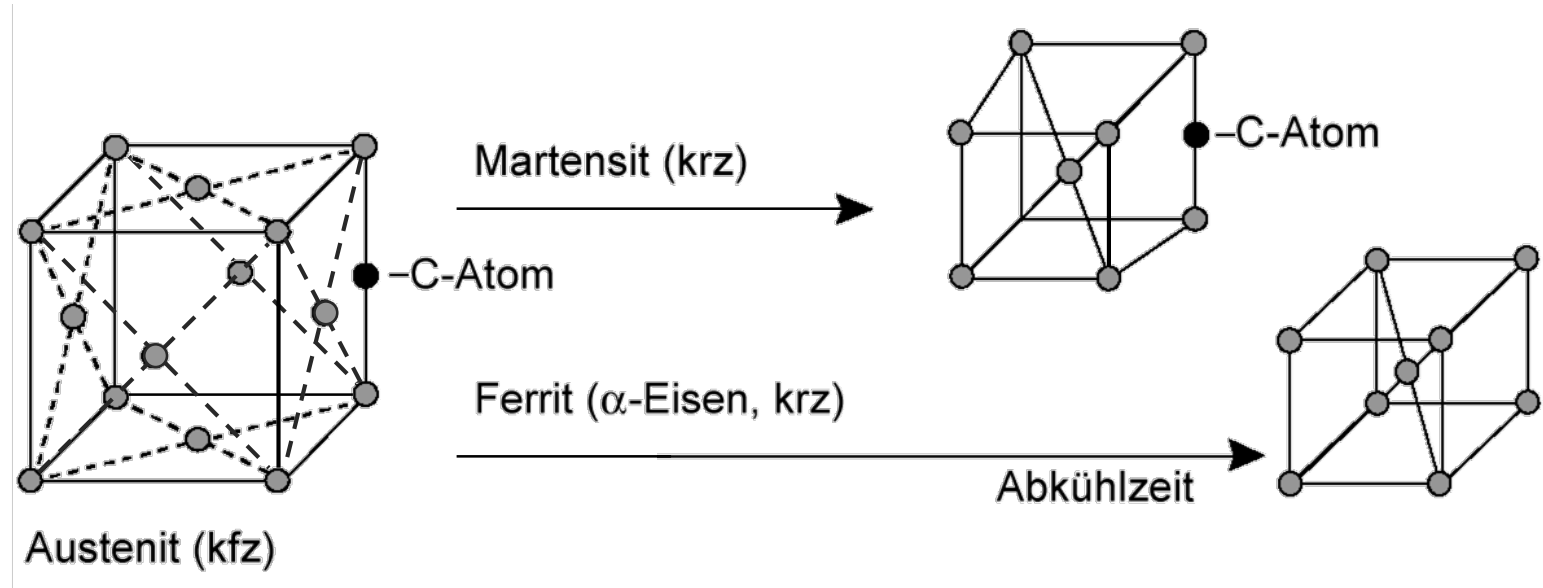
Härten nach Volumenerwärmung: Erwärmung des Werkstückes auf Temperatur von 50° C oberhalb GSK-Linie und Abschrecken (im Wasser, Öl usw.)

Randschichthärten: schnelle Erwärmung, so dass die Randschicht Härtetemperatur erreicht. Dadurch behält der Kern des Werkstückes seine ursprünglichen Eigenschaften. Bei langsamer Abkühlung erfolgt eine Umwandlung von kubisch flächenzentrierten g-Mischkristallen (Austenit) in:

- kubisch raumzentrierte α -Mischkristalle (Ferrit); geringe Löslichkeit für C (0,02 % bei 723°C) bzw.
- Perlit (Gemenge von Ferrit und Zementit Fe₃C), Abscheidung von C als Zementit.

Der in Austenit gelöste Kohlenstoff hat genügend Zeit, sich durch Diffusionsvorgänge auszuscheiden. Bei schneller Abkühlung (Härten) erfolgt eine Umwandlung von Austenit in Martensit mit kubisch-raumzentriertem Gitter, keine C-Ausscheidung möglich. Kristallgitter wird gespannt.

KRISTALLUMWANDLUNG BEIM HÄRTEN



2.6 Stoffeigenschaft ändern

EIGENSCHAFTSÄNDERUNG

BEI VERSCHIEDENEN HÄRTETEMPERATUREN

Die Härte (Verspannung) nimmt mit dem C-Gehalt zu (ab C-Gehalt von 0,3 %: deutliche Härtesteigerung). Gefüge ist thermodynamisch instabil (Anlassen).

Verfahren beim Härten nach Volumenerwärmung (Durchhärten)

Gebrochenes Härten:

Abkühlung in Wasser, dann im Öl.

Warmbadhärten:

Schnelles Abkühlen auf Temperatur knapp oberhalb Martensitbildung, Halten, Umwandlung von Austenit in Martensit. Gefahr von Verzug und Härterissen vermindert.

Zwischenstufenhärten:

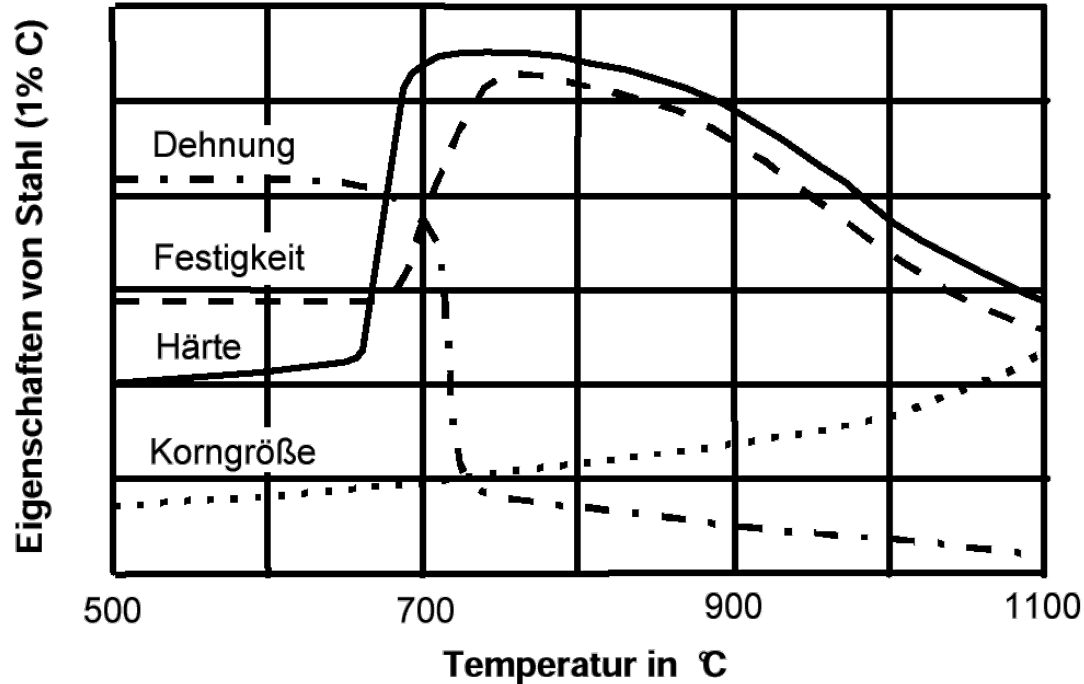
Ähnlich wie Warmbadhärten, nahezu vollständige Umwandlung in Bainit.

Patentieren:

Art des Zwischenstufenhärtens, für Stahldraht, -band. Von 900° C schnell in Salz- oder Bleibad auf 400 - 500° C abgekühlt. Umwandlung in Perlit oder Bainit.

2.6 Stoffeigenschaft ändern

QUALITATIVER VERLAUF BEI VERSCHIEDENEN HÄRTETEMPERATUREN



2.6 Stoffeigenschaft ändern

RANDSCHICHTHÄRTEN

Erwärmung auf Härtetemperatur und Abkühlung so schnell, dass keine Umwandlung im Kern stattfindet. Verminderung Sprödbruchgefahr (Wellen, Zahnräder).

Tauchhärten:

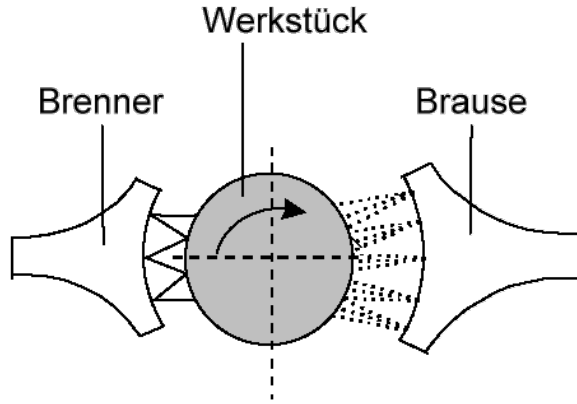
Eintauchen in Salz-, Metallbad bei 1000-1200° C.

Flammhärten:

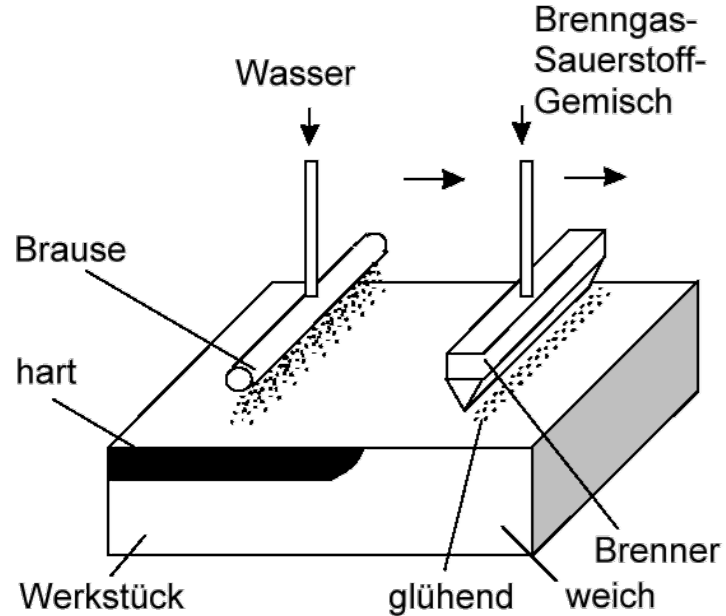
Härtetemperatur wird durch Brenngas-Sauerstoffflammen erreicht. Je nach Werkstückform und Brenner werden die Verfahren Mantel- und Linienhärtung unterschieden.

2.6 Stoffeigenschaft ändern

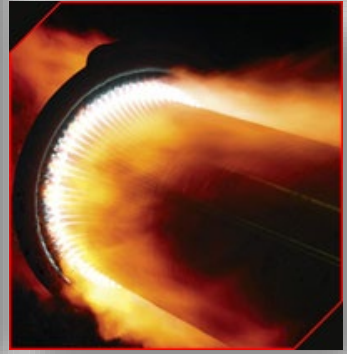
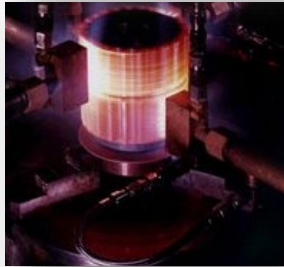
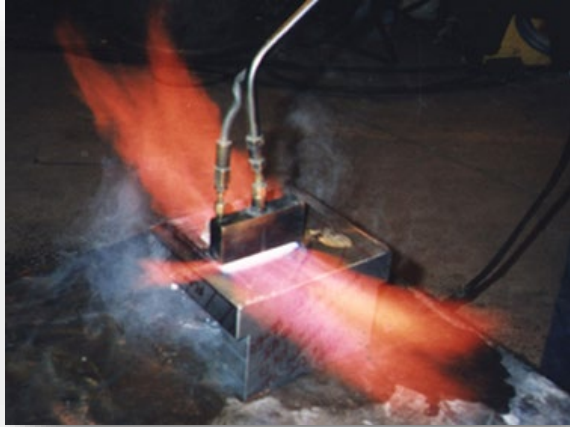
PRINZIP FLAMMHÄRTEN



Flammhärten:
Gesamtflächenhärtung mit
umlaufendem Werkstück



BEISPIEL FLAMMHÄRTEN



2.6 Stoffeigenschaft ändern

INDUKTIONSHÄRTEN

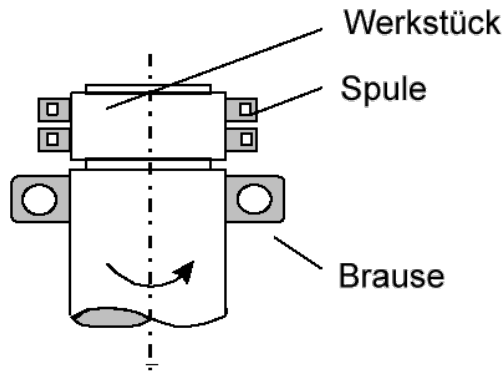
Die Randschicht wird in einer Hochfrequenzspule erhitzt (induzierte Wirbelströme). Die Wärme gelangt hier nicht von der Oberfläche her in das Werkstück, sondern sie entsteht in der zu härtenden Schicht.

Die Härtetiefe kann durch Variation der Stromfrequenz beeinflusst werden. Sie wird mit zunehmender Frequenz geringer.

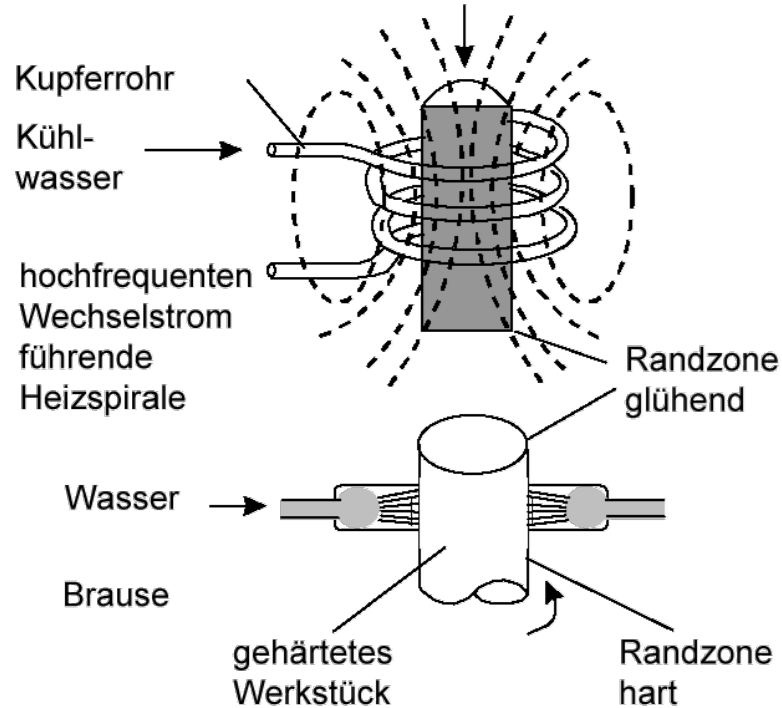
Das Induktionshärten wird automatisiert (mit Handhabungseinrichtungen zum Be- und Entladen) in der Großserienproduktion z. B. zum Härten von Nocken- und Kurbelwellen eingesetzt.

2.6 Stoffeigenschaft ändern

PRINZIP DES INDUKTIONSHÄRTENS

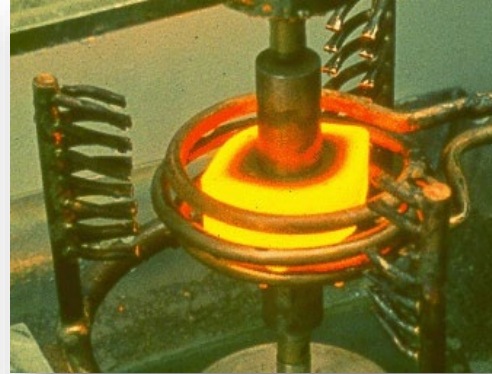


Induktionshärten:
Induktive Linienhärtung
mit rotierendem Werkstück



2.6 Stoffeigenschaft ändern

BEISPIEL INDUKTIONSHÄRTEN



2.6 Stoffeigenschaft ändern

STRAHLHÄRTEN

Mit Laser- oder Elektronenstrahl. Verfahren ermöglicht hohe Aufheizungsgeschwindigkeiten mit sehr dünnen Härteschichten (0,01 mm) und einem feinen Martensitgefüge hoher Härte. In der Regel keine Flüssigkeitsabkühlung erforderlich, da die Randschicht durch Wärmeleitung in das kalte Grundmaterial erkaltet (Selbstabschreckung).

Die Laserleistung kann variiert werden; zu langsame Vorschubgeschwindigkeiten (im Bereich von 0,5m/min bei 2,5 kW führen zum Aufschmelzen der Oberfläche. Je nach Werkstoff sind mit einer Laserleistung von 2,5 kW Vorschubgeschwindigkeiten zwischen 1 und 2 m/min zu erreichen.

2.6 Stoffeigenschaft ändern

THERMOCHEMISCHE WÄRMEBEHANDLUNGSVERFAHREN VON STAHLWERKSTOFFEN

Hierzu gehört das Stoffeigenschaftsändern durch Einbringen und Aussondern von Stoffteilchen. Die randnahen Bereiche des Wärmebehandlungsgutes werden entweder durch Eindiffusion von Nichtmetallen (C, N) oder Metallen (Cr, Al, Si) oder durch Effusion in ihrer chemischen Zusammenstellung gezielt verändert.

Ziel der Eindiffusion:

Der Randschicht sollen bestimmte Eigenschaften, wie z.B. Härte, Zunderbeständigkeit, Korrosionsbeständigkeit und erhöhter Verschleißwiderstand verliehen werden. Effusion von Nichtmetallen (C) bei Entkohlen, mit dem Ziel, den Kohlenstoffgehalt in der Randschicht eines Werkstückes zu verringern.

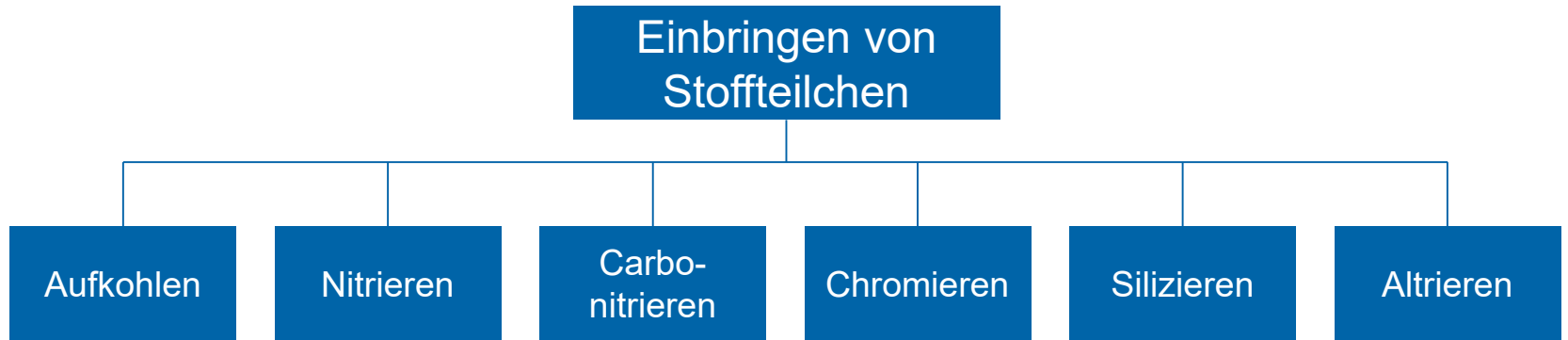
Eindiffusion von Nichtmetallen

Die wichtigsten Verfahren sind hier das Aufkohlen (Einsatzhärten) und das Nitrieren durch Eindiffusion von Stickstoff.

2.6 Stoffeigenschaft ändern

EINBRINGEN VON STOFFTEILCHEN

THERMOCHEMISCHES WÄRMEBEHANDLUNGSVERFAHREN



2.6 Stoffeigenschaft ändern

THERMOCHEMISCHE WÄRMEBEHANDLUNGSVERFAHREN

Aufkohlen:

Bei Stählen mit 0,1 - 0,25 % C. Anreicherung in der Randschicht durch Glühen bei 850 - 950 °C in C-abgebenden Mitteln.

Nitrieren:

Eindiffusion von Stickstoff bei 500 - 600 °C in Ammoniak-Gasstrom oder Cyansalzbädern. Höhere Härte und Verschleißfestigkeit. Lange Nitrierzeit (100 h für Nitriertiefe von 0,6 mm). Kein Abschrecken erforderlich, dadurch minimaler Verzug. Alle Arbeiten außer Feinbearbeitung können vor dem Nitrieren erfolgen. Es eignet sich besonders bei Präzisionswerkstücken wie Messwerkzeugen.

Carbonitrieren:

Kombination von Einsatzhärten und Nitrieren in spez. Cyansalzbädern bei etwa 800 °C. Meistens schließt sich ein Abschrecken an, um die durch Nitridbildung erreichte Härte durch eine Martensitumwandlung noch weiter zu erhöhen.



Additive Fertigung

FERTIGUNGSTECHNIK 20/21 - 16

Technische Universität Bergakademie Freiberg
IMKF - Additive Fertigung
Agricolastraße 1, 09599 Freiberg, Germany

Prof. Dr.-Ing. Henning Zeidler
Tel: +49 3731 39 30 66
henning.zeidler@imkf.tu-freiberg.de

