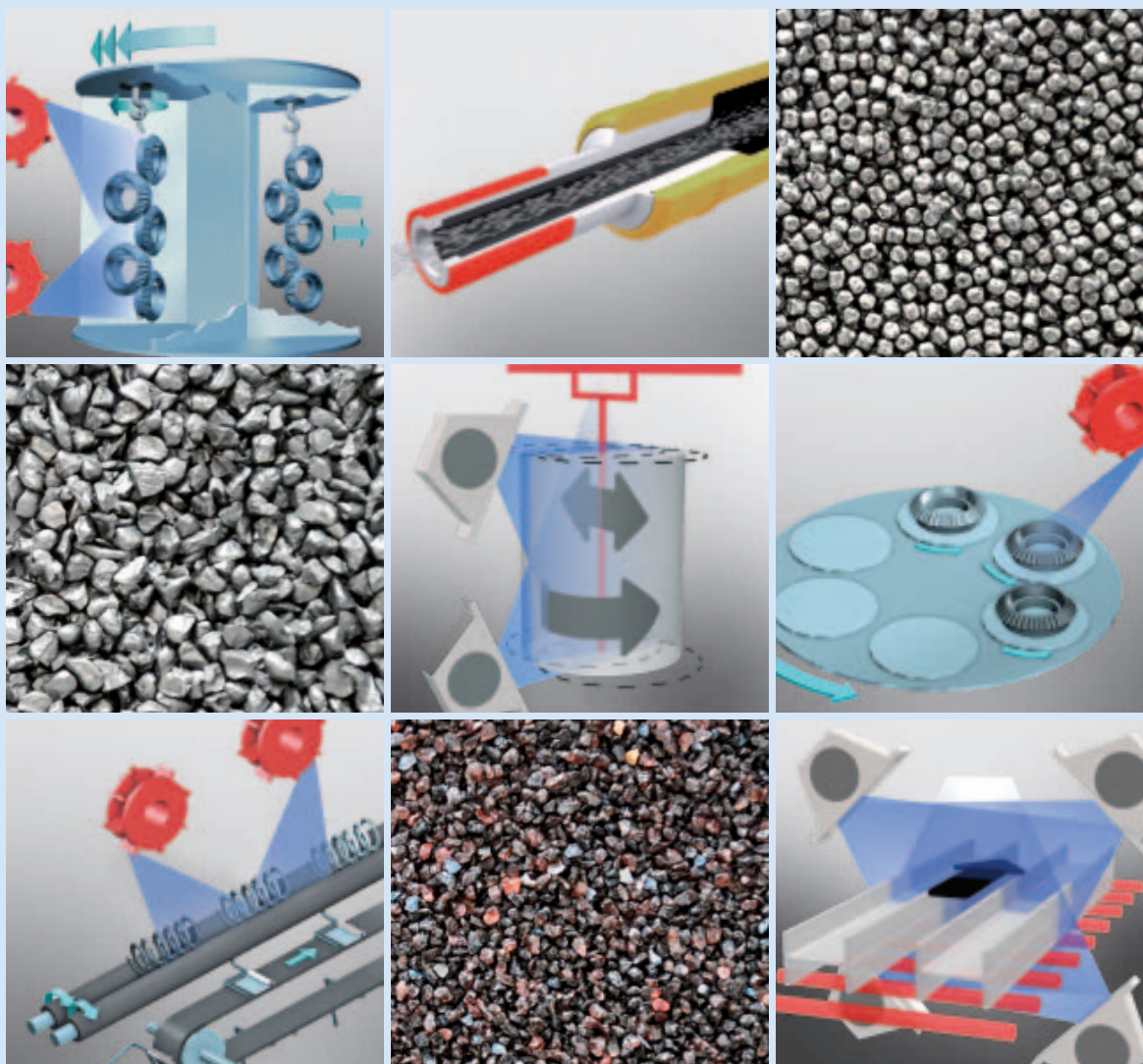


Merkblatt 212

# Strahlen von Stahl



**Stahl-Informations-Zentrum**

## Stahl-Informations-Zentrum

Das Stahl-Informations-Zentrum ist eine Gemeinschaftsorganisation Stahl erzeugender und verarbeitender Unternehmen. Markt- und anwendungsorientiert werden firmenneutrale Informationen über Verarbeitung und Einsatz des Werkstoffs Stahl bereitgestellt.

Verschiedene **Schriftenreihen** bieten ein breites Spektrum praxisnaher Hinweise für Konstrukteure, Entwickler, Planer und Verarbeiter von Stahl. Sie finden auch Anwendung in Ausbildung und Lehre.

**Vortragsveranstaltungen** schaffen ein Forum für Erfahrungsberichte aus der Praxis.

**Messebeteiligungen und Ausstellungen** dienen der Präsentation neuer Werkstoffentwicklungen sowie innovativer, zukunftsweisender Stahlanwendungen.

Als **individueller Service** werden auch Kontakte zu Instituten, Fachverbänden und Spezialisten aus Forschung und Industrie vermittelt.

Die **Pressearbeit** richtet sich an Fach-, Tages- und Wirtschaftsmedien und informiert kontinuierlich über neue Werkstoffentwicklungen und -anwendungen.

Das Stahl-Informations-Zentrum zeichnet besonders innovative Anwendungen mit dem **Stahl-Innovationspreis** aus. Er ist einer der bedeutendsten Wettbewerbe seiner Art und wird alle drei Jahre ausgelobt ([www.stahlinnovationspreis.de](http://www.stahlinnovationspreis.de)).

Die **Internet-Präsentation** ([www.stahl-info.de](http://www.stahl-info.de)) informiert u.a. über aktuelle Themen und Veranstaltungen und bietet einen Überblick über die Veröffentlichungen des Stahl-Informations-Zentrums. Schriftenbestellungen sowie Kontaktaufnahme sind online möglich.

## Impressum

Merkblatt 212  
„Strahlen von Stahl“  
Ausgabe 2010  
ISSN 0175-2006

### Herausgeber:

Stahl-Informations-Zentrum,  
Postfach 10 48 42,  
40039 Düsseldorf

### Autor:

Dipl.-Ing. Volker Schneidau,  
45711 Datteln

### Redaktion:

Stahl-Informations-Zentrum

Die dieser Veröffentlichung zugrunde liegenden Informationen wurden mit größter Sorgfalt recherchiert und redaktionell bearbeitet. Eine Haftung ist jedoch ausgeschlossen.

Ein Nachdruck – auch auszugsweise – ist nur mit schriftlicher Genehmigung des Herausgebers und bei deutlicher Quellenangabe gestattet.

### Titelbild:

Auswahl einiger Strahlanwendungen und Strahlmittel.

### Mitglieder des Stahl-Informations-Zentrums:

- AG der Dillinger Hüttenwerke
- ArcelorMittal Bremen GmbH
- ArcelorMittal Commercial RPS S.à.r.l.
- ArcelorMittal Duisburg GmbH
- ArcelorMittal Eisenhüttenstadt GmbH
- Benteler Stahl/Rohr GmbH
- Gebr. Meiser GmbH
- Georgsmarienhütte GmbH
- Rasselstein GmbH
- Remscheider Walz- und Hammerwerke Böllinghaus GmbH & Co. KG
- Saarstahl AG
- Salzgitter AG
- ThyssenKrupp Electrical Steel GmbH
- ThyssenKrupp GfT Bautechnik GmbH
- ThyssenKrupp Steel Europe AG
- ThyssenKrupp VDM GmbH
- Wicked Westfalenstahl GmbH

## Inhalt

		Seite		Seite		Seite
	Vorbemerkungen .....	4	3.3 Schleuderradstrahlen ....	21	7.3.1 Einfluss auf Beschichtungen .....	39
1	Grundlagen der Strahltechnik .....	4	3.4 Schleuderradstrahlen mit nassen Strahlmedien .....	23	7.3.2 Einfluss auf Verfestigung und Druck-eigenspannungen .....	39
1.1	Einführung .....	4	3.5 Ultraschallstrahlen .....	24		
1.2	Begriffe der Strahltechnik .....	4	3.6 Thermisch-mechanische Strahlbehandlung .....	25	8 Strahlanlagentechnik und -betrieb .....	41
1.3	Definition des Verfahrens .....	4	4 Strahlmittel .....	25	8.1 Anlagenbaugruppen ....	41
1.4	Einordnung in die Fertigungsverfahren .....	5	4.1 Strahlmittelsorten .....	25	8.2 Anlagenbetrieb und -instandhaltung .....	41
1.5	Geschichte .....	5	4.2 Strahlmittel-eigenschaften .....	28		
			4.3 Strahlmittel-aufbereitung .....	28	9 Arbeitssicherheit und Umweltschutz .....	41
2	Strahlanwendungen .....	5	5 Anwendungsorientierte Verfahrensauswahl .....	29	9.1 Arbeitsschutz beim Strahlen .....	41
2.1	Putzstrahlen .....	6			9.1.1 Arbeitssicherheit beim Freistrahlen .....	42
2.2	Entzunderungsstrahlen ..	7	6 Grundlagen des Strahlprozesses .....	29	9.1.2 Gefahren durch Staub ..	43
2.3	Entrostungsstrahlen .....	8	6.1 Physikalische Wirkprinzipien .....	29	9.1.3 Gefahren durch Lärm ...	43
2.4	Entschichtungsstrahlen .	9	6.2 Strahlprozesstechnische Kenngrößen .....	32	9.1.4 Brand- und Explosionsschutz .....	43
2.5	Abtragstrahlen .....	9	6.3 Anforderungsgerechte Strahlprozessführung ...	32	9.2 Umweltschutz beim Strahlen .....	44
2.6	Trennstrahlen .....	9	6.3.1 Strahlgutkenngrößen ...	32	9.2.1 Trennung des Strahlbereiches von der Umwelt .....	44
2.7	Entgratstrahlen .....	10	6.3.2 Strahlkenngrößen .....	33	9.2.2 Emissionen von Filteranlagen .....	44
2.8	Raustahlen .....	10	6.3.3 Betriebskenngrößen ....	34	9.2.3 Lärmemissionen .....	44
2.9	Mattierstrahlen .....	10			9.2.4 Entsorgung .....	44
2.10	Glätt- und Polierstrahlen .....	11	7 Eigenschaften und Prüfung gestrahlter Oberflächen .....	35		
2.11	Verfestigungsstrahlen (Kugelstrahlen) .....	11	7.1 Bewertung durch Kenngrößen .....	35	10 Kosten des Strahlens ....	45
2.12	Umformstrahlen .....	12	7.2 Bewertungs- und Messverfahren .....	36	11 Normen und Regelwerke .....	45
			7.3 Oberflächengestalt und -funktion .....	39	12 Literaturhinweise .....	47
3	Strahlssysteme .....	12			13 Bildnachweis .....	47
3.1	Druckluftstrahlen mit trockenen Strahlmedien .....	14				
3.1.1	Injektorstrahlssystem ....	15				
3.1.2	Druckstrahlssystem .....	16				
3.1.3	Saugkopfstrahlen .....	17				
3.1.4	Saugstrahlen .....	18				
3.1.5	Trockeneisstrahlen .....	18				
3.2	Druckluftstrahlen mit nassen Strahlmedien ....	19				
3.2.1	Feuchtstrahlen .....	19				
3.2.2	Nassstrahlen .....	19				
3.2.3	Schlämmstrahlen .....	20				
3.2.4	Druckflüssigkeits-strahlen .....	20				
3.2.5	Heißwasser- und Dampfstrahlen .....	21				

## Vorbemerkungen

Mit der vollständigen Neuausgabe des vorliegenden Merkblatts „Strahlen von Stahl“ wird der zunehmenden Bedeutung der Strahltechnik insbesondere für den Werkstoff Stahl Rechnung getragen. Die strahltechnische Bearbeitung von Stahloberflächen hat weit reichende Bedeutung etwa für die Haltbarkeit nachfolgender Beschichtungen, aber etwa auch für die Dauerfestigkeit dynamisch belasteter Bauteile. Damit werden gleichzeitig immer auch Fragen der Wirtschaftlichkeit und Energieeffizienz technischer Produkte angesprochen.

Das Merkblatt bietet eine Einführung in die Grundlagen der Strahltechnik und schafft Klarheit über Fachbegriffe. Eine anwendungsorientierte Übersicht über verschiedene Strahlverfahren dient als Hilfe zur Verfahrensauswahl. Das Merkblatt sensibilisiert den Leser dafür, das Strahlen als „Prozess“ zu verstehen, der durch die beteiligten Prozesskenngrößen bestimmt wird und damit anforderungs- und effizienzorientiert geführt werden kann. Vorgestellt werden des Weiteren die wichtigsten Mess- und Prüfverfahren zur Qualitätssicherung für gestrahlte Oberflächen. Hinweise zur Anlagentechnik, zum Arbeits- und Umweltschutz, zu den Kosten des Strahlens sowie ein Überblick über einschlägige Normen runden das Informationsangebot ab.

## 1 Grundlagen der Strahltechnik

### 1.1 Einführung

Die jüngere Entwicklung der Strahltechnik wird durch die zunehmenden Anforderungen an technische Oberflächen insgesamt beeinflusst. Funktionalität und Ästhetik von Oberflächen sind bei

nahezu jedem technischen Produkt von entscheidender Bedeutung für Qualität und Markterfolg.

Insbesondere für metallische Oberflächen gibt es wenige technische Verfahren, die so vielfältig anwendbar sind wie die Strahltechnik. Mit Hilfe verschiedener Strahlverfahren werden Schichten ab- oder selten auch aufgetragen, Oberflächen aufgeraut oder geglättet, Randschichten verdichtet oder sogar ganze Bauteile gezielt umgeformt.

Die ursprünglichen Anwendungen, wie z. B. das Mattieren von Glas oder das Entsanden von Gussteilen, sind dabei erhalten geblieben. Hinzu gekommen sind vielfältige Anwendungen etwa im Bereich der Reinigung, des Abtragens, der Oberflächenveredelung und der Verfestigung bzw. Formgebung.

Die bestrahlten Werkstoffe reichen von Metallen über mineralische Baustoffe wie etwa Beton bis hin zu Glas und sogar Textilien. Mit der passenden Ausrüstung ist das Verfahren sowohl mobil vor Ort als auch im stationären Betrieb in der Massenproduktion einsetzbar.

### 1.2 Begriffe der Strahltechnik

**Strahltechnik** als Kurzform von **Strahlverfahrenstechnik** ist der Oberbegriff für die Oberflächenbehandlung mittels Strahlmitteln. Hierunter fallen alle Techniken zur Behandlung von Oberflächen unter Verwendung meist kornförmiger Medien, die mit hoher Geschwindigkeit auf die zu behandelnden Flächen gestrahlt werden.

Die Strahltechnik gehört damit zum Bereich der Oberflächen-technik, da der Strahl in Form von beschleunigten Körnern oder teils auch Flüssigkeiten lediglich auf die Werkstoffoberfläche unmittelbar einwirken kann. Eine mittelbare Strahlwirkung wird an metallischen Bauteilen jedoch immer

auch in oberflächennahen Schichten erzeugt, was diese Technik zur gezielten Beeinflussung von Werkstoffeigenschaften und sogar Bauteilgeometrien interessant macht.

Das **Sandstrahlen**, also das Strahlen mit Quarzsand als Strahlmittel, ist in Deutschland seit 1975 aufgrund der Silikosegefährdung (Staublunge) nur noch in wenigen Ausnahmen und unter Einhaltung erheblicher Sicherheitsmaßnahmen zulässig. Daher sollte dieser somit unzutreffende Begriff vermieden werden, wenngleich er sich als umgangssprachlicher Ausdruck bis heute gehalten hat.

Im deutschen Sprachraum sind die Strahltechnik und der Begriff des Strahls in völlig anderer Bedeutung auch aus anderen Bereichen der Technik bekannt, so z. B. aus der Schweißtechnik (Elektronenstrahlschweißen), der Lasertechnik (Laserstrahl) oder der Triebwerkstechnik (Strahltriebwerk oder Strahltrieb). Um Verwechslungen zu vermeiden, wird daher in einschlägigen Normen zum Strahlen grundsätzlich der eindeutige Begriff Strahlverfahrenstechnik verwendet.

### 1.3 Definition des Verfahrens

Die genaue Definition des Verfahrens „Strahlen“ und der damit verbundenen Fachbegriffe kann nach DIN 8200 erfolgen, auch wenn diese inzwischen ersatzlos zurückgezogen wurde:

„Strahlen ist ein Fertigungsverfahren, bei dem **Strahlmittel** (als Werkzeuge) in Strahlgeräten unterschiedlicher Strahlssysteme beschleunigt und zum Aufprall auf die zu bearbeitende Oberfläche eines Werkstückes (**Strahlgut**) gebracht werden.“

In dem so definierten Bearbeitungsprozess wirkt das Werkzeug Strahlmittel auf das Werkstück Strahlgut. Diese Klarstellung ist wichtig, da zum Teil der Begriff Strahlgut fälschlicherweise auch für das Strahlmittel verwendet wird.

Das jeweilige **Strahlverfahren** wird durch die vollständige Nennung folgender Angaben beschrieben:

**Strahlsystem**  
**Strahlanwendung**  
**Strahlmittelart**

Beispiel: Schleuderrad-Verfestigungsstrahlen mit Stahldrahtkorn

Die Strahlanwendung richtet sich nach dem Strahlzweck und ist dabei klar vom jeweiligen Strahlsystem zu trennen, das lediglich das Prinzip der Strahlmittelbeschleunigung definiert. Für verschiedene Strahlanwendungen (siehe Kapitel 2) können verschiedene Kombinationen aus Strahlsystem (Kapitel 3) und Strahlmittel (Kapitel 4) in Frage kommen. Kapitel 5 bietet dazu einen systematischen, anwendungsorientierten Katalog der Strahlverfahren.

#### 1.4 Einordnung in die Fertigungsverfahren

Die allgemeinen Fertigungsverfahren sind in der DIN 8580 festgelegt, die u.a. auf die DIN 8200 Bezug nimmt. Die physika-

lischen Wirkungen des Strahlprozesses und damit auch die technischen Anwendungen sind jedoch so vielfältig, dass das Strahlen als Untergruppe verschiedenen Gruppen und Hauptgruppen zuzuordnen ist. Eine entsprechende Übersicht zeigt die **Tabelle 1**.

Die Zuordnung des Oberflächenveredelungsstrahlens zur Gruppe Druckumformen ist nicht eindeutig, da es sich bei dieser Strahlanwendung in vielen Fällen um einen abtragenden und damit spanenden Prozess und nur zum Teil um einen Umformprozess im eigentlichen Sinne handelt.

#### 1.5 Geschichte

Das Strahlen wurde bereits 1870 von dem Amerikaner Benjamin C. Tilghman in den wesentlichen Grundideen des Druckluft- und Schleuderradstrahlens patentiert, aber erst in den 1930er Jahren kam es zur breiteren Anwendung durch Effizienzsteigerungen aufgrund technischer Weiterentwicklungen der Strahlsysteme und der Verfügbarkeit geeigneter Strahlmittel.

## 2 Strahlanwendungen

Die Unterteilung der strahlverfahrenstechnisch und fertigungstechnisch relevanten Anwendungen erfolgt nach dem Strahlzweck, also nach dem primären Ziel des Strahlens in Anlehnung an die DIN 8200. Diese normgerechte Gliederung ist jedoch nicht in allen Belangen vollständig und schlüssig, weshalb die Übersicht gemäß **Tabelle 2** (Seite 6) zum Teil erweitert und logisch neu sortiert wurde. Auf die Verwendung der in der Norm festgelegten Ordnungsnummern wird aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet.

Folgende Anwendungen werden unterschieden:

- **Reinigungsstrahlen** zum Entfernen von werkstofffremden Schichten, Partikeln oder Anhaftungen
- **Strahlspanen** zum gezielten Abtragen von Schichten oder Teilen des Grundwerkstoffs
- **Oberflächenveredelungsstrahlen** mit gezielter Veränderung der Oberflächenstruktur des Grundwerkstoffs zur Erzielung eines optischen oder haptischen Effekts oder zur Verbesserung der Haftung von nachfolgenden Beschichtungen
- **Kugelstrahlen** zur Verbesserung der Dauerfestigkeit oder zur Formgebung von Bauteilen ohne gewollten Materialabtrag

Als weitere Anwendung kommt noch das Aufstrahlen von Schutzschichten wie Zink hinzu, das industriell jedoch kaum Bedeutung hat, da hierfür effizientere Verfahren wie das Feuerverzinken oder das Spritzverzinken eingesetzt werden.

Das Prüfstrahlen zur vergleichenden Feststellung des Verschleißverhaltens von Werkstoffen gehört nicht zu den Fertigungsverfahren im engeren Sinne, kann aber auch dem Abtragstrahlen zugerechnet werden.

Hauptgruppe	Gruppen	Untergruppen
1 Urformen	–	–
2 Umformen	2.1 Druckumformen	2.1.6 Umformstrahlen
		2.1.7 Oberflächenveredelungsstrahlen
3 Trennen	3.3 Spanen mit geometrisch unbestimmten Schneiden	3.3.6 Strahlspanen
	3.6 Reinigen	3.6.1 Reinigungsstrahlen
4 Fügen	–	–
5 Beschichten	–	–
6 Stoffeigenschaft ändern	6.1 Verfestigen durch Umformen	6.1.1 Verfestigungsstrahlen

Tabelle 1: Einordnung der Strahltechnik in die Fertigungsverfahren nach DIN 8580

Strahlanwendung	Strahlzweck	Haupteinsatzgebiet
A Reinigungsstrahlen	A1 Putzen	Entfernen von Gießsand und Gießrückständen
	A2 Entzundern	Entfernen von Walz- und Schmiedezunder
	A3 Entrosten	Entfernen von Rost
	A4 Entschichten	Entfernen von Beschichtungen aller Art und Anhaftungen wie Schmutz oder Staub
B Strahlspanen	B1 Abtragen	Entfernen von oberflächennahen Partikeln oder Schichten des Grundwerkstoffes
	B2 Trennen	Zerteilen von Werkstücken
	B3 Entgraten	Entfernen von Schnitt- und Gussgraten
C Oberflächenveredelungsstrahlen	C1 Aufrauen	Erhöhung der Oberflächenrauheit
	C2 Mattieren	Aufrauen mit Strahlmitteln feiner Körnung
	C3 Glätten	Verringerung der Oberflächenrauheit
	C4 Polieren	Glätten mit Strahlmitteln feiner Körnung
D Kugelstrahlen (engl.: shot peening)	D1 Verfestigen (engl.: peening)	Einbringung von plastischer Verformung und Druckeigenspannungen an der Oberfläche dynamisch beanspruchter Bauteile zur Erhöhung der Dauerfestigkeit
	D2 Umformen (engl.: peen forming)	Einbringung von plastischer Verformung und Druckeigenspannungen zur Formgebung oder zum Richten von Bauteilen

Tabelle 2: Übersicht über die Strahlanwendungen

Sonderanwendungen wie etwa das Reinigungsstrahlen von verschmutzten Fassaden, Betonböden oder anderer allgemein verschmutzter Flächen gehören ebenfalls nicht zu den eigentlichen Fertigungsverfahren, können aber dem Entschichtungsstrahlen zugeordnet werden.

In ihrer tatsächlichen Strahlwirkung sind die in der Übersicht genannten Strahlanwendungen oftmals nicht klar voneinander zu trennen. So gilt in Bezug auf das Reinigungsstrahlen, dass jede Materialentfernung von werkstofffremden Schichten bei den meisten Verfahren auch einen teilweisen Abtrag des Grundwerkstoffes zur Folge hat. Ein Reinigungsstrahlen verändert also meist auch die Oberfläche des Grundwerkstoffes.

Ein Oberflächenveredelungsstrahlen auf metallischen Oberflächen bewirkt insbesondere bei rundkörnigem Strahlmittel gleich-

zeitig eine plastische Oberflächenveränderung im Sinne einer Verfestigung. Gleiches gilt für das Strahlspanen. Umgekehrt kann ein Kugelstrahlen nicht gänzlich ohne Oberflächenabtrag realisiert werden.

Teilweise werden solche Mehrfachwirkungen auch gezielt genutzt, sie müssen bei der Anwendung der Strahltechnik aber in jedem Fall besonders beachtet werden.

## 2.1 Putzstrahlen

Beim Putzstrahlen dient die im Strahlmedium enthaltene Energie zum Abschlagen bzw. abrasiven Entfernen von Fremdstoffen auf der eigentlichen Werkstückoberfläche. Das Spektrum möglicher Putzaufgaben ist breit gefächert. Art und Menge der Fremdstoffe bestimmen dabei die zur Reinigung erforderliche Energie

des Strahls und damit die Wahl des Strahlmittels und des Strahlsystems.

Zum Entfernen von Formsand und anderen Rückständen an den meist rauen Gussoberflächen wird ein energiereicher, durchschlagskräftiger Strahl benötigt, der sich am wirtschaftlichsten mit Schleuderrädern und relativ großen, runden Stahlkugeln erzeugen lässt. Ein Beispiel einer solchen Anwendung zeigt **Abb. 1**.

Insbesondere in Strahlanlagen zur Entsandung von Gussteilen muss die permanente Abführung von Grobteilen wie etwa Kernresten und Graten einerseits sowie des Sandes andererseits gewährleistet werden. Während die Grobteile durch einen Grobabscheider vom umlaufenden Strahlmittel getrennt werden, erfolgt die Sandabscheidung vom umlaufenden Stahlstrahlmittel in der Regel auf magnetischem Wege. Die Sandrückstände im Strahlmit-



Abb. 1: Putzstrahlen eines Motorblocks für einen Schiffsantrieb

tel sind zu minimieren, um einem unnötigen Verschleiß der strahlmittelführenden Anlagenteile durch die scharfkantigen und harten Quarzsandkörner vorzubeugen.

## 2.2 Entzunderungsstrahlen

Zunder entsteht durch die Hochtemperaturoxidation vieler Metalle bei Urform- und Umformprozessen an offener Luft. Die Ausprägung der Zunderschicht hinsichtlich ihrer Dicke und Konsistenz hängt außer von dem Werkstoff selbst entscheidend von den Prozessbedingungen ab. Häufig ist die Zunderdecke auch nicht in sich homogen, sondern besteht aus einer äußeren und einer inneren Schicht, die sich bei mechanischer Behandlung mit Strahlmitteln unterschiedlich verhalten können. **Abb. 2** zeigt ein typisches Beispiel.

Der Aufwand, der für die Entzunderung betrieben werden muss, hängt demnach einerseits vom Ausmaß und andererseits von der Art des Zunders ab. Während die Zunderdicke entscheidend von der Temperatur und der Verweildauer des Werkstücks an offener Luft bestimmt wird, ist die Zunderart eher vom Werkstoff abhängig. So bilden Kohlenstoffstähle sogenannten Trockenzunder aus,

der sich in der Regel leicht entfernen lässt, insbesondere wenn die Zunderschicht eine poröse bzw. spröde Struktur aufweist. Legierte Stähle hingegen bilden häufig sogenannten Klebezunder, eine dünne, in sich geschlossene und fest anhaftende Zunderschicht.

Zunderschichten weisen in der Regel eine hohe Härte auf. Dicke, aber spröde Zunderschichten erfordern eine hohe Durchschlagskraft der einzelnen Strahlkörner. Hierbei ist allerdings auch die Strahlwirkung auf der eigentlichen Werkstoffoberfläche zu beachten. Klebezunder hingegen lässt sich eher abrasiv mit vielen kleineren Strahlkörnern und damit größerer Angriffsfläche entfernen, wobei die erforderliche Intensität bzw. Bearbeitungszeit erheblich sein können.

Die o.g. Anforderungen werden strahltechnisch in der Regel am besten durch Strahlsysteme mit Schleuderrädern erfüllt, da diese gegenüber anderen Strahlsystemen bei großflächigen Anwendungen wirtschaftlicher zu betreiben sind. Andere Strahlsysteme kommen etwa bei kleineren Werkstücken mit niedrigerer erforderlicher Flächenleistung zum Tragen. Anlagentechnisch muss in jedem Falle beachtet werden, dass die abgestrahlten Oxide eine kantige Form sowie eine hohe Härte aufweisen und somit nicht im Strahlmittelkreislauf verbleiben dürfen. Zur Reduzierung des Verschleißes strahlmittelführender Anlagenteile ist daher eine effektive Sichtung des Umlaufmaterials zur Abtrennung der Oxide unbedingt erforderlich.



Abb. 2: Entzunderungsstrahlen von geschmiedeten Schrauben-Rohlingen

### 2.3 Entrostungsstrahlen

Rost ist das Oxidationsprodukt auf Eisen- und Stahloberflächen, das unter korrosiven Umgebungsbedingungen an der Atmosphäre, unter Wasser, im Erdreich oder unter anderen korrosiven Einflüssen entsteht. Die Rostausprägung hängt vom Werkstoff selbst, von den korrosiven Medien und der Dauer der Einwirkung ab. Die Rostbildung beginnt an der Bauteiloberfläche, aber setzt sich in tiefere Werkstoffschichten fort, so dass Narben entstehen können.

Mit Rostgraden bezeichnet man den optisch zu ermittelnden Rostbefall auf der Bauteiloberfläche. Die Art der Ermittlung der Rostgrade hängt davon ab, ob es sich um unbeschichtete oder beschichtete Stahloberflächen handelt.

Rostgrade auf warmgewalzten unbeschichteten Stahloberflächen sind nach DIN EN ISO 8501-1 gemäß **Tabelle 3** klassifiziert und können mit Hilfe der im Anhang zu dieser internationalen Norm enthaltenen fotografischen Vergleichsmuster näherungsweise bestimmt werden.

Andere Oberflächenzustände sind durch ergänzende Angaben zu beschreiben wie z.B. „D mit Schichtrost“. In Bezug auf das Strahlen ist die Norm auch auf Stahloberflächen anwendbar, die neben Zunder noch Reste von

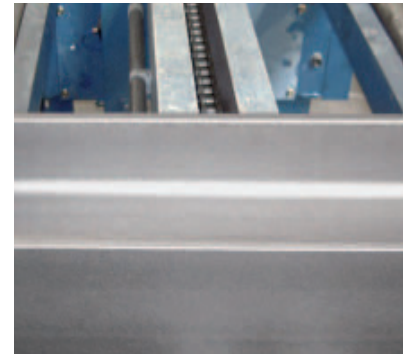
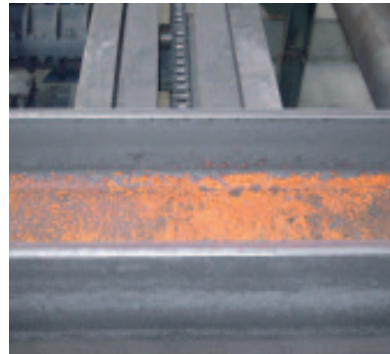


Abb. 3: Entrostungsstrahlen eines Stahlträgers

festhaftenden Beschichtungen und artfremde Verunreinigungen aufweisen. Zunder, Rost oder eine Beschichtung gelten hingegen als lose, wenn sie sich mit einem stumpfen Kittmesser abheben lassen.

Häufig muss bei der Erneuerung von Anstrichen gleichzeitig auch Rost mit entfernt werden. Daher werden nach DIN EN ISO 4628-3 auch für beschichtete Stahloberflächen verschiedene Rostgrade unterschieden. Die Rostgrade Ri beschreiben hier den prozentualen Anteil der Durchrostung bezogen auf die betrachtete Fläche (nicht auf die Gesamtfläche eines Bauwerks). Sie können auch durch Vergleich mit den in der Norm enthaltenen fünf fotografischen Vergleichsmustern ermittelt werden.

Je nach Fortschritt der Rostbildung ist eine strahltechnische

Entfernung mit zunehmendem Energieaufwand zum Losschlagen und Abtragen verbunden. Während bei Rostgrad B ein einfaches, vollflächiges Überstrahlen mit Stahlstrahlmitteln mittlerer Körnung ausreicht, erfordert der Rostgrad C bereits ein mehrfaches Überstrahlen, bei dem alle Flächen mehrfach von Strahlkörnern bearbeitet werden. Tiefer ins Material reichende Rostnarben bei Rostgrad D können vollflächig nicht ohne erheblichen Abtrag von Grundwerkstoff beseitigt werden. Gegebenenfalls sind auch aggressivere Strahlmittel mit kantigen Kornformen einzusetzen. Die **Abb. 3** zeigt ein Beispiel einer strahltechnisch entrosteten Oberfläche.

Eine Entrostung von Flach- und Profilstahlerzeugnissen erfolgt sinnvollerweise mit Hilfe von Schleuderrädern. Punktueller Rostentfernung und die Entrostung komplizierter oder großer Bauteile erfolgen unter Einsatz von Druckluft. Gleiches gilt für Bauwerke, da hier eine mobil einsetzbare Strahl-ausrüstung benötigt wird.

Zur Feststellung des Reinheitsgrades von Stahloberflächen nach dem Strahlen gibt der Anhang zur ISO 8501-1 ebenfalls fotografische Vergleichsmuster vor (vgl. Kapitel 7.2). Die Qualität der strahltechnischen Bearbeitung hat entscheidenden Einfluss auf die Haltbarkeit einer nachfolgenden Beschichtung und damit auf den Korrosionsschutz der Oberfläche.

Rostgrad	Oberflächenzustand
A	Stahloberfläche weitgehend mit festhaftendem Zunder bedeckt, aber im Wesentlichen frei von Rost
B	Stahloberfläche mit beginnender Rostbildung und beginnender Zunderabblätterung
C	Stahloberfläche, von der der Zunder abgerostet ist oder sich abschaben lässt, die aber nur ansatzweise für das Auge sichtbare Rostnarben aufweist
D	Stahloberfläche, von der der Zunder abgerostet ist und die verbreitet für das Auge sichtbare Rostnarben aufweist

Tabelle 3: Rostgrade nach DIN EN ISO 8501-1

## 2.4 Entschichtungsstrahlen

Das Entschichten bezeichnet zum einen das Entfernen von zuvor aufgetragenen werkstofffremden Beschichtungen aller Art wie alten Farbanstrichen und anderen Schutzschichten (siehe **Abb. 4**), zum anderen das Entfernen von unerwünschten Anhaftungen wie etwa Schmutz oder Staub.

Die einzusetzenden Strahlmittel sind vor allem von den zu entfernenden Schichten, die geeigneten Strahlsysteme eher von Art und Größe des Strahlguts abhängig. Für harte und spröde Beschichtungen eignen sich eher runde, für weiche Beschichtungen eher kantige Kornformen. Sind die Beschichtungen zu weich, müssen sie vor dem Strahlen etwa durch Kälteeinwirkung versprödet werden.

Automatisch zu handhabende Werkstücke werden in der Regel mit Schleuderrädern strahltechnisch bearbeitet. Kompliziertere Strukturen wie Bauwerke oder Teile von Industrieanlagen erfordern eine flexible, mit Druckluft oder Druckwasser betriebene Strahlausrüstung.

## 2.5 Abtragstrahlen

Unter Abtragstrahlen versteht man das Strahlen von Werkstücken mit dem einzigen Ziel des Materialabtrags von Grundwerkstoff. Es unterscheidet sich dadurch vom Veredelungsstrahlen, bei dem eine optisch edle oder aber eine für nachfolgende Bearbeitungsschritte geeignete Oberflächenstruktur geschaffen werden soll.

Das Abtragen großer Materialmengen durch Strahlen ist sehr energieaufwändig und gegenüber anderen spanenden Fertigungsverfahren wie Hobeln oder Fräsen nicht wirtschaftlich einsetzbar. Das Abtragstrahlen feinerer Strukturen hingegen ist eine in speziellen Bereichen geeignete strahltechnische Anwendung, da mit Hilfe feiner Strahlmittel und druckluftbetriebener Strahldüsen sehr dosiert und präzise, aber dennoch ohne Werkstückkontakt gearbeitet werden kann.

Abrasives Druckluftstrahlen in der Mikrotechnik bietet durch den Einsatz kleinster Strahldüsen mit Bohrungsdurchmessern bis herab zu 250 µm vielfältige Möglichkeiten etwa zum Vereinzeln von Mikrostrukturen auf Silicium- und Glaswafern oder zum Trimmen von Widerständen.

Ein weiteres Einsatzgebiet liegt etwa im Bereich der Schneidkantenbearbeitung von Zerspanwerkzeugen mit dem Ziel der Verschleißminderung beim Schneidvorgang durch gezielte Beeinflussung der Schneidkanten geometrie.

Das Abtragstrahlen kann auch zur Werkstoffprüfung eingesetzt werden. Hierbei werden verschiedene Werkstoffoberflächen mit einem definierten Strahl bearbeitet, um deren Verschleißverhalten zu prüfen und zu vergleichen. Untersucht werden Menge des abgetragenen Materials sowie Form und Struktur der bestrahlten Oberfläche.

## 2.6 Trennstrahlen

Der vom Erfinder der Strahltechnik B. C. Tilghman ursprünglich patentierte Einsatz der Strahltechnik zum Bohren und Schneiden von Stein und anderen Materialien mit kornförmigen Strahlmitteln ist in dieser Form praktisch nicht mehr im Einsatz, da leistungsfähige Bohr- und Schneidwerkzeuge verfügbar sind.

Eine strahltechnische Trennung von harten Materialien erfordert einen extrem hohen Energieeinsatz auf minimaler Fläche. Die erforderliche hohe Energiedichte lässt sich mit Schleuderrädern praktisch gar nicht und mit dem Trägermedium Luft nur sehr begrenzt darstellen. Zur Erhöhung der Energiedichte kommt nur das sogenannte Druckflüssigkeitsstrahlen mit flüssigen Strahlmedien wie Wasser in Frage, das unter hohen Druck gesetzt und dann durch eine Düse extrem beschleunigt wird. Die Zugabe fester, abrasiver Medien erhöht die Schneidleistung erheblich.

Mit dem Hochdruckwasserstrahl können fast alle weichen und harten Materialien geschnitten und gebohrt werden, womit sich eine fast universelle Einsetzbarkeit ergibt. Schwerpunkte sind die Bearbeitung von Kunststoffen, Stahl



Abb. 4: Entschichtungsstrahlen eines Stahltanks

Abb. 5:  
Wasserstrahl-  
schneiden einer  
Kontur aus einem  
Edelstahlblech



(siehe Abb. 5) und anderen Metallen sowie Glas und Stein. Neben dem Trennen wird das Wasserstrahlschneiden auch zum Entgraten verwendet, da aufgrund der hohen Energiedichte im Gegensatz zum Trockenstrahlen auch dicke Gratstrukturen getrennt werden können.

## 2.7 Entgratstrahlen

Mit Hilfe des Entgratstrahlens können Grate begrenzt spanend entfernt werden. Grate entstehen im Wesentlichen bei Gießprozessen durch Maßtoleranzen an den Formtrennstellen sowie bei Schnittvorgängen durch spanende Bearbeitung wie Bohren, Fräsen usw.

Der Einsatz des Entgratstrahlens ist im Allgemeinen nur dann sinnvoll, wenn die Grate auch manuell zu entfernen wären. Für festsitzende Grate wie beispielsweise an Graugussteilen müsste die erforderliche Strahlenergie so hoch sein, dass ein Einsatz weder wirtschaftlich noch praktikabel ist, da auch die umliegenden Flächen des Werkstücks abgetragen werden. Diese Beschränkungen lassen einen wirtschaftlichen Einsatz lediglich für feine, lose oder aber leichte Grate zu, die etwa als Schnittgrate bei spanender Bearbeitung oder beim Laserschneiden, als dünnwandige, sogenannte Flittergrate beim Leichtmetall-Druckguss oder als Spritz-, Press- oder Stanzgrate bei der Her-

stellung von Kunststoffteilen auftreten.

Die einzusetzende Strahlenergie und Durchschlagkraft richtet sich nach der Bindung des Grats zum Werkstück. Generell sind aufgrund der Empfindlichkeit der Werkstücke in den o.g. Einsatzfällen jedoch Grenzen hinsichtlich Strahlgeschwindigkeit und Kornmasse zu berücksichtigen. In der Regel werden runde Strahlkörner eingesetzt, um die Oberfläche nicht zu stark aufzurauen. Für kleinere Grate an einzelnen Teilen und zur gezielten Bearbeitung des Gratverlaufs kommen Druckluftsysteme zum Einsatz. Massive Grate können nur durch Druckflüssigkeitsstrahlen beseitigt werden. Der Entgratvorgang entspricht in diesem Falle aber eher dem Trennstrahlen.

Die abgestrahlten oder abfallenden Grate müssen in der Strahlanlage separat erfasst werden, da sie ansonsten zu Verstopfungen im Strahlmittelkreislauf oder Schäden am Strahlsystem führen können. Die Abtrennung vom umlaufenden Strahlmittel erfolgt mit geeigneten Abscheidern nach dem Auffangen in der Strahlkabine oder bei der nachfolgenden Strahlmittelsichtung.

## 2.8 Raustrahlen

Das Aufrauen von Oberflächen ist eine der ältesten wirtschaftlich erfolgreichen Anwendungen

der Strahltechnik überhaupt und wurde bereits im 19. Jahrhundert zum Schärfen von Feilen eingesetzt. Der Vorteil des Strahlens liegt in diesem Falle in der hohen Effizienz und der sehr guten Einstellbarkeit des gewünschten Rauigkeitsprofils über die Korngröße, Kornform und Kornhärte des Strahlmittels sowie die Geschwindigkeit des Strahls.

Beim sogenannten Sweepen werden verzinkte Oberflächen mit geringer Strahlenergie angeraut, um das Ausgasen der Zinkschicht zu fördern und eine bessere Haftung nachfolgender Beschichtungen zu gewährleisten.

Für eine effektive Aufrauung muss das Strahlmittel kantig und härter als der Werkstoff der bestrahlten Oberfläche sein. Darüber hinaus dürfen sich die Körner in einem umlaufenden Strahlmittel nur begrenzt verrunden, um die aufrauende Wirkung zu erhalten. Hierfür kommen je nach Einsatzgebiet und Strahlsystem mineralische und auch metallische Strahlmittel in Frage.

Aufgrund der Kornform und Härte der verwendeten Strahlmittel ist in den entsprechenden Strahlanlagen mit einem relativ hohen Verschleiß an strahlmittelführenden Teilen zu rechnen. Aufgrund dieser Tatsache sind aggressive mineralische Strahlmittel in Schleuderradstrahlssystemen praktisch nicht einsetzbar. In jedem Falle erfordert der Einsatz aggressiver Strahlmittel besondere Maßnahmen des Verschleißschutzes.

## 2.9 Mattierstrahlen

Das Mattierstrahlen ist eine Sonderform des Raustrahlens mit feineren Strahlmitteln. Hiermit können nicht nur Funktionsflächen geschaffen, sondern auch optische Effekte erzielt werden. Häufig liegt der Strahlzweck in der optischen Aufwertung einer Oberfläche, die durch das Strahlen eine homogen

matte und damit edel wirkende Erscheinung erhalten soll.

Für die Auswahl von Strahlmittel und Strahlsystem gilt Ähnliches wie beim Raustrahlen. Ein matter Effekt kann insbesondere mit kantigen Kornformen erzielt werden, wobei sich die hier eingesetzten feineren Strahlmittel tendenziell weniger für Schleuderstrahlssysteme eignen. Bevorzugt werden Druckluftsysteme eingesetzt, da der das Strahlmittel beschleunigende Druckluftstrahl hier eine bessere Führung des Materials und größere Reichweite des Strahls erlaubt.

Durch das kantige und feinkörnige Material werden besondere Anforderungen an die Anlagentechnik hinsichtlich Verschleißschutz und Strahlmittelsichtung gestellt.

## 2.10 Glätt- und Polierstrahlen

Beim Glätt- und Polierstrahlen sorgt die Einwirkung des Strahlmittels für eine Einebnung oder Abtragung von Oberflächenrauigkeiten. Die Auswahl von Strahlmittel und Strahlsystem erfolgt je nach Härte und Struktur der vorhandenen sowie Struktur der gewünschten Oberfläche, wobei in aller Regel rundkörnige, nichtmetallische Strahlmittel und verschiedene Druckstrahlssysteme zum Einsatz kommen. An Stelle von „Glätten und Polieren“ werden häufig die Begriffe „Oberflächenfinish“ oder „Mikrostrahlen“ verwendet.

Die Grenzen zum Polieren verlaufen dabei fließend. Zum sogenannten Läppstrahlen werden feine Glaskugeln aus hartelastischem Natronglas verwendet, je nach Einsatzfall können die Kugeldurchmesser unter 50 µm liegen. Das Strahlmittel wird per Luftdruck beschleunigt, auf das Werkstück gebracht und prallt ab, wobei die Rundheit der Glaskugeln die Druckhomogenität an der Oberfläche gewährleistet. Hierdurch werden Beschädigungen der Werk-

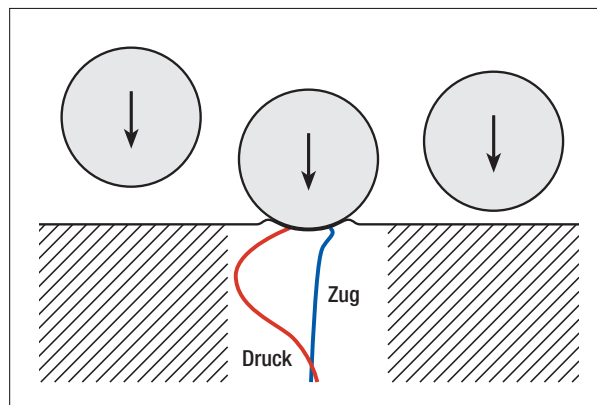
stückoberflächen vermieden, enge Maßtoleranzen an Kanten und Funktionsflächen bleiben erhalten. Häufig wird das Läppstrahlen zur Oberflächenglättung nach mechanischer Bearbeitung und nach dem Nitrieren oder Nitrocarburieren verwendet, um eine glatte, metallisch glänzende Werkstückoberfläche zu erhalten.

Eine Alternative zu dem Trockenstrahlsystem mit Druckluft sind Nassstrahlsysteme wie das Nassdruckluftstrahlen oder das Schlammstrahlen. Bei beiden Systemen wird eine Dispersion eines feinkörnigen Strahlmittels in Wasser oder in einer anderen Flüssigkeit mit hoher Geschwindigkeit auf die zu bearbeitende Oberfläche gestrahlt. Trägermedium für den Strahl der abrasiven Festkörper ist beim Nassdruckluftstrahlen Druckluft und bei dem auch als Druckstrahl läppen bezeichneten Schlammstrahlen der Wasserstrahl. Insbesondere mit dem mit Niederdruck betriebenen Schlammstrahlen lassen sich besonders feine und gleichmäßige Oberflächen herstellen. Die gestrahlte Oberfläche muss nach der Bearbeitung mit frischem Wasser abgewaschen oder abgespritzt werden, um noch anhaftendes Strahlmittel zu entfernen. Das Wasser kann zur Bearbeitung rostempfindlicher Bauteile einen Rostinhibitor enthalten. Vor dem Auftragen von Beschichtungen oder Lacken müssen die bearbeiteten Oberflächen getrocknet werden.

## 2.11 Verfestigungsstrahlen (Kugelstrahlen)

Das Verfestigungsstrahlen oder Kugelstrahlen bezeichnet das gezielte Bestrahlen von Oberflächen dynamisch hoch beanspruchter Bauteile zur Verlängerung ihrer Lebensdauer. Der international gebräuchliche Begriff „shot peening“ für diese Anwendung steht für Kaltverfestigen („peening“) mit Hilfe von rundkörnigem Strahlmittel („shot“). Die auf die Oberfläche einwirkende Energie der auftreffenden Strahlkörner führt zu plastischer Verformung mit einhergehender Erhöhung der Versetzungsdichte im Metallgitter oberflächennaher Schichten. Die Verfestigung äußert sich außerdem in einem erhöhten Spannungszustand in Form der sogenannten Druckeigenspannung, die vorhandene Zugspannungen kompensiert, äußeren Zugspannungen entgegenwirkt und damit die Dauerfestigkeit erhöht sowie die Rissbildung und -ausbreitung erschwert, siehe **Abb. 6**.

Der Wunsch nach Gewichtssparnis steht werkstofftechnisch gesehen dem Wunsch nach Lebensdauererhöhung dynamisch belasteter Bauteile meist entgegen. Im Rahmen eines Entwicklungsprozesses können mit Hilfe des Kugelstrahlens je nach Anforderung jedoch Schwerpunkte auf leichtere Bauweise oder verbesserte Festigkeitseigenschaften gelegt werden.



**Abb. 6:**  
Verfestigung und  
Spannungszustand  
vor und nach dem  
Strahlen

Das Kugelstrahlen erfolgt wie am Namen zu erkennen mit kugeligem Strahlmittel, um möglichst viel Energie in Form von Druckeigenspannungen in die Oberfläche einzubringen. Gleichzeitig darf die Kornmasse nicht zu groß werden, da hierdurch zwar eine Druckerhöhung in tieferen Schichten erzielt werden kann, gleichzeitig aber zu große Umformungen auf der Oberfläche zu einem Abfall der Druckeigenspannung führen können. Des Weiteren ist unbedingt zu beachten, dass durch Kornbruch entstehende kantige Anteile des Strahlmittels ebenfalls eine starke Aufrauung bzw. Verletzung der Oberfläche und damit eine lokale Schwächung zur Folge haben. Aus diesem Grunde ist eine hohe Strahlmittelqualität bei geringer Korngrößenstreuung, großer Härte und geringer Bruchrate erforderlich. Diese Anforderungen werden am besten durch ein Drahtkornstrahlmittel erfüllt, dessen Betriebsgemisch aus gerundeten Drahtabschnitten besteht.

Darüber hinaus muss berücksichtigt werden, dass der Verfestigungseffekt sehr empfindlich auf eine Veränderung der ihn beeinflussenden Prozessparameter wie Korngröße, Strahlmittelmenge und Strahlgeschwindigkeit reagiert. Diesem Umstand muss die zum Einsatz kommende Strahlanlage Rechnung tragen, indem diese

Parameter konstant gehalten, überwacht und im Idealfall kontinuierlich geregelt werden.

Aufgrund der speziellen Möglichkeiten zur Lebensdauererhöhung und Gewichtsreduzierung liegen die wichtigsten Einsatzgebiete für das Verfestigungsstrahlen im Bereich der Fahrzeugtechnik (z.B. Federn, Zahnräder) wie im Beispiel in **Abb. 7** sowie der Luft- und Raumfahrttechnik (z.B. Turbinenschaufeln, Fahrwerk).

## 2.12 Umformstrahlen

Das Umformstrahlen oder Kugelstrahlumformen ist eine Sonderanwendung des Kugelstrahlens. Wie beim Verfestigungsstrahlen wird auch hier die durch das Strahlen in die Oberfläche eingebrachte Druckeigenspannung genutzt. Während jedoch beim Verfestigungsstrahlen der Strahlzweck in der Erhöhung der Bauteillebensdauer besteht, erfolgt beim Umformstrahlen eine gezielte makroskopische Bauteilverformung mit gleichzeitig verfestigter Oberfläche. Bei geringer Kornmasse bzw. Kornenergie wölbt sich die bestrahlte und damit verfestigte, unter Druckspannung gebrachte Oberfläche nach außen dem Strahl entgegen (konvex), bei hoher Kornmasse bzw. Kornenergie kann das Bauteil nach innen gewölbt (konkav) oder auch

auf eine Matrize geformt werden. Um eine definierte Verformung zu gewährleisten, ist eine exakte Steuerung des Strahlprozesses mit allen beteiligten Parametern unabdingbar. Da durch das Strahlen nur oberflächennahe Schichten erreichbar sind, kann diese Anwendung nur für dünnwandige und großflächige Werkstücke genutzt werden.

Wie beim Verfestigungsstrahlen kommt kugeliges Strahlmittel zum Einsatz, um einen möglichst hohen Verfestigungs- und damit Umformeffekt zu erzielen. Eine gezielte Bestrahlung erfordert eine exakte Strahlführung und kann in den meisten Einsatzfällen daher nur mit einem Druckluftstrahlensystem realisiert werden, bei dem die Strahldüse programmgesteuert über die Oberfläche bewegt werden kann.

Die typischen Einsatzgebiete für das Umformstrahlen liegen in der Luft- und Raumfahrttechnik. Ein weiterer Einsatzfall ist das Richten von Bauteilen (Richtstrahlen).

## 3 Strahlsysteme

Das Strahlsystem bezeichnet die physikalische Methode der Energiebereitstellung zur Beschleunigung des Strahlmittels. Einen Überblick über die verschiedenen Strahlsysteme und deren Wirkprinzipien zeigt die **Tabelle 4**.

Beim Druckstrahlen erfolgt die Bereitstellung aus pneumatischer oder hydraulischer Druckenergie, die beim Durchströmen einer Düse in kinetische Energie des Strahls umgewandelt wird. Der Strahl besteht dabei aus dem eigentlichen Strahlmedium bzw. Strahlmittel zur Erzielung der Strahlwirkung sowie dem Trägermedium zum Transport des Strahlmediums. Entsprechend dem Trägermedium unterscheidet man das Druckluftstrahlen, das Druckflüssigkeitsstrahlen und das Dampfstrahlen. Das Strahlen mit Druck-



**Abb. 7:**  
Kugelstrahlen  
eines Lagerrings  
mit drei Strahl-  
düsen

Strahlsystem	Strahlmedium	Trägermedium	Prinzip der Energieübertragung auf das Strahlmedium	Energiebereitstellung (üblicher Leistungsbereich)	Strahlwirkung
Druckluftstrahlen, trocken	Trockene Strahlmedien	Luft	Umwandlung von pneumatischer Druckenergie in kinetische Energie bei Durchströmung einer Düse	Kompressor (5–12 bar)	Mechanische Korneinwirkung
Trockeneisstrahlen	CO <sub>2</sub> -Pellets				Versprödung von Beschichtungen durch Kälte und explosionsartige Sublimation der Trockeneispartikel
Feuchtstrahlen	Befeuchtete Strahlmedien				Mechanische Korneinwirkung, Staubbinding
Nassstrahlen	Strahlmedien mit Zusatz von Wasser				Mechanische Korneinwirkung, Waschen
Schlämmstrahlen	Wasser mit aufgeschlammten Strahlmedien	Wasser	Umwandlung von hydraulischer Druckenergie in kinetische Energie bei Durchströmung einer Düse (Niederdruck)	Pumpe (2–5 bar)	Gedämpfte mechanische Korneinwirkung, Schleifwirkung
Druckflüssigkeitsstrahlen	Wasser, ggf. mit körnigen Strahlmedien			Hochdruckpumpe (50–2.500 bar)	Mechanische Wasserstrahl- und ggf. Korneinwirkung
Heißwasser- und Dampfstrahlen	Heißwasser/ Heißdampf			Hochdruckpumpe (50–150 bar)	Mechanische Wasserstrahl- bzw. Dampfeinwirkung, Lösen von Substanzen, Aktivierung durch Temperatur
Schleuderradstrahlen, trocken	Trockene Strahlmedien	–	Beschleunigung durch Zentrifugalkraft	Schleuderrad mit Drehstrommotor (7,5–55 kW)	Gedämpfte mechanische Korneinwirkung, Lösen von Substanzen
Schleuderradstrahlen, nass	Wasser mit trockenen Strahlmedien	Wasser		Schleuderrad mit Drehstrommotor (7,5–15 kW)	Mechanische Korneinwirkung (mit Wasser)
Ultraschallstrahlen	Kugeln	–	Beschleunigung durch mechanische Schwingungen und elastischen Stoß	Sonotrode mit Piezoemitter und Frequenzgenerator (1,5 kW)	Mechanische Korneinwirkung

Tabelle 4: Strahlsysteme und deren Wirkprinzipien

luft als Trägermedium wiederum kann entweder als Trockendruckluftstrahlen oder unter Zugabe von Wasser und anderen Zusatzstoffen als Nassdruckluftstrahlen mit feuchten oder nassen Medien betrieben werden.

Beim Schleuderradstrahlen hingegen erfolgt die Bereitstellung aus der Rotationsenergie eines schnell drehenden Schaufelrades. Die auf das mitrotierende Strahl-

mittel wirkende Zentrifugalkraft bewirkt eine Beschleunigung der Körner nach außen und schließlich den Abwurf über die Schaufelkante mit der bis dahin übertragenen kinetischen Energie. Das Schleuderradstrahlen erfolgt in der Regel trocken, für Sonderanwendungen gibt es aber auch das Nassschleuderradstrahlen.

Eine Sonderstellung nimmt das Ultraschallstrahlen ein. Die

Energiebereitstellung erfolgt hierbei durch einen leistungsstarken Ultraschallgenerator, dessen in die lokale Strahlkammer abgegebene Schallwellen eine Energieübertragung an die Strahlmittelkörner bewirken. Gemäß der Definition nach DIN 8200 handelt es sich hierbei zwar ebenfalls um ein Strahlsystem, allerdings ist die Bewegung der Strahlkörner nicht durch eine einheitliche Strahlrich-

tung, sondern durch gegenseitige Stoßvorgänge und damit unterschiedliche Auftreffwinkel gekennzeichnet.

### 3.1 Druckluftstrahlen mit trockenen Strahlmedien

Beim Druckluftstrahlen dient verdichtete Luft als Trägermedium für das zu beschleunigende Strahlmittel. Die wesentliche Endbeschleunigung erhalten die Strahlmittelkörner infolge Geschwindigkeitszunahme der durch die Strahldüse ausströmenden Druckluft. Das für die Strahlleistung wesentliche Geschwindigkeitsmaximum des Strahls wird in Abhängigkeit von Luftdruck und Luftmenge vor allem durch die Düsenform, die Düsenlänge und den Düsenquerschnitt beeinflusst.

Der zur Variation der Strahlleistung genutzte Druckbereich liegt in der Regel zwischen 5 und 12 bar. Übliche Strahldüsendurchmesser liegen im Bereich von unter 1 mm bis etwa 20 mm. Je nach Luftdruck, Luftmenge und Strahldüsenquerschnitt werden damit Austrittsgeschwindigkeiten von üblicherweise etwa 80–250 m/s erreicht.

Die Energie der mit dem Luftstrom beschleunigten Strahlmittelkörner hängt von deren Geschwindigkeit und Masse ab. Körner hoher Dichte wie etwa Stahlkörner erfordern einen höheren Luftdruck, erreichen aber auch weiter entfernte Strahlgutoberflächen noch mit hoher Energie. Aufgrund der sich mit zunehmendem Abstand von der Düse abschwächenden Luftströmung werden feine Körner und Körner geringerer Dichte nach dem Austritt schneller abgebremst. Diese können darüber hinaus durch einen Luftstau am Strahlgut weiter verlangsamt oder bedingt durch die Strahlgutform mit dem Luftstrom auch abgelenkt werden. Diese Besonderheiten müssen bei der Wahl von Druck, Luftmenge, Strahlmittel, Düsenquerschnitt und Düsenanordnung in jedem Anwendungsfall speziell berücksichtigt werden.

Die Ausführungsformen von Druckluftstrahlsystemen sind sehr vielfältig und reichen von Feinstrahlgeräten mit handgeführten Strahlgriffel bis hin zu Großanlagen zum Freistrahlen mit Druckkesseln zur gleichzeitigen Versorgung mehrerer Strahler. Es lassen sich stationäre und mobile Anlagen unterscheiden, wobei stationäre

Anlagen heute fast ausschließlich mit kontinuierlich umlaufendem oder zumindest aufgefangenem und zyklisch umlaufendem Strahlmittel betrieben werden.

#### Stationäre Anlagen

- Handstrahlkabinen mit Öffnungsklappe, Sichtfenster, von außen durch lange Gummihandschuhe frei von Hand geführten Düsen und Betrieb mit Umlaufstrahlmitteln mit und ohne kontinuierliche Strahlmittelreinigung
- Begehbare Freistrahlräume und Strahlhallen mit frei von Hand geführten Düsen und Betrieb mit Umlaufstrahlmitteln mit und ohne kontinuierliche Strahlmittelreinigung, Beispiel siehe **Abb. 8**
- Strahlmaschinen mit fest installierten Düsen und durchlaufendem, umlaufendem oder umgewälztem Strahlgut
- Strahlmaschinen mit automatisch bewegten, programmgesteuerten Düsen, zum Teil auch in Kombination mit Schleuderrädern, an kontinuierlich oder im Arbeitstakt bewegtem Strahlgut
- Strahlmaschinen mit speziellen, z.B. abgewinkelten oder rotierenden Düsenköpfen für das Strahlen von Innenkonturen wie Rohrrinnenflächen, Bohrungen und Vertiefungen

#### Mobile Anlagen

- Strahlausrüstung unterschiedlicher Größen und Leistungsstufen mit frei von Hand geführten Düsen an großen Bauteilen oder Bauwerken, Beispiel siehe **Abb. 9**. Betrieb häufig mit Umlaufstrahlmitteln und kontinuierlicher Strahlmittelreinigung, bei kleineren Strahlflächen mit Einwegstrahlmitteln. Einsatz erfordert besondere Arbeits- und Umweltschutzmaßnahmen wie z.B. Einhausungen oder Abplanungen, künstliche Belüftung, Absaugung, persönliche Schutzausrüstung und schadlose Strahlschutt-Entsorgung.



Abb. 8: Freistrahlaum für große Schweißkonstruktionen

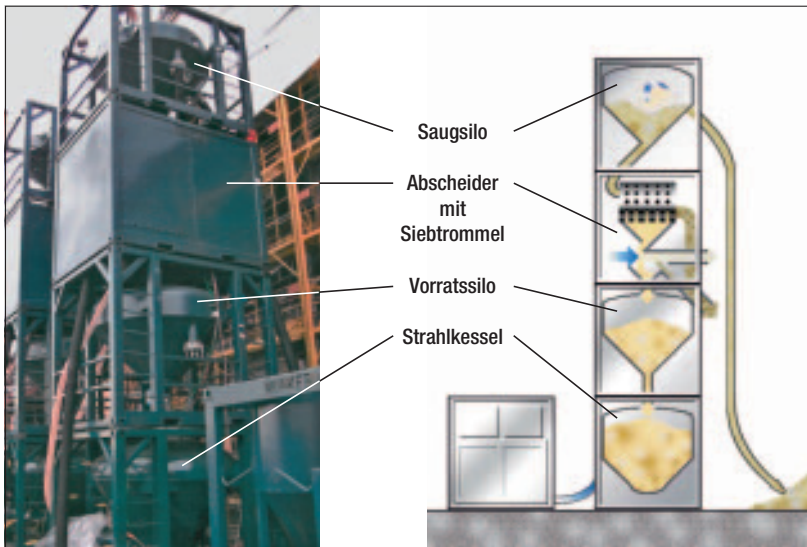


Abb. 9: Mobile Freistrahlanlage mit Rücksaugsystem

Bei allen Freistrahlarbeiten in Strahlräumen, Strahlhallen oder an Bauwerken im Freien bedarf es einer speziellen Schutzausrüstung für den Strahler. Hierzu gehören Schutzanzug, Schutzhelm mit Frischluftversorgung und Visier sowie Schutzhandschuhe und Schutzschuhe.

Die besonderen Vorteile der Druckluftstrahlsysteme gegenüber anderen Strahlsystemen liegen in der weitgehenden Anpassungsfähigkeit an Größe, Form und

oberflächentechnische Anforderungen der zu bearbeitenden Objekte sowie der nahezu uneingeschränkten Verwendbarkeit unterschiedlichster metallischer, mineralischer und organischer Strahlmittel.

Der Hauptnachteil gegenüber dem konkurrierenden Schleuderstrahlsystem ist der deutlich schlechtere Wirkungsgrad. Dieser ist bedingt durch die verlustbehaftete Umwandlung von elektrischer Energie in Druckenergie sowie die

verlorene Energie der ausströmenden Luft. Für die gleiche Strahlleistung muss beim Druckluftstrahl gegenüber dem Schleuderradstrahl daher von einem etwa 20- bis 30-fach höheren Energieaufwand ausgegangen werden. Oftmals wird dieser Effekt aber zumindest teilweise dadurch kompensiert, dass mit dem Druckluftstrahl wesentlich gezielter gestrahlt werden kann und daher weniger Strahlenergie ungenutzt verloren geht.

Bezüglich der Zuführung des Strahlmittels in den Luftstrom unterscheidet man das Injektorstrahlensystem und das Drucksystem. Besondere Ausführungsformen sind das Saugkopfstrahl und das Trockeneisstrahlen.

## 3.1.1 Injektorstrahlensystem

Das Injektorstrahlensystem (Abb. 10 a) nutzt die Druckluft nicht nur zur Beschleunigung, sondern auch zum Ansaugen des Strahlmittels. Eine an den Druckluftschlauch angeschlossene Injektordüse (Abb. 10 b) erzeugt einen Strahl, der aufgrund seiner hohen Austrittsgeschwindigkeit benachbarte Luftmoleküle mitreißt und dabei in seiner Umgebung einen Unter-

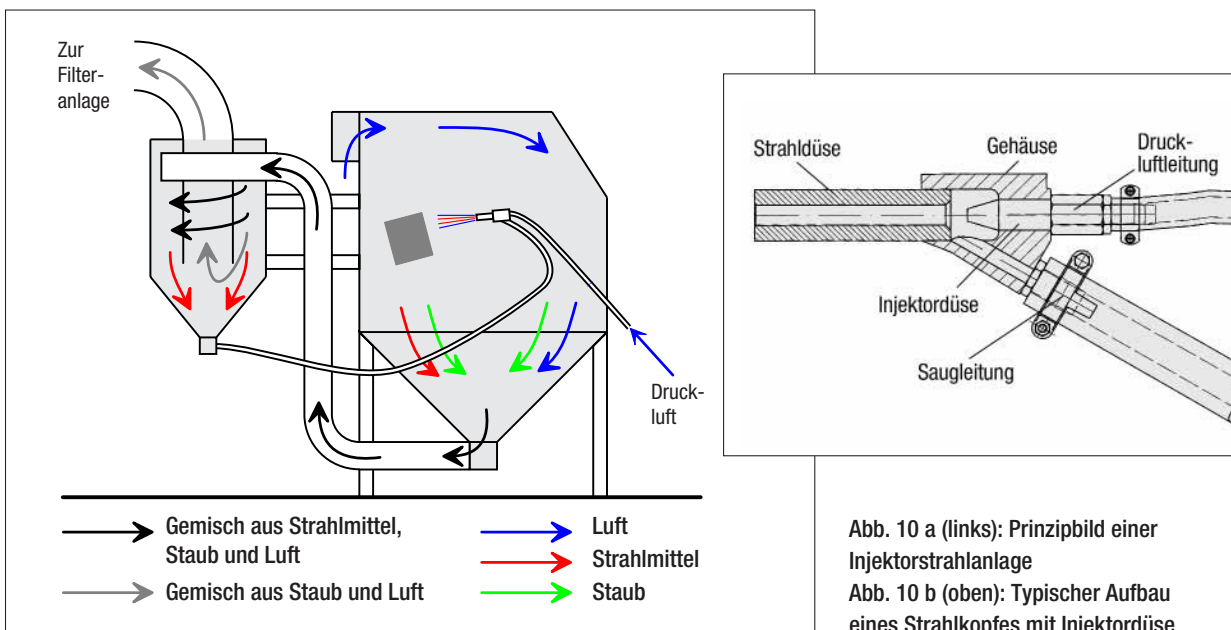
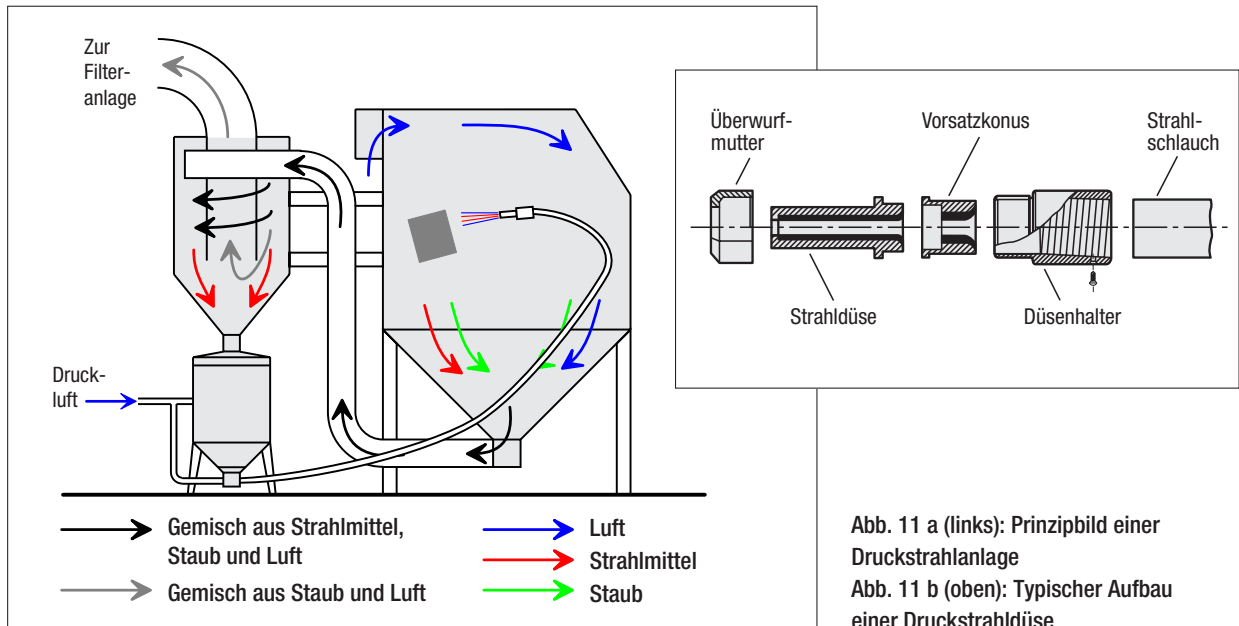


Abb. 10 a (links): Prinzipbild einer Injektorstrahlanlage

Abb. 10 b (oben): Typischer Aufbau eines Strahlkopfes mit Injektordüse



druck erzeugt. Der Unterdruck innerhalb der Strahlpistole dient zum Ansaugen des Strahlmediums im Saugschlauch. Das Gemisch aus Druckluft, Sekundärluft und Strahlmittel verlässt den Strahlkopf über die eigentliche Strahldüse. Die Druckluftzufuhr und damit der Strahlvorgang werden über ein Ventil freigegeben, das an handbedienten Strahlkabinen in der Regel über ein Fußpedal gesteuert werden kann.

Durch Variation des Drucks sowie der zugeführten Luftmenge können die Austrittsgeschwindigkeit an der Strahldüse sowie auch die Injektorwirkung an der Injektordüse und damit die Ansaugleistung für das Strahlmittel in begrenztem Maße verändert werden.

Das Injektorstrahlssystem wird sowohl nach dem Saugprinzip als auch nach dem Gravitationsprinzip betrieben.

Beim Saugprinzip muss das Strahlmittel allein mit Hilfe des Unterdrucks an der Injektordüse zur Strahlpistole transportiert werden. Wird das Strahlmittel im Kreislauf gefahren, muss es in einem Trichter gesammelt und von dort aus erneut angesaugt werden. Die Entfernung und der Höhenunterschied zwischen Trichter

und Strahlpistole erfordern erhebliche Luftmengen und begrenzen daher die Ansaug- und damit auch die Strahlleistung.

Folgende Vor- und Nachteile kennzeichnen dieses Strahlssystem:

#### Vorteile

- Einfacher Aufbau
- Geringe Investitionskosten

#### Nachteile

- Begrenzter Strahlmittelstrom
- Begrenzte Strahl- und Flächenleistung
- Geringer Wirkungsgrad
- Eingeschränkte Eignung für Strahlmedien hoher Dichte
- Eingeschränkter Einstellbereich für Strahlgeschwindigkeit und Strahlmittelmenge

Beim Gravitationsprinzip erfolgt die Strahlmittelzuführung aus einem oberhalb der Strahlpistole angeordneten Vorratsbehälter. Diese Ausführung ähnelt stark der von B. C. Tilghman patentierten Anordnung. Für den Kreislauf des Strahlmittels muss es aufgefangen und über einen Vertikalförderer wie ein Becherwerk zum Vorratsbehälter zurückgeführt werden. Bei dieser Bauart können dann allerdings auf einfache Weise auch Einrichtungen zur Strahlmittelreinigung integriert werden.

Injektorstrahlssysteme nach dem Gravitationsprinzip arbeiten deutlich effektiver als nach dem Saugprinzip. Auch hier bestehen aber Grenzen hinsichtlich der Strahlleistung und Einstellbarkeit.

### 3.1.2 Druckstrahlssystem

Das Druckstrahlssystem (Abb. 11 a) arbeitet mit direkter Beschleunigung des Strahlmittels aus einem Druckbehälter heraus. Der Druckstrahlkessel (Abb. 12) wird entlüftet, aus einem Vorratsbehälter mit Strahlmittel befüllt und dann verschlossen und mit Druckluft beaufschlagt. Der Strahlmitteltransport in Richtung Strahlpistole erfolgt über ein mit zusätzlicher Druckluft gespeistes Mischventil.

Eine gleichmäßige Durchmischung bzw. Fluidisierung des Strahlmittels durch die Transportluft ist Bedingung für eine kontinuierliche pneumatische Förderung und die Vermeidung des Absetzens schwerer Strahlmittelteilchen. Weitere Anforderungen an das Mischventil sind Verschleißfestigkeit und die Vermeidung von Verklemmungen durch Strahlmittel oder Fremdkörper.

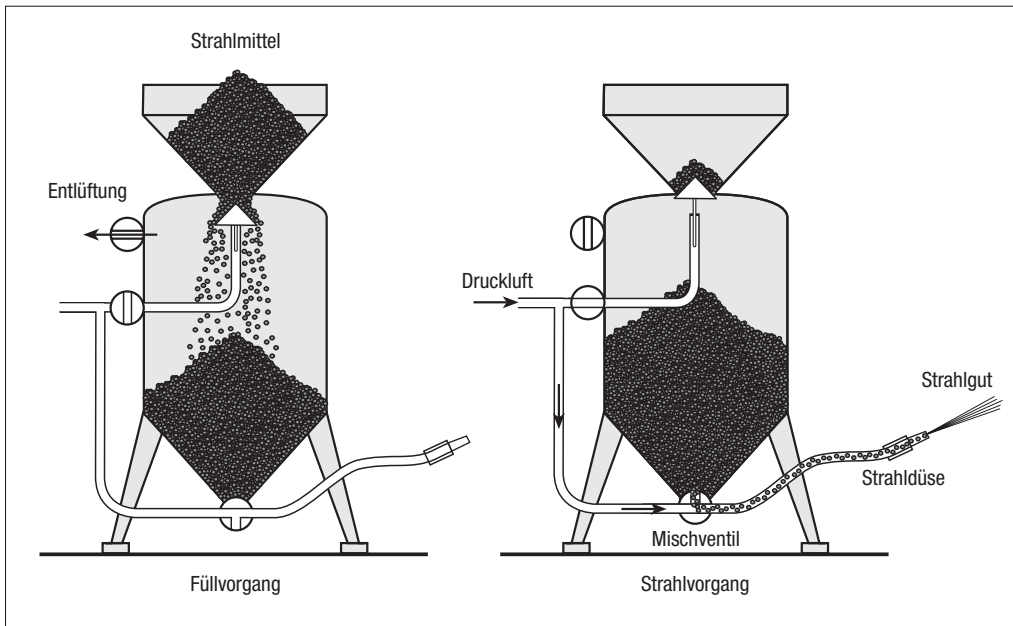


Abb. 12:  
Druckstrahl-  
kessel – Funktion

Das Druckstrahlssystem zeichnet sich gegenüber dem Injektorstrahlensystem durch einen höheren Wirkungsgrad, wesentlich höhere Strahlleistung sowie deren exakte Einstellbarkeit aus. Durch Veränderung des Zulaufquerschnitts am Mischventil lässt sich die Strahlmittelbeladung bis zur Sättigungsgrenze sehr fein justieren.

Die Strahldauer wird allerdings durch die Größe des Strahlkessels bzw. der darin enthaltenen Strahlmittelmenge begrenzt. Zur zyklischen Befüllung wird der Behälter entlastet, währenddessen nicht gestrahlt werden kann. Zur Ermöglichung von fortlaufendem Strahlen müssen daher zwei umschaltbare Strahlkessel oder aber ein Strahlkessel mit Doppelkammersystem eingesetzt werden, bei dem eine oben liegende, separat verschließbare Druckkammer befüllt werden kann, während aus der unteren heraus gestrahlt wird.

Die Strahldüsenereinheit (Abb. 11 b) besteht in der Regel aus dem Düsenhalter mit Schlauchanschluss, der eigentlichen Strahldüse bestehend aus einem Stahlrohr mit verschleißfestem Einsatz und Überwurfmutter sowie einem Vorsatzkonus als Übergang zwischen den Strömungsquerschnit-

ten von Düsenhalter und Strahldüse. Es kommen Strahldüsen mit gerader Bohrung oder Venturidüsen mit konischer Bohrung zur Erhöhung der Strahlmittelaustrittsgeschwindigkeit zum Einsatz.

Zu einer handbedienten Strahlpistole für das Freistrahlen gehört zusätzlich ein Handhebel zur Fernsteuerung des Druckkessels mit sogenanntem Totmannschalter zum selbsttätigen Unterbrechen des Strahls beim Loslassen des Handhebels.

## 3.1.3 Saugkopfstrahlen

Das Saugkopfstrahlen ist eine Sonderanwendung des Druckluftstrahlens mit einem speziellen Rücksaugstrahlgerät. Das Gerät vereint die eigentliche Druckstrahleinrichtung mit einem Rücksaugsystem für das benutzte Strahlmittel. Hierzu findet ein spezieller kombinierter Strahl-Saugkopf Anwendung (siehe Abb. 13). Dabei wird die während des Strahlens aus einem Strahlkopfmantel austretende Luft zusammen mit dem gebrauchten Umlaufstrahlmittel zurückgesaugt und nach Reinigung dem Strahlmittelbehälter wieder zugeführt.



Abb. 13:  
Saugkopfstrahlen  
einer Stahlwalze  
zur Aufrauung vor  
dem Beschichten

Voraussetzung für eine wirtschaftliche Anwendung ohne große Verluste an Rücksaugvakuum und Strahlmittel ist ein dichtes Anliegen des Strahlkopfes an der bearbeiteten Oberfläche.

Für das Strahlen von Kanten lassen sich auch speziell dafür geformte Strahlköpfe einsetzen. Der Vorteil des Systems gegenüber einfachen Druckluftstrahlsystemen ist, dass bei richtiger Anwendung keine abprallenden Strahlmittelkörner umherspritzen und nur sehr wenig Staub freigesetzt wird. Daher kommt dieses Strahlsystem oftmals auch unter kritischen Umweltbedingungen zum Einsatz bzw. wird in diesen Fällen gefordert. Der Nachteil liegt in dem erhöhten technischen Aufwand und der vergleichsweise schlechteren Handhabbarkeit des Strahlkopfes, insbesondere auch durch die Nachführung des schweren Schlauchpaketes, dessen Länge aufgrund der Saugleitung zudem begrenzt ist. Daher sind die erzielbaren Strahl- und Flächenleistungen nicht mit denen des Druckstrahlens vergleichbar.

### 3.1.4 Saugstrahlen

Beim Saugstrahlen wird das Druckgefälle zur Strahlmittelbeschleunigung nicht durch direkte Druckluft, sondern über leistungsstarke Saugsysteme erzeugt. Das Strahlmittel wird aus einem Vorratsbehälter in einen gegen die Oberfläche abgedichteten Strahlkopf gesaugt. Der Ausgang der Saugleitung liegt gegenüber der zu strahlenden Fläche, sodass das Strahlmittel zuerst auf die Oberfläche und dann zusammen mit dem abgestrahlten Material in einen Abscheider bzw. Sammelbehälter gesaugt wird. Das Strahlsystem arbeitet zwar mit sehr begrenzter Energiemenge, dafür aber lokal präzise und praktisch staubfrei.



Abb. 14: Trockeneisstrahlen, hier zur Entfernung von Graffiti

### 3.1.5 Trockeneisstrahlen

Das Trockeneisstrahlen ist ein Strahlverfahren zur Oberflächenreinigung und -entschichtung unter Einsatz eines Druckluftstrahlsystems mit gefrorenem Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) als Strahlmittel, siehe **Abb. 14**. Dieses sogenannte Trockeneis besitzt eine Temperatur von unter  $-78^\circ\text{C}$  und wird meist in Form von Pellets hergestellt. Zur Verkleinerung der Partikel wird vor der Strahldüse häufig ein Splitter eingesetzt.

Trockeneis ist elektrisch nicht leitend, chemisch stabil, ungiftig und nicht brennbar. Es geht bei Umgebungsdruck ohne Verflüssigung direkt vom festen in den gasförmigen Zustand über. Diese sogenannte Sublimation ist die Basis der besonderen Strahlwirkung auf die Strahlgutoberfläche.

Durch das Bestrahlen wird die zu entfernende Schicht zunächst lokal unterkühlt, versprödet und aufgrund unterschiedlicher Wärmeausdehnungskoeffizienten vom Grundwerkstoff gelöst. Nachfolgende Partikel dringen in die Sprödrisse ein und sublimieren beim Auftreffen schlagartig, wobei das frei werdende gasförmige  $\text{CO}_2$  sein Volumen auf das 500-600-

Fache ausdehnt. Durch die explosionsartige und extreme Volumenvergrößerung wird die zu entfernende Schicht vollständig vom Grundwerkstoff abgetrennt.

Die großen Vorteile dieses Verfahrens gegenüber allen anderen Strahlverfahren liegen vor allem in der Schonung des Grundwerkstoffs bei gleichzeitig trockener und staubarmer Reinigung. Die Trockeneispartikel sind weder stark abrasiv noch korrosiv und hinterlassen aufgrund ihres vollständigen Entweichens in die Umgebungsluft außer dem abgestrahlten Material keinerlei Rückstände. Insbesondere lassen sich hiermit im Gegensatz zum herkömmlichen Strahlen auch die meisten weichen und zähen Verschmutzungen und Beschichtungen rückstandsfrei entfernen. Typische Anwendungsbereiche sind daher beispielsweise die Wiederaufarbeitung von empfindlichen Fahrzeugkomponenten und -karosserien, das schonende Entlacken oder das Reinigen von Gussformen.

Beim sogenannten  $\text{CO}_2$ -Schnee-Strahlen wird ebenfalls Kohlendioxid als Strahlmittel eingesetzt. Dieses wird der Strahldüse jedoch nicht wie beim Trocken-

eisstrahlen in trockener, gefrorener Form, sondern aus einem Niederdrucktank in flüssiger Form zugeführt und erst an der Düse zu einem Schnee-Gas-Gemisch entspannt.

Hinsichtlich der physikalischen Strahlwirkung ist das CO<sub>2</sub>-Schnee-Strahlen dem Trockeneisstrahlen sehr ähnlich, die Vorteile liegen jedoch vor allem in der kontinuierlichen Strahlmittelversorgung. Daneben eignet sich der feinere CO<sub>2</sub>-Schnee aufgrund seiner geringeren kinetischen Energie auch zur Reinigung hochempfindlicher Oberflächen bzw. Bauteile.

An Stelle der Druckluft kann hier auch Stickstoff als Trägermedium für den Strahl verwendet werden. Aufgrund der höheren Reinheit des Stickstoffs ist dieses Verfahren dann auch unter Raumbedingungen einsetzbar.

## 3.2 Druckluftstrahlen mit nassen Strahlmedien

Auch bei den mit nassen Strahlmedien betriebenen Druckluftstrahlssystemen dient die Druckluft als Trägermedium für das mit Wasser und ggf. weiteren Zusatzstoffen angereicherte Strahlmittel. Je nach der anteilig zugeführten Wassermenge lassen sich drei Strahlverfahren unterscheiden:

- Feuchtstrahlen – Druckluft-Reinigungsstrahlen mit geringem Wasserzusatz zur Bindung von Staub
- Nassdruckluftstrahlen – Druckluft-Reinigungsstrahlen mit reichlichem Wasserzusatz zum Abwaschen löslicher Salze
- Schlammstrahlen – Reinigungs- und Polierstrahlen mit aufgeschlammten und mit Wasser gesättigten Strahlmitteln mit und ohne Druckluftunterstützung

Allen Nassstrahlverfahren ist gemein, dass die bei Trockenstrahlverfahren entstehenden Stäube weitgehend vermieden werden. Auf der anderen Seite sind aller-

dings einige Besonderheiten zu beachten. Die gestrahlte Oberfläche muss nach der Bearbeitung mit frischem Wasser abgewaschen oder abgespritzt werden, um noch anhaftendes Strahlmittel zu entfernen. Metallische Strahlmittel sind, mit Ausnahme von Edelstahl rostfrei, nicht anwendbar, da sie bei Nässe korrodieren und verklumpen. Bei der Bearbeitung rostempfindlicher Bauteile muss in der Regel ein Rostinhibitor zugesetzt werden, der sich an der Oberfläche anlagert und einen wasserabweisenden Schutzfilm ausbildet. Vor dem Auftragen von Beschichtungen oder Lacken entsteht ggf. zusätzlicher Aufwand zur Trocknung der bearbeiteten Oberflächen.

Die Verfahren zum Nassdruckluftstrahlen kommen in verschiedenen Strahlanlagen zum Einsatz. Wie beim herkömmlichen Druckluftstrahlen lassen sich stationäre und mobile Anlagen unterscheiden.

### Stationäre Anlagen

Bei den Handstrahlkabinen und geschlossenen Strahlmaschinen muss auf eine rostfreie Ausführung geachtet werden. Hinzu kommen Hilfsmittel wie Scheibenwischer oder Scheibenspülung zur Freihaltung von Sichtfenstern. Stationäre Anlagen verfügen über ein Kreislaufsystem für das Strahlmittel-Wasser-Gemisch mit ggf. integrierter Abscheideeinrichtung wie einem Nasszyklon. Besondere Aufmerksamkeit muss darauf gelegt werden, das Gemisch auch in Ruhebereichen wie einem Sammeltrichter in einem homogenen Zustand zu halten. Hierzu dienen in der Regel integrierte Rührwerke, die eine Sedimentation der Strahlmittelpartikel und damit eine Entmischung verhindern.

### Mobile Anlagen

In mobilen Strahlanlagen zum Nassstrahlen von großen Bauteilen und Bauwerken im Freien werden in der Regel Einwegstrahlmittel verwendet, da der technische

Aufwand für eine Kreislaufführung des Strahlmittel-Wasser-Gemisches sehr hoch ist. Der Vorteil der Staubbefreiheit wirkt sich hier besonders positiv aus, da der Aufwand für Einhausungen oder Abplanungen deutlich gemindert werden kann. Allerdings ergeben sich gleichzeitig einige Einschränkungen, da feste Strahlmittel durch die Nässe auch an Flächen der Umgebung haften bleiben und teilweise schwer zu entfernen sind. Besonders zu beachten sind bei diesen Strahlarbeiten darüber hinaus die Vorschriften zum Arbeits-, Umwelt- und Gewässerschutz.

### 3.2.1 Feuchtstrahlen

Das Feuchtstrahlssystem arbeitet mit ähnlichen Strahldüsen wie das Druckstrahlssystem. Vor der Düse wird jedoch zusätzlich Wasser, ggf. auch mit Reiniger- und/oder Inhibitorzusatz, in den Strom aus Druckluft und Strahlmittel eingespeist. Die Zuführung von Wasser dient ausschließlich zum Binden des Staubes und bremst das Strahlmittel kaum ab. Hierdurch ergeben sich im Vergleich zum Trockenstrahlen nur geringe Leistungsverluste, jedoch wesentlich günstigere Arbeitsbedingungen.

Die Vorteile des Systems werden vor allem in Freistrahlanwendungen und hier insbesondere zur Beton- und Fassadenreinigung sowie -sanierung genutzt, bei der ohne Befeuchtung erhebliche Mengen gesundheitsgefährdender mineralischer Stäube entstünden.

### 3.2.2 Nassstrahlen

Durch reichlichen Wasserzusatz kann mit dem Druckluft-Reinigungsstrahlen ein Waschvorgang verbunden werden, durch den die beim Trockenstrahlen auf den Flächen verbleibenden löslichen und korrosionsfördernden Salzurückstände sehr gut entfernt werden können.

### 3.2.3 Schlammstrahlen

Beim Schlammstrahlen wird feinkörniges Strahlmittel in Wasser oder in anderen Flüssigkeiten aufgeschlämmt. Diese Dispersion wird mit Hilfe einer Pumpe zur Strahldüse gefördert und hier direkt oder mit Hilfe zusätzlicher Druckluft beschleunigt. Im Gegensatz zum o.g. Feucht- und Nassstrahlen mit dem Trägermedium Druckluft stellt bei diesem System die Flüssigkeit das Medium zur Beschleunigung des Strahlmittels dar. Die Abgrenzung zum verwandten Druckflüssigkeitsstrahlen ergibt sich aus dem weitaus geringeren Druckniveau von wenigen bar und der damit verbundenen deutlich geringeren Strahlleistung.

Das Schlammstrahlen erlaubt die Verwendung sehr feiner Strahlmittelkörnungen, die sich mit Druckluft als alleinigem Trägermedium nicht über größere Distanzen wirksam strahlen lassen. Gleichzeitig führen die Brems- und Schmierwirkung der Flüssigkeit beim Kornaufprall zu besonders fein strukturierten, homogenen Oberflächen. Das Schlammstrahlen wird daher in der Literatur teilweise auch als Nassläppstrahlen oder Druckstrahl läppen bezeichnet.

Typische Anwendungen liegen sowohl in der Feinstbearbeitung bzw. dem Oberflächenfinish von Maschinen- und Motorteilen im Bereich Fertigung und Instandsetzung als auch im Bausektor.

### 3.2.4 Druckflüssigkeitsstrahlen

Das Druckflüssigkeitsstrahlen bzw. Druckwasserstrahlen bezeichnet ein Strahlensystem mit Wasser in Funktion des Träger- und auch Strahlmediums. Zugewetzte feste Strahlmittel erhöhen die Strahlleistung erheblich, erfordern möglicherweise aber auch eine anlagentechnisch aufwändige Separie-

rung aus dem ablaufenden Wasser. Das Druckflüssigkeitsstrahlen wird aufgrund seiner hohen Energiedichte vorwiegend zum Entschichten, Entrosten und Entzundern von Oberflächen eingesetzt.

Gestrahlt wird in stationären Anlagen mit verfahrbaren oder rotierenden Strahlköpfen oder auch mit rotierendem oder durchlaufendem Strahlgut. Für mobile Anwendungen werden im Allgemeinen frei bewegliche, rückstoßarme Strahlanlagen und Düsenköpfe eingesetzt.

Das Strahlen erfolgt in der Regel mit kaltem Stadtwasser, seltener mit gefiltertem Flusswasser unter Einsatz von Hochdruckpumpen mit Drücken zwischen 50 und etwa 2.500 bar. Hierbei kommt es aber nicht nur auf einen hohen Wasserdruck an. Es müssen vor allem auch ausreichende Wassermengen bereitgestellt, gefördert und nach dem Strahlen schadlos abgeführt werden.

Zur Minderung des Wasserverbrauchs und Steigerung der Effizienz werden druckluftgestützte Strahlköpfe verwendet. Beim zweistufig arbeitenden UH-PAB (Ultra-High Pressure Abrasive Blasting) wird das Strahlmittel in einer ersten Stufe zunächst konventionell mit Druckluft beschleunigt. Danach wird das Strahlmittel-Luft-Gemisch in der zweiten Stufe durch einen mit hoher Geschwindigkeit strömenden Druckwasserstrahl bis auf Austrittsgeschwindigkeit beschleunigt. Das System arbeitet bei Wasserdrücken von bis zu 3.000 bar und erzielt Strömungsgeschwindigkeiten des dreiphasigen Gemisches von bis zu 500 m/s.

Das Druckflüssigkeitsstrahlen hat einen breiten Anwendungsbereich und wird häufig zum Putzen und Entkernen in Grauguss- und Stahlgießereien sowie als mobile Lösung vorzugsweise an großen Objekten aus dem Schiffbau, Stahlwasserbau, Stahlbau, Kraftwerksbau und -betrieb, Rohrleitungs- und Behälterbau genutzt.

Ein Beispiel zeigt die **Abb. 15**. Hierbei überwiegen Einsätze im Bereich der Instandsetzung zur Entrostung, Entfernung nicht mehr fest haftender Beschichtungen und Entschichtung bei starker Verunreinigung, z.B. zum Entfernen von Bewuchs. Tankwaschkopf und Rotationswaschkopf sind Beispiele für hier verwendete einsatzspezifische Düsenköpfe.

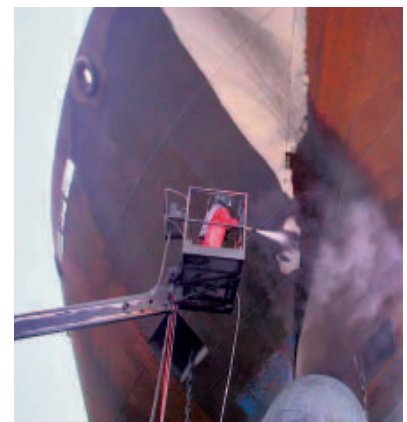


Abb. 15: Druckflüssigkeitsstrahlen eines Schiffsrumpfes

Das Druckflüssigkeitsstrahlen kommt außerdem zum Trennen zum Einsatz. Für harte Werkstoffe werden dem Wasser abrasive Medien zugesetzt, mit denen die Schneidleistung erheblich gesteigert werden kann. Der aufgebaute Strahldruck liegt bei weit über 3.000 bar, die Austrittsgeschwindigkeit an der Düse erreicht ein Mehrfaches der Schallgeschwindigkeit. Bei Stahl werden Schnittiefen von bis zu 300 mm erreicht.

Wesentliche Vorteile dieser Trenntechnik gegenüber anderen Verfahren liegen über die Schneidleistung hinaus in der hohen Schnittpräzision auch bei großen Materialdicken, der Verformungsfreiheit der Werkstücke, vor allem aber in der Gratfreiheit sowie dem Ausschluss thermisch bedingter Gefügeveränderungen an den Schnittkanten.

## 3.2.5 Heißwasser- und Dampfstrahlen

Bei diesen Strahlssystemen wird heißes Wasser oder Nassdampf unter Düsendrücken bis etwa 150 bar als Strahlmittel benutzt. Die Regeltemperaturen am Strahlgerät liegen etwa zwischen 30 und 150 °C. Im Allgemeinen werden Reiniger- und Inhibitorzusätze über einen Injektor zugeführt. Vorteilhaft kann es sein, Reiniger zunächst in höherer Konzentration aufzusprühen und den Hochdruckstrahl erst nach ausreichender Einwirkzeit einzusetzen.

Hauptanwendungen für das Dampf- und Heißwasserstrahlen sind das Entfernen von öligen, fettigen und schmierigen Verschmutzungen sowie von wasserlöslichen Verunreinigungen, Salzen und Korrosionsprodukten an vielfältigen Werkstücken und Objekten, insbesondere im Kfz-Gewerbe, im Eisenbahnwesen und in verschiedenen Bereichen des Stahl-, Maschinen- und Anlagenbaus.

Sollen Beschichtungen ganz oder teilweise erhalten bleiben, so ist mit geeigneter Wahl von Strahlstärke, Temperatur und Reiniger darauf Rücksicht zu nehmen.

## 3.3 Schleuderradstrahlen

Das Arbeitsprinzip des Schleuderradstrahlens veranschaulicht die **Abb. 16**. Das Schleuder- oder Schaufelrad sowie das Verteilrad (in Rot dargestellt) laufen mit der Welle des direkt angeflanschten Antriebsmotors oder des zwischengeschalteten Lagerbocks kontinuierlich um. Das über ein Zulaufrohr axial zugeführte Strahlmittel läuft in das rotierende büchsenförmige Verteilrad („Zuteilrad“, „Impeller“) ein, wird von der Rotation erfasst und dabei vorbeschleunigt. Das Verteilrad verfügt am Umfang über mehrere fensterförmige Öffnungen, durch die das Strahlmittel nach außen in die fest stehen-

de Leithülse (in Gelb dargestellt) treten kann.

Die Leithülse gibt das vorbebeschleunigte Strahlmittel nur durch ein einzelnes Fenster am Umfang nach außen auf die Schaufeln des rotierenden Schaufelrades frei. Das Strahlmittel wird portionsweise von den Wurf-schaufeln erfasst und gleitet während der Rotation des Rades durch die Zentrifugalkraft nach außen auf der Schaufeloberfläche ab. Am Ende der Schaufeln bzw. äußeren Umfang des Schleuderrades erfolgt der Abwurf des Strahlmittels, das sich aufgrund der portionsweisen Zuteilung auf die Wurf-schaufel auf einen größeren Abstrahlwinkel verteilt. Hierdurch entsteht ein längliches, im Gegensatz zum Druckluftstrahlen flächiges Strahlbild.

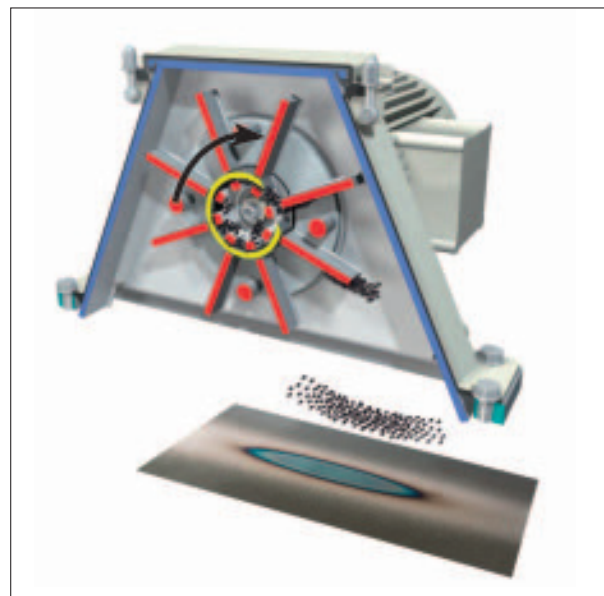
Durch die Drehverstellung der Leithülse kann der Übergabepunkt am inneren Umfang des Schaufelrades bestimmt werden. Hierdurch wird die Lage des Abstrahlwinkels und damit die Strahlbildlage verändert und auf die zu strahlende Oberfläche ausgerichtet. Zur Steuerung der Strahlenergie können die zugeführte Strahlmittelmenge und/oder die Abwurfgeschwindigkeit angepasst werden. Letzteres erfolgt durch die Wahl des Schleuderraddurchmessers oder der

Schleuderraddrehzahl, die wiederum durch Übersetzungen oder frequenzgeregelter Antriebe veränderbar ist.

Das Abstrahlen der Strahlmittelkörner erfolgt in tangentialer Richtung mit der Umfangsgeschwindigkeit des Schaufelrades. Die tatsächliche Abwurfgeschwindigkeit erhöht sich allerdings durch eine radiale Komponente aufgrund der Strahlmittelbewegung auf der Wurf-schaufel. Diese Komponente kann durch eine Vorwärtskrümmung oder eine vorwärts gerichtete Anstellung der Wurf-schaufeln zur tangentialen Richtung hin gekippt werden, so dass sich daraus bei leicht veränderter Abstrahlrichtung eine erhöhte resultierende Abwurfgeschwindigkeit ergibt.

Übliche Schleuderraddurchmesser für normale Anwendungen liegen im Bereich von 250 bis 500 mm. Bei üblichen Drehzahlen zwischen 1.500 und 3.000 Umdrehungen werden Abwurfgeschwindigkeiten zwischen 45 und 90 m/s eingestellt. Es gibt allerdings auch deutlich kleinere Schleuderräder, die in mobilen Strahlgeräten etwa zur Reinigung von Betonflächen eingesetzt werden und erheblich höhere Drehzahlen aufweisen.

**Abb. 16:** Strahlmittelbeschleunigung im Schleuderrad (Prinzipdarstellung)



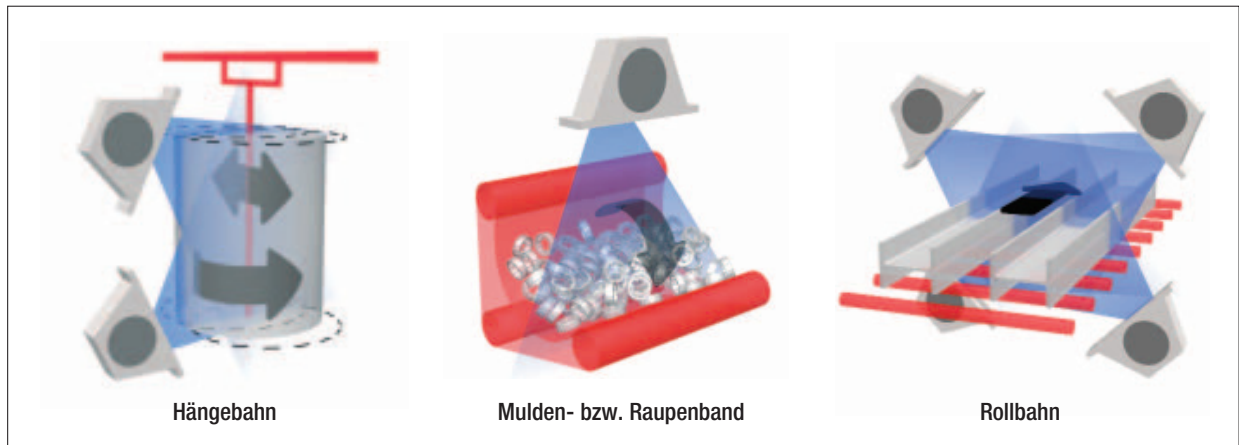


Abb. 17: Übliche Bauarten von Schleuderradstrahlanlagen für allgemeine Strahlanwendungen

Schleuderradstrahlssysteme kommen aufgrund ihrer Größe und ihres Gewichts allerdings vorwiegend in stationären Strahlanlagen zum Einsatz. Meist werden hier mehrere Schleuderradeinheiten („Turbinen“) an einer verschleißfest gestalteten Strahlkabine kombiniert, um das Strahlbild an die Geometrie der Werkstücke anzupassen und damit ein möglichst homogenes Strahlergebnis zu erzielen. Darüber hinaus verfügen fast alle Schleuderradstrahlanlagen über Fördersysteme wie Hängebahnen, Drehtische oder Rollbahnen zur Strahlgutbewegung bzw. über Trommeln und Muldenbänder zur Umwälzung des Strahlguts im Strahl. Strahl- und Transportvorgang, häufig auch Beschickung und Entladung, laufen meist weit-

gehend automatisiert ab. Typische Anlagenbauformen zeigt schematisch die **Abb. 17**, Bauformen zum Kugelstrahlen **Abb. 18**.

Das benutzte Strahlmittel verbleibt bis auf Austragsverluste und die in der Strahlmittelsichtung abgeschiedenen Bestandteile im geschlossenen Kreislauf. Zur anlageninternen Förderung wird das vom Strahlgut und von den Strahlkabinenwänden abprallende Strahlmittel in Sammeltrichtern aufgefangen und z.B. über Förderschnecken, Rüttelrinnen, Förderbänder und Becherwerke über einen Strahlmittelreiniger zum Strahlmittelvorratsbehälter oberhalb der Turbinen zurückgeführt (siehe **Abb. 19**). Der beim Strahlen entstehende Staub wird in einer Filteranlage abgeschieden.

Gegenüber den Druckluftsystemen ist die Strahlmittelauswahl eingeschränkt. Mineralische Strahlmittel kommen aufgrund ihrer stark abrasiven Eigenschaften in Schleuderrädern nicht zum Einsatz, da die hiermit verbundenen Standzeiten der Verschleißteile extrem reduziert werden und die Folgekosten keinen wirtschaftlichen Anlagenbetrieb erlauben. Ausnahme für Sonderanwendungen bilden Keramikugeln, die in Schleuderrädern normaler Bauart allerdings schnell verschleissen. Aus wirtschaftlichen Gründen werden hauptsächlich Stahl- und Edelstahlstrahlmittel mit hoher Standzeit und meist runden Kornformen verwendet, die den Anlagenverschleiß, insbesondere an Turbinenteilen, Verschleißausklei-



Abb. 18: Beispiele für Sonderbauformen von Schleuderradstrahlanlagen zum Kugelstrahlen

und Strahlmittelfördersystemen, gering halten. Verbrauchte und als Feinanteil oder Staub abgeschiedene Strahlmittelbestandteile müssen durch möglichst laufende Zugabe entsprechender Mengen neuen Strahlmittels ersetzt werden.

Das System ist zum einen besonders geeignet für Anwendungen, die eine hohe Strahlenergie bei großen zu strahlenden Oberflächen erfordern. Zu nennen sind beispielsweise das Putzen großer Gussteile oder das Reinigungsstrahlen von Stahlblechen und -profilen. Zum anderen können aber auch kleinere, zugänglich geformte Werkstücke an entsprechenden Gestellen oder auch in Form von Schüttgut sehr wirtschaftlich gestrahlt werden.

Einige Anlagenbeispiele zeigen die **Abb. 20 a bis 20 d**.

Durch die gegenüber dem Druckluftstrahlen für viele Anwendungen geringeren Betriebskosten und die gute Regelbarkeit der Strahlintensität werden Schleuderradstrahlssysteme aber auch für das Verfestigungs- und Umformstrahlen eingesetzt, wobei mit zunehmender zu strahlender Stückzahl die Wirtschaftlichkeit ansteigt.

Zur Qualität und Wirtschaftlichkeit des Strahlprozesses trägt entscheidend bei, das am besten geeignete Strahlmittel in der passenden Körnung sowie die erforderlichen Strahlparameter durch systematische Versuche zu ermitteln und die festgelegten Betriebsparameter laufend zu überwachen und konstant zu halten.

## 3.4 Schleuderradstrahlen mit nassen Strahlmedien

Für Sonderanwendungen, bei denen der Strahlprozess durch einen Waschprozess etwa zur Entfettung oder Entstaubung des Strahlguts ergänzt werden soll, kommen auch nass betriebene Schleuderradstrahlssysteme in Frage. Die gegenüber den Druckluftsys-



Abb. 19: Aufbau einer typischen Schleuderradstrahlanlage



a) Hängebahnstrahlanlage für Gussteile



b) Durchlaufhängebahnstrahlanlage für Schweißkonstruktionen



c) Muldenbandstrahlanlage für Schmiedeteile



d) Rollbahnstrahlanlage für Bleche und Profile

Abb. 20: Beispiele von Schleuderradstrahlanlagen

temen höhere Energieausbeute des Schleuderrades kann hier, wie beim Nassdruckluftstrahlen oder Schlammstrahlen auch, mit den Vorteilen eines Strahlmittel-Wasser-Gemisches kombiniert werden. Für Reinigungsvorgänge erfolgt zusätzlich eine Erwärmung des Kreislaufwassers, dem Waschsubstanzen und Inhibitoren zudosiert werden können. Ein zur Entfettung vor- bzw. zur Entstaubung nachgeschalteter Arbeitsvorgang kann dadurch entfallen. Zusätzlich erlaubt das Verfahren eine gleichzeitige Konservierung oder Passivierung in der gleichen Maschine.

Bei der Strahlmittelauswahl ist zu beachten, dass mit Ausnahme von Keramikugeln mineralische Strahlmittel auch für nass betriebene Schleuderräder nicht geeignet sind. Aufgrund der Wasserkorrosion ist die Auswahl weiter eingeschränkt, sodass nur Edelstahl, Keramik- und Kunststoffstrahlmittel eingesetzt werden können. Diese mit Wasser und ggf. Waschsubstanzen kombinierte Strahlbehandlung ergibt eine intensive, aber schonende Bearbeitung, die durch zusätzliche Nassdruckluft, Druckflüssigkeits- oder einfache Spüldüsen unterstützt werden kann. Hierdurch erfolgt eine effiziente Reinigung der Werkstücke in kurzer Zeit.

Die Mehrkosten dieses Strahlsystems liegen in dem damit einhergehenden technischen Aufwand für die kontinuierliche Aufbereitung des Strahlmittel-Wasser-Gemisches sowie die wasserdichte Ausführung von Strahlaggregat und Strahlkabine aus rostfreiem Stahl. Vor- und Nachteile dieser Lösung müssen gegenüber einer Trennung von Strahl- und Waschanlage abgewogen werden.

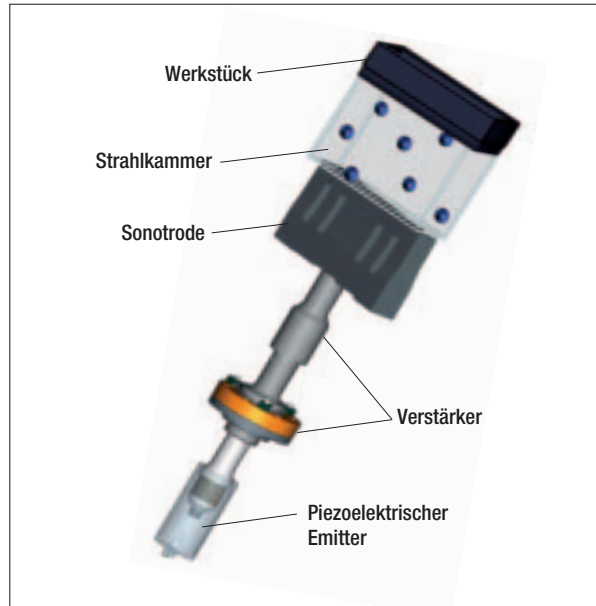


Abb. 21:  
Prinzip des Ultraschallstrahlens

### 3.5 Ultraschallstrahlen

Bei dem in **Abb. 21** dargestellten Ultraschallstrahlen erfolgt die mechanische Beschleunigung des Strahlmittels auf schalltechnischem Wege. Mit Hilfe eines Piezoelements werden elektrische Signale eines Frequenzgenerators in Ultraschallschwingungen einer sogenannten Sonotrode umgewandelt. Dieser Körper überträgt seine mechanische Schwingungsenergie bei Berührung auf die genau definierten Strahlkugeln aus Stahl, Edelstahl, Keramik oder Wolframcarbid, die dabei stark beschleunigt werden. Die Sonotrode und deren Aufnahme bilden zusammen mit dem Werkstück eine lokale Strahlkammer, in der die Kugeln sich gegenseitig anstoßen und auf die partielle Oberfläche des Werkstücks aufschlagen. Hierbei handelt es sich im Gegensatz zu allen anderen Strahlsystemen um eine ungerichtete Strahlmittelbeschleunigung.

Die wichtigste Anwendung für das Ultraschallstrahlsystem liegt im lokalen Verfestigen, auch von strahltechnisch schwer zugänglichen Innenflächen. Das Ultraschallverfestigen oder auch Ultrasonic Shot Peening (USP) ist ein Verfahren zur Steigerung der Wechsel-

festigkeit dynamisch beanspruchter Bauteile. Durch Beaufschlagung mit den durch Ultraschall erregten Strahlkugeln wird die zur Verfestigung notwendige Energie in das Bauteil eingebracht. Hierbei können die Kugeleinzelmasse, Kugelanzahl, Schwingungsamplitude und Prozesszeit verändert werden, um den Prozess zu steuern.

Durch die Verwendung runder, polierter Kugeln aus Stahl und die unterschiedlichen Aufprallrichtungen wird eine homogene Oberfläche geringer Rauheit erzeugt. Das Verfahren zeichnet sich außerdem durch hohe Prozesssicherheit, Sauberkeit und geringe Betriebskosten aus.

Einschränkungen in der Anwendbarkeit liegen insbesondere in der geringen Korngeschwindigkeit und der räumlich begrenzten Strahlwirkung, die in vielen Einsatzfällen zwar explizit gewünscht ist, die den Einsatz für großflächige Anwendungen oder aber große Stückzahlen mit kurzen Zykluszeiten jedoch sehr verteuern.

Das Verfahren wird bereits in unterschiedlichsten Bereichen wie im Kraftwerksbau, in der Automobil- und Luftfahrtindustrie, der Textil- und der medizinischen Industrie eingesetzt.

## 3.6 Thermisch-mechanische Strahlbehandlung

Die hierunter fallenden Verfahren basieren nicht auf Strahlsystemen im Sinne der DIN 8200, da hierbei keine beschleunigten Strahlmittel zum Einsatz kommen. Aufgrund ihrer strahlähnlichen Wirkungsweise werden sie jedoch häufig den Strahlverfahren zugeordnet.

### Flammstrahlen

Das Flammstrahlen ist eine Oberflächenbehandlung zur Reinigung beschichteter, verschmutzter oder verkrusteter Oberflächen und wird auf Beton, Naturstein und warmgewalzten verzünderten oder verrosteten Stahlblechen eingesetzt. Die Ausführung erfolgt mit kammartigen Flammstrahlbrennern unter Einsatz einer reduzierenden Acetylen-Sauerstoff-Flamme, also mit Sauerstoff-Überschuss. Der Brenner wird einmal oder nach zwischenzeitlichem Reinigen und Abkühlen auch mehrmals über die Fläche geführt. Dabei werden unerwünschte Stoffe verbrannt oder durch die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten der beteiligten Stoffe gelockert und in einem weiteren Arbeitsgang durch maschinelles Bürsten entfernt.

Beim Entzünden und insbesondere Entrosten von Stahl wird durch die extreme Hitzeeinwirkung die Feuchtigkeit in den Poren verdampft. Die dabei auftretende Volumenvergrößerung unterstützt die Ablösung bzw. Lockerung.

Flammstrahlen ist aufgrund der Gefahr der Verformung nicht bei Blechdicken unter 5 mm Dicke anwendbar. Es ist zu beachten, dass Beschichtungen auf der Blechrückseite durch die Hitzeeinwirkung beschädigt werden können. In Bezug auf die Arbeitssicherheit und die Umwelt ist zu beachten, dass aus verbrannten Stoffen Ruß, schädliche Stäube, Dämpfe, Gase und andere Gefahrstoffe freige-

setzt werden können. Besondere Schutzbekleidung ist erforderlich.

### Kaltgasstrahlen

Beim Entschichten durch Kaltgasstrahlen mit flüssigem Stickstoff („Kryogenes Entlacken“) wird ein aus flüssigem Stickstoff entwickelter und daher etwa  $-195\text{ °C}$  kalter Flüssigkeits-/Gasstrahl auf die Oberfläche geleitet. Alte oder fehlerhaft ausgeführte Beschichtungen und Fremdstoffe werden infolge des Kälteschocks und der Versprödung zum Abplatzen gebracht bzw. können in diesem Zustand leicht mechanisch entfernt werden. Je dicker die zu entfernenden Beschichtungen sind, desto besser ist die Wirkung. Außer der abgetragenen Beschichtung fällt kein zusätzlicher Abfall an, was die Entsorgung erleichtert. Die Oberfläche muss ggf. allerdings noch nachgereinigt werden, um verbliebene Reste der Beschichtung vollständig zu entfernen.

## 4 Strahlmittel

Strahlmittel sind die Werkzeuge der Strahlverfahrenstechnik. Vereinzelt werden Strahlmittel fälschlicherweise noch als Strahlsand bezeichnet, obwohl das Strahlen mit Quarzsand aus Arbeitsschutzgründen nur noch in seltenen Einzelfällen zulässig ist (vgl. Kapitel 9.1).

Als Strahlmittel werden meist feste, körnige und durch Sieben klassifizierte Granulate verwendet, es kommen aber auch Flüssigkeiten und Gemische aus beiden sowie verflüssigte und gefrorene Gase zum Einsatz. Flüssigkeiten dienen beim Druckflüssigkeitsstrahlen selbst als Strahlmittel oder aber bei anderen Strahlsystemen und Strahlanwendungen zur Dämpfung der abrasiven Strahlwirkung oder zum Binden von Staub.

## 4.1 Strahlmittelsorten

Eine vollständige Übersicht über alle industriell verwendeten Strahlmittelsorten zu geben, ist kaum möglich. Eine Auflistung der gängigsten Sorten ist der **Tabelle 5** sowie der **Abb. 22** (Seite 26/27) zu entnehmen. Strahlmittel lassen sich grob in

- metallische,
- natürlich-mineralische,
- synthetisch-mineralische,
- natürlich-organische und
- synthetisch-organische

Sorten aufteilen. Aufgrund der stark unterschiedlichen Anforderungen der Anwendungen und Einsatzfälle sind auch die Anforderungen an die Eigenschaften der Strahlmittel entsprechend vielfältig, sodass es keine universal verwendbaren Sorten gibt. Vielmehr muss die Strahlmittelauswahl möglichst exakt an die vom Prozess gestellten Anforderungen angepasst werden.

**Einwegstrahlmittel** sind in der Regel kurzlebige mineralische Strahlmittel, die beim Auftreffen auf das Strahlgut entweder zersplittern oder aber stark verunreinigen. Diese werden deshalb dort eingesetzt, wo eine Sammlung und Aufbereitung nicht möglich oder wirtschaftlich nicht sinnvoll ist. Dies ist etwa beim Strahlen von z.B. durch Öl, Fett oder Schmierstoffe verschmutzten Teilen der Fall. Aufgrund des vollständigen Verlusts beim Strahlen kommen vorwiegend Reststoffe aus Produktionsprozessen wie Schlacken zum Einsatz.

**Umlaufstrahlmittel** werden in Anlagen verwendet, die in der Lage sind, das Strahlmittel wieder aufzufangen, durch Sichtung oder Reinigung aufzubereiten und dem Prozess zurückzuführen. Dabei werden unbrauchbare Anteile wie grobe und feine Fremdpartikel, Feinanteile unterhalb der brauchbaren Korngröße sowie Staub entfernt und die abgeschiedenen Strahlmittelanteile mengenmäßig durch Neukorn ersetzt.

Werkstoffgruppe	Strahlmittelart	Bemerkung	Kornform		Dichte g/cm <sup>3</sup>
			Anlieferungs- zustand	Betriebs- gemisch	
metallisch (Gusseisen und Stähle)	Hartguss	C ≥ 2,80 %	rund kantig	rund/kantig** kantig	7,2–7,4 7,2–7,4
	Stahlguss, hoch gekohlt	C ≥ 0,85 %	rund kantig (GP) kantig (GL) kantig (GH)	rund gerundet kantengerundet kantig	7,3–7,5 7,5–7,7 7,5–7,7 7,5–7,7
	Stahlguss, niedrig gekohlt	C ≈ 0,10 %	rund	rund	7,6–7,8
	Stahldrahtkorn	Reinigen	zylindrisch	gerundet	7,8–7,9
	Stahldrahtkorn	Verfestigen	zylindrisch (Z) kugelrund (G3)	gerundet rund	7,8–7,9 7,8–7,9
metallisch (Edelstähle)	Edelstahlguss	CrNi-Stahl	rund	rund	7,7–8,1
	Chromstahlguss	Cr-Stahl	rund kantig	rund kantig	7,5–7,7 7,7–8,1
	Edelstahldrahtkorn	CrNi-Stahl	zylindrisch gerundet	gerundet rund	7,7–8,1 7,7–8,1
metallisch (Nichteisenmetalle)	Aluminiumgranulat	–	rund	rund	2,7–2,8
	Aluminiumdrahtkorn	–	zylindrisch	gerundet	2,7–2,8
	Zinkgranulat	–	rund	rund	7,1–7,2
	Zinkdrahtkorn	–	zylindrisch	gerundet	7,1–7,2
natürlich-mineralisch	Quarzsand	–	kantenrund	–*	2,65
	Granatsand	–	kantig	kantig	4,0–4,1
	Olivinsand	–	kantig	kantig	3,3
synthetisch-mineralisch	Schlacken	–	kantig	–*	2,5–3,7
	Normalkorund	–	kantig	kantig	3,9–4,0
	Edelkorund	–	kantig	kantig	3,9–4,0
	Glasperlen	–	rund	rund/kantig**	2,5
	Glasbruch	–	kantig	kantig	2,5
	Keramikperlen	–	rund	rund/kantig**	3,7–3,9
	Keramikgranulat	–	kantig	kantig	3,7–3,9
natürlich-organisch (vegetabil)	Nussschalenschrot	–	kantig	kantengerundet	0,9
	Obstkernschrot	–	kantig	kantengerundet	0,9
	Maiskolbensschrot	–	kantig	kantengerundet	0,9
synthetisch-organisch	Kunststoffe	–	alle Kornformen	kantengerundet	1,1–1,5

Tabelle 5: Übersicht über die gängigsten industriell genutzten Strahlmittelsorten

\* Einwegstrahlmittel

\*\* Kantige Anteile durch Zerschlagen

\*\*\* Angaben in Vickershärte HV für mineralische Strahlmittel sind Vergleichswerte

Alle Angaben sind Richtwerte für gängige Sorten. Spezialstrahlmittel sind nicht erfasst.

Alle Angaben sind sorgfältig recherchiert, aber ohne Gewähr.

Schüttgewicht g/cm³	Anlieferungszustand Härte (Richtwerte)		Betriebsgemisch Aufhärtung (Richtwerte)	
	HRC	HV	Δ HRC	Δ HV
4,0–4,4	57–64	640–800	–	–
3,3–3,7	57–64	640–800	–	–
4,1–4,5	40–51	390–530	2–4	25–55
3,5–3,9	40–52	390–550	1–2	10–25
3,5–3,9	53–60	560–700	0–1	0–20
3,5–3,9	64–68	800–940	–	–
4,3–4,5	40–42	390–410	4–6	45–70
4,2–4,4	41–49	400–500	2–7	20–100
4,2–4,4	52–56	550–610	3–6	60–120
4,6–5,0	56–60	610–700	1–2	10–30
4,6–4,8	20–30	230–300	10–15	100–150
4,3–4,5	41–49	400–500	7–10	100–150
4,0–4,2	56–62	620–750	–	–
4,3–4,5	45–59	450–670	0–6	0–100
4,6–4,8	45–60	450–700	0–1	0–20
1,5–1,7	–	55–125	–	0–15
1,4–1,6	–	100–150	–	0–10
3,9–4,1	–	30–45	–	0–10
3,9–4,1	–	30–45	–	0–5
	Härte (Richtwerte)		Aufhärtung	
	Mohs	HV***	keine	
1,4–1,6	7	1.100		
2,0–2,4	7,5–8	1.300–1.500		
1,7–2,1	6,5–7	900–1.100		
1,2–1,9	7–8	1.100–1.500		
1,5–1,8	9	2.100		
1,5–1,8	9	2.100		
1,5–1,6	6	750		
1,4–1,5	6	750		
2,3–2,4	5–9	500–2.100		
1,7–2,1	5–9	500–2.100		
0,7	2,5	50		
0,7	2,5	50		
0,7	4,5	300		
0,7–0,8	2,5–4	50–200		

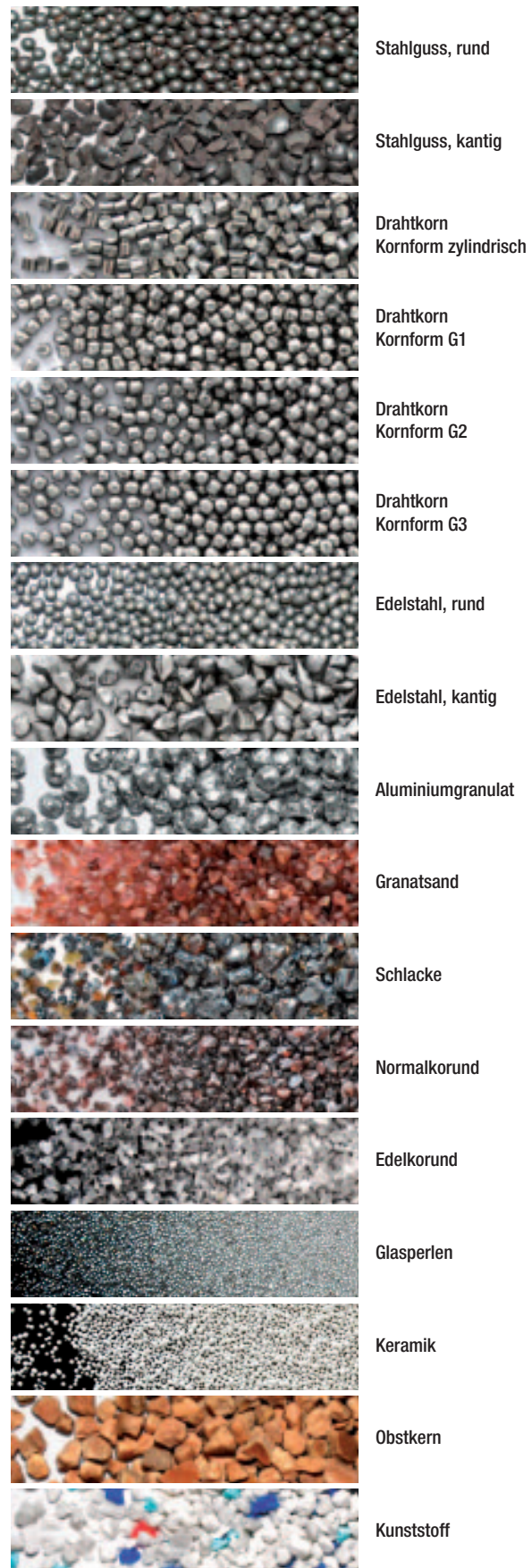


Abb. 22: Strahlmittel

Dabei ist es wichtig, das Betriebsgemisch durch kontinuierliches Nachfüllen von Neukorn in einer konstanten Korngrößenverteilung zu halten, um ein gleich bleibendes Strahlergebnis zu erzielen.

#### 4.2 Strahlmitteleigenschaften

Die gängigsten metallischen Strahlmittel sind nach DIN EN ISO 11124, die wichtigsten nicht-metallischen Sorten nach DIN EN ISO 11126 genormt.

Die Prüfung von Strahlmitteln unterliegt den Normen DIN EN ISO 11125 für metallische und DIN EN ISO 11127 für nichtmetallische Sorten.

Folgende Begriffe müssen nach DIN 8200 unterschieden werden:

Die **Strahlmittelart** bezeichnet Werkstoff und Gewinnungs- bzw. Herstellungsprozess.

*Beispiel: CrNi-Stahl, gegossen.*

Die Angabe der **Strahlmittelsorte** beinhaltet die Strahlmittelart, Korngruppe bzw. Korngröße, Kornform und ggf. Härte.

*Beispiel: CrNi-Stahl, gegossen, 0,4-0,8 mm, rund, 250 HV1.*

Die **Korngruppe** bezeichnet eine betrieblich hergestellte Körnung mit Festlegung der zulässigen Anteile von unterer und oberer Prüfkorngröße, hier 0,4 und 0,8 mm.

Die verwendeten **Korngrößen** variieren nach Anwendung und Einsatzfall. Allgemein übliche Korngrößen liegen im Bereich von 0,2 bis zu etwa 2,0 mm. In Spezialfällen feinsten Oberflächenbehandlungen wie beim Polierstrahlen kommen Strahlmittel mit Körnungen bis unter 50 µm zum Einsatz.

Die Korngrößen können im Herstellprozess oft nur in begrenztem Maße beeinflusst werden. Daher müssen die für den jeweiligen Strahlprozess erforderlichen Korngruppen durch Klassifikation, Siebung und ggf. Mischung hergestellt

werden. Der hierfür erforderliche Aufwand kann in Einzelfällen einen erheblichen Teil der Strahlmittelkosten ausmachen.

Die vorkommenden **Kornformen** der Strahlmittel sind kantig oder rund. Bei den metallischen Strahlmitteln werden kantige Formen meist durch Brechen von Kugeln erzeugt. Eine Sonderstellung nimmt das Drahtkornstrahlmittel ein, da dieses Material von gezogenem Draht geschnitten wird und die Kornform im Rohzustand daher zylindrisch ist. Drahtkornstrahlmittel wird darüber hinaus in den Arrondierungsgraden G1, G2 und G3 angeboten. Diese Kürzel bezeichnen den zunehmenden Grad der Kantenrundung, die durch mehrfachen Durchlauf in einer Arrondierungsanlage erzielt werden. In der Qualität G3 ist das Strahlmittel weitestgehend verrundet. Dennoch zeigen makroskopisch runde Strahlmittelkörner mikroskopisch zerklüftete Oberflächenstrukturen, siehe **Abb. 23**.

Die **Kornhärte** ist neben der Kornform entscheidend für die Wirkung auf der gestrahlten Oberfläche. Unterschiedliche Strahlmittelarten wie mineralische, metallische und organische Medien weisen teils vollkommen unterschiedliche Gefüge und Strukturen auf und müssen daher auch mit unterschiedlichen Härteskalen bewertet werden, siehe Tabelle 5.

In Bezug auf die Härteangaben ist unbedingt zu beachten, dass es sich hierbei um Richtwerte handelt,

die je nach Herkunft bzw. Werkstoffzusammensetzung, Hersteller und Prozessführung bei der Herstellung schwanken können. Die Härte für mineralische Strahlmittel wird in Mohs angegeben. Daher sind die Angaben in Vickershärte HV für diese Strahlmittel lediglich als Vergleichswerte zu sehen.

Über die genannten Kenngrößen hinaus gibt es noch weitere charakterisierende Strahlmitteleigenschaften, wie z. B.:

- Zähigkeit und Elastizität
- Verrundungs- und Zersplitterungscharakteristik
- Standzeit
- Dichte und Schüttgewicht
- Aufnahmefähigkeit für Feuchte

Diese üben erheblichen Einfluss auf die Strahlmittelbeschleunigung, den Strahlprozess und das Strahlergebnis aus und sind daher besonders zu berücksichtigen. Darüber hinaus bestimmt die Standzeit des Strahlmittels zu einem großem Teil auch die Wirtschaftlichkeit eines Strahlprozesses.

#### 4.3 Strahlmittelaufbereitung

Die kontinuierliche Strahlmittelaufbereitung in einer Strahlanlage muss mehrere Ziele erfüllen:

- Abscheidung von abgestrahlten Teilen und Partikeln des Strahlgutes wie z.B. Graten und Farbpartikeln, um den Strahlmitteltransport und das Strahlergebnis nicht zu beeinträchtigen

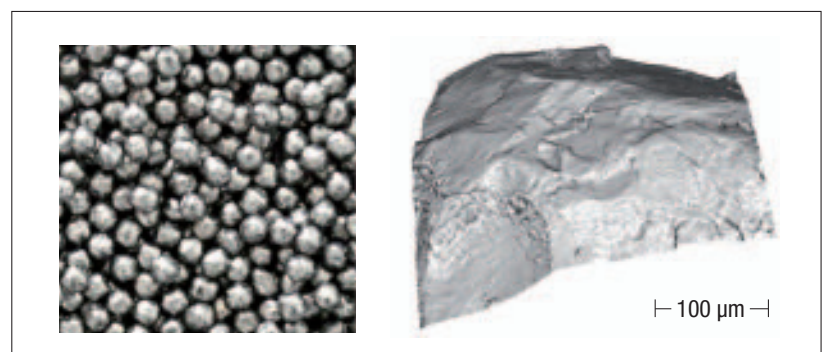


Abb. 23: Oberflächenstruktur von gerundetem Drahtkornstrahlmittel

- Abscheidung von abgestrahlten abrasiven Stoffen wie Zunder oder Quarzsand, um den Anlagenverschleiß zu minimieren
- Abscheidung von gesundheitsgefährdenden Stoffen in Form von Stäuben, um die Arbeitssicherheit und die Umwelt nicht zu gefährden
- Abscheidung defekter Körner und feinkörniger Anteile unterhalb der brauchbaren Korngröße, um das gewünschte Strahlergebnis sicherzustellen.

Für nass betriebene Strahlverfahren kommt ggf. noch das Abtrennen von Ölen, Fetten oder anderen chemischen Verunreinigungen hinzu. Insbesondere in den trocken betriebenen Strahlanlagen allerdings sollte der Eintrag dieser Stoffe über das Strahlgut möglichst ganz vermieden werden, weil diese kaum zu beseitigen sind und sich möglicherweise sogar im Strahlmittel anreichern. Bei der Wiederverwendung des Strahlmittels im Umlauf dürfen zumindest keine Stoffe vorhanden sein oder anhaften, die sich nachteilig auf die Haftung oder Beständigkeit einer ggf. nachfolgenden Beschichtung auswirken können.

Als **Istkörnung** bezeichnet man die Korngrößenverteilung des ungebrauchten Neukorns im Anlieferungszustand, das sich durch zyklische Belastung in einer Strahlanlage zu einem betriebsfähigen Gemisch umwandelt.

Die **Beharrungskörnung** ist die Korngrößenverteilung des Betriebsgemisches, wenn das Strahlmittel in einer Strahlanlage durch die kontinuierliche Nachfüllung so weit ersetzt wurde, dass sich die Körnung nicht mehr ändert und es den optimalen Zustand in Aufhärtung und Reinigungseffekt erreicht hat.

Die Qualität der oft auch als Strahlmittelreinigung bezeichneten Aufbereitung ist unabdingbare Voraussetzung für die gleich bleibende Qualität des Strahlergebnisses sowie einen sicheren und wirt-

schaftlichen Anlagenbetrieb. Zur Gewährleistung dieses Betriebszustandes ist nicht nur eine anforderungsgerechte Anlagenauslegung und -konstruktion, sondern unbedingt auch eine sorgfältige und regelmäßige Wartung erforderlich.

## 5 Anwendungsorientierte Verfahrensauswahl

Wie in den Kapiteln 1–4 erläutert erfordern verschiedene Strahlanwendungen den Einsatz unterschiedlicher Strahlsysteme und Strahlmittel. Ein anwendungsorientierter Katalog der sich daraus ergebenden Strahlverfahren ist in **Tabelle 6** (Seite 30–32) zusammengestellt.

## 6 Grundlagen des Strahlprozesses

### 6.1 Physikalische Wirkprinzipien

Die Oberflächenbehandlung mittels Strahlmitteln beruht auf der Wirkung, die jedes einzelne Strahlmittelkorn beim Aufprall auf die Werkstückoberfläche ausübt. Die zum Teil mit hohen Geschwindigkeiten von über 100 m/s auftreffenden Körner prallen von der Oberfläche ab, erfahren je nach Auftreffwinkel eine leichte Ablenkung bis hin zu einer Richtungsumkehr und geben bei diesem unelastischen Stoß einen Teil ihrer Energie an die Oberfläche ab, die dabei ihre Gestalt verändert. Die beim Stoß frei werdende Energie wird in eine Formänderung und eine lokale Erwärmung der Oberfläche sowie der Strahlmittelkörner selbst umgesetzt.

Die Größe der übertragenen Energie hängt von der Kornenergie, den Eigenschaften des Strahlmittels wie Kornform, Kornwerkstoff und Kornhärte, dem Auf-

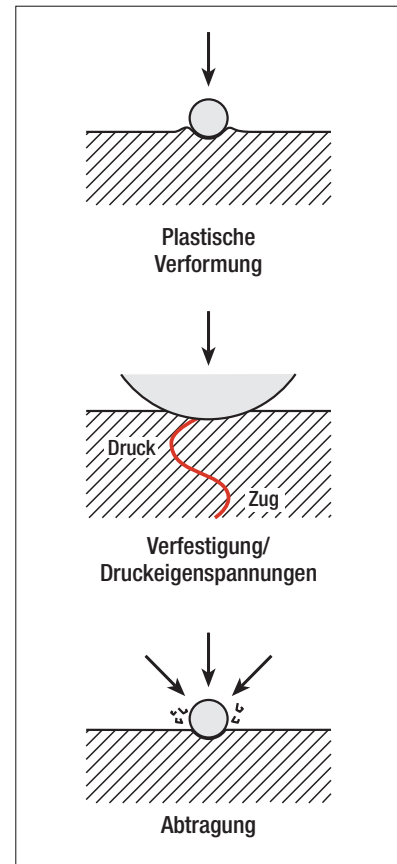


Abb. 24: Strahlwirkungen auf die Oberfläche

treffwinkel sowie den Eigenschaften der bestrahlten Oberfläche ab. Die Kornenergie berechnet sich nach der einfachen physikalischen Formel  $W = 1/2mv^2$  und wächst damit proportional mit der Kornmasse und quadratisch mit der Korngeschwindigkeit.

Die primären Strahlwirkungen auf die Werkstückoberfläche durch die Umwandlung der kinetischen Energie des Kornes können wie folgt unterschieden werden (siehe **Abb. 24**):

- **plastische Verformung** – Veränderung der Oberflächenstruktur durch Materialverschiebung
- **Verfestigung** – Erhöhung der Versetzungsdichte im metallischen Kristallgitter und Einbringung von Druckeigenspannungen
- **Abtragung** – Veränderung der Oberflächenstruktur durch Herauslösen von Partikeln

Strahl-anwendung	Aufgabe	Bevorzugte Strahlsysteme	Bevorzugte Strahlmittel	Strahlgutbeispiele
Abtragen	Mehrachsiges Kantenpräparieren zur Erzeugung einer definierten Schneidkantengestalt	Druckstrahlen	Korund	Komplexe Zerspanwerkzeuge wie Wendelbohrer, Fräser usw.
	Untersuchung des Verschleißverhaltens von Werkstoffen	Je nach Prüfung	Je nach Prüfung	Prüfstrahlen
Aufrauen	Starkes Aufrauen zwecks Herstellung von Formschluss	Druckstrahlen Schleuderradstrahlen	Stahlguss (kantig) Edelstahlguss (kantig)	Bremsbelagträger Zylinderauskleidungen („Liner“)
	Aufrauen zwecks Haftungsverbesserung	Druckstrahlen Schleuderradstrahlen	Stahlguss (kantig) Edelstahlguss (kantig)	Einzelwerkstücke jeglicher Art
	Sweepen: leichtes Aufrauen zwecks Haftungsverbesserung für nachfolgende Lackierung	Druckstrahlen Schleuderradstrahlen	Stahlguss (kantig) Edelstahlguss (kantig)	Verzinkte Werkstücke
Entgraten	Entfernen von Schnittgraten	Druckstrahlen Injektorstrahlen	Glasperlen Keramikperlen Stahlguss (rund)	Spanend bearbeitete Werkstücke wie Dreh- und Frästeile
	Entfernen bzw. Verrunden von Schnittgraten	Schleuderradstrahlen	Stahlguss (rund)	Laserschneidteile, Plasmaschneidteile und Brennzuschneide mit feinen oder losen Graten
Entrosten	Entrosten zwecks Aufarbeitung oder Instandsetzung und nachfolgender erneuter Beschichtung	Druckstrahlen Injektorstrahlen Schleuderradstrahlen	Hartguss Korund Schlacken Stahlguss (rund/kantig)	Bestehende Stahlkonstruktionen aller Art wie Bühnen, Brücken usw. Einzelwerkstücke jeglicher Art Flach- und Profilstahlerzeugnisse
Entschichten	Entfernen alter Lackierungen zwecks Risskontrolle der Oberflächen	Druckstrahlen	Nussschalen-, Obstkern-, Maiskolbenschrot; Kunststoffe (alle Kornformen)	Flugzeugaußenwände
	Entfernen alter Beschichtungen zwecks Revision	Druckstrahlen Schleuderradstrahlen Druckflüssigkeitsstrahlen	Stahlguss (rund/kantig) Wasser, teils mit Zusatz fester Strahlmittel	Schiffsaußenwände
	Entfernen alter Lackierungen zwecks Aufarbeitung oder Instandsetzung und nachfolgender erneuter Beschichtung	Druckstrahlen Saugkopfstrahlen	Schlacken Hartguss (rund/kantig) Stahlguss (rund/kantig)	Bestehende Bauwerke und Stahlkonstruktionen aller Art wie Hochbauten, Brücken, Bühnen usw.
		Druckstrahlen Schleuderradstrahlen	Stahlguss (rund/kantig)	Einzelwerkstücke jeglicher Art Traghaken und -gestelle aus Lackierereien und Lackieranlagen Bahnfahrzeuge wie Güter- und Personenwagen
	Entfernen alter Lackierungen zwecks Rekonditionierung	Schleuderradstrahlen	Stahlguss (rund/kantig)	Behälter wie LPG-Gasflaschen, Fässer usw.
	Entfernen von Öl- und Fettrückständen zur Wiederaufarbeitung	Dampfstrahlen Trockeneisstrahlen	CO <sub>2</sub> -Pellets, CO <sub>2</sub> -Schnee, Wasser	Kraftfahrzeugteile und -aggregate
	Reinigen von Kokilleninnenwänden	Druckstrahlen	Glasbruch	Kokillen für Blockguss von Schmiederohlingen, Strangguss von Stahlbrammen und Knüppeln
		Druckstrahlen Injektorstrahlen	Glasperlen	Kokillen für Kleingussteile

Tabelle 6 (Teil 1 von 3): Anwendungsorientierter Katalog der Strahlverfahren – Auswahl

Strahl-anwendung	Aufgabe	Bevorzugte Strahlsysteme	Bevorzugte Strahlmittel	Strahlgutbeispiele
Entschichten (Fortsetzung)	Reinigen von Forminnenflächen ohne Beeinträchtigung der Toleranzen und ohne Beschädigung von Gravuren	Druckstrahlen Injektorstrahlen Schleuderradstrahlen	Glasperlen, Keramikperlen; Nussschalen-, Obstkern-, Maiskolbensschrot; Kunststoffe (alle Kornformen)	Formen für Metalldruck- und -spritzguss (kein Schleuderradstrahlen) Formen für automatische Glasblasmaschinen in Glashütten
		Druckstrahlen Injektorstrahlen Trockeneisstrahlen	Nussschalen-, Obstkern-, Maiskolbensschrot; Kunststoffe (alle Kornformen); CO <sub>2</sub> -Pellets CO <sub>2</sub> -Schnee	Formen für Kunststoff-spritzguss und -extrusion sowie Gummiformteile
	Entfernen von Verkokungsrückständen ohne Beeinträchtigung der Toleranzen	Druckstrahlen Feucht-, Nass- und Schlämmstrahlen Injektorstrahlen Nassschleuderradstrahlen Trockeneisstrahlen	Glasperlen Keramikperlen CO <sub>2</sub> -Pellets CO <sub>2</sub> -Schnee Edelstahlguss (rund)	Teile von Verbrennungsmotoren wie Kolben und Zylinderköpfe
	Entfernen von Schweißschlacke und anderen Schweißrückständen	Druckstrahlen Schleuderradstrahlen	Stahlguss (rund)	Schweißteile und -konstruktionen
Entzundern	Entfernen von Zunder nach der Wärmebehandlung, dem Schmieden oder dem Walzen	Schleuderradstrahlen	Stahlguss (rund)	Warmwalzerzeugnisse wie Bleche, Stabstahl, Drähte usw. Schmiedeerzeugnisse
Glätten/ Polieren	Glätten und Polieren mit Nassstrahlsystemen zur Schonung der Oberfläche und Bindung von Staub	Druckflüssigkeitsstrahlen, Nass- und Schlämmstrahlen	Glasperlen Keramikperlen	Werkstücke mit empfindlicher Oberfläche
	Glätten zur Entfernung von Bearbeitungsspuren	Druckstrahlen	Glasperlen Keramikperlen	Spanend bearbeitete Werkstücke
	Polieren von matten Funktionsflächen	Druckstrahlen	Glasperlen Keramikperlen	Nitrierte und nitrocarburierte Werkstücke
Mattieren	Definiertes Aufrauen	Druckstrahlen Schleuderradstrahlen	Stahlguss (kantig) Edelstahlguss (kantig)	Walzwerkswalzen zum Kaltwalzen
	Vorbereitung für metallische Überzüge wie Verchromung, Vernickelung usw.	Druckstrahlen Schleuderradstrahlen	Korund Edelstahlguss (kantig) Stahlguss (kantig)	Metallische Werkstücke jeglicher Art
Putzen	Entfernen von Formsand und Gießrückständen	Druckflüssigkeitsstrahlen, Schleuderradstrahlen	Stahlguss (rund) Wasser	In Sand gegossene Werkstücke aus Grau-, Stahl- und Aluminiumguss
Trennen	Gratfreies Trennen bis 300 mm Dicke in beliebigen Flächenkonturen und Schnittwinkeln ohne thermisch bedingte Gefügeveränderungen	Druckflüssigkeitsstrahlen	Granatsand	Stahlbleche
Umformen	Wölbung von Kuppelteilen	Druckstrahlen	Stahldrahtkorn (arrondiert) Edelstahldrahtkorn (arrondiert)	Bauteile von Weltraumraketen

Tabelle 6 (Teil 2 von 3): Anwendungsorientierter Katalog der Strahlverfahren – Auswahl

Strahl-anwendung	Aufgabe	Bevorzugte Strahlsysteme	Bevorzugte Strahlmittel	Strahlgutbeispiele
Umformen (Fortsetzung)	Richten zur Korrektur von herstellungsbedingten Form- und Lageabweichungen	Druckstrahlen Schleuderradstrahlen	Stahldrahtkorn (arrondiert)	Dünnwandige Werkstücke wie Blech- und Druckgussteile
	Profilierung und Formgebung	Druckstrahlen Schleuderradstrahlen	Stahldrahtkorn (arrondiert) Edelstahldrahtkorn (arrondiert)	Flugzeugtragflächen und Flügelteile
Verfestigen	Verminderung der Gefahr von Spannungsrisskorrosion	Druckstrahlen	Stahldrahtkorn (arrondiert)	Druckbehälter
	Beseitigung von Spannungskonzentrationen	Druckstrahlen	Stahldrahtkorn (arrondiert) Keramikperlen	Werkstücke mit Hohlkehlen, Bohrungen, Nuten usw.
	Erhöhung der Dauerfestigkeit	Druckstrahlen Schleuderradstrahlen	Stahldrahtkorn (arrondiert)	Werkstücke aus Stahl und Stahlguss unter wechselnder Last
	Verminderung des schädlichen Einflusses von Entkohlung, Aufkohlung und Oberflächenkorrosion	Druckstrahlen Schleuderradstrahlen	Stahldrahtkorn (arrondiert)	Werkstücke nach Wärmebehandlung

Tabelle 6 (Teil 3 von 3): Anwendungsorientierter Katalog der Strahlverfahren – Auswahl

Die plastische Verformung kommt nur bei metallischen oder weichen nichtmetallischen Oberflächen zum Tragen, die Verfestigung ist nur bei metallischen Werkstoffen möglich. Beide Wirkungen beruhen auf dem Hämmer-effekt eines auf der Oberfläche einschlagenden Korns, der sowohl eine Veränderung der Oberflächenstruktur als auch eine Erhöhung der Versetzungsdichte im Kristallgitter zur Folge hat. Die so eingebrachten Spannungen können sogar eine Verformung des gesamten Werkstücks bewirken, was bei dünnwandigen Teilen unbedingt zu beachten ist. Die abtragende Wirkung entsteht dann, wenn sich das Material aufgrund seiner Eigenschaften oder der Eigenschaften des Strahlmittels wie Kornform und -härte nicht genügend schnell verschieben kann.

Die tatsächlichen Strahlwirkungen lassen sich in der angewandten Strahltechnik praktisch nicht voneinander trennen, da nahezu jede plastische Verformung aufgrund der hohen Umformge-

schwindigkeiten auch einen Materialabtrag zur Folge hat. Umgekehrt lässt sich bei den Metallen ein gewünschter Oberflächenabtrag nicht ohne plastische Veränderung der Oberfläche aufgrund von Materialverschiebungen realisieren.

## 6.2 Strahlprozesstechnische Kenngrößen

Gemäß der DIN 8200 sind für die Durchführung eines Strahlprozesses verschiedene Kenngrößen maßgeblich. Zur logisch einwandfreien und vollständigen Beschreibung dürfen diese allerdings nicht vermischt, sondern sollten in Ergänzung und Präzisierung der Norm wie folgt unterschieden werden:

- **Strahlgutkenngrößen**  
zur Kennzeichnung der strahlgutspezifischen Gegebenheiten bzw. Anforderungen (siehe Kapitel 6.3.1)
- **Strahlkenngrößen**  
zur Kennzeichnung der physikalischen bzw. energetischen

Eigenschaften des Strahls (siehe Kapitel 6.3.2)

- **Betriebskenngrößen**  
zur Kennzeichnung der Eigenschaften der Strahlbearbeitung, die sich aus geräte-, maschinen- bzw. betriebsspezifischen Bedingungen ergeben (siehe Kapitel 6.3.3)
- **Oberflächenkenngrößen**  
zur Kennzeichnung des Strahlergebnisses (siehe Kapitel 7)

## 6.3 Anforderungsgerechte Strahlprozessführung

### 6.3.1 Strahlgutkenngrößen

**Strahlgutgeometrie, Strahlgutzustand und Strahlguthärte** sowie das zu erzielende Strahlergebnis sind der Ausgangspunkt zur Festlegung der Prozesskenngrößen, die bei neu zu definierenden Prozessen häufig nur durch Strahlversuche ermittelt werden können.

Beispielsweise können ungünstige Geometrien wie etwa Boh-

rungen oder Hinterschneidungen die Zugänglichkeit für den Strahl erheblich behindern. Der Ausgangszustand der Oberfläche vor dem Strahlen beeinflusst das Strahlergebnis erheblich, wenn beispielsweise Schichten oder Verschmutzungen zu entfernen sind. Härtere Werkstücke bzw. Substrate erfordern in der Regel eine intensivere Strahlbehandlung als weniger harte Oberflächen.

Für eine anforderungsgerechte Strahlprozessführung müssen die identifizierten Prozesskenngrößen so eingestellt bzw. berücksichtigt werden, dass das gewünschte Strahlergebnis auch sicher und reproduzierbar erreicht wird. Dazu sind jeweils spezifische Aspekte zu berücksichtigen, die im Folgenden erläutert werden.

## 6.3.2 Strahlkenngrößen

Die Definition der Strahlkenngrößen geht auf die Überlegung zurück, dass die Wirkung der bewegten Körner allein durch ihre physikalischen Eigenschaften zum Zeitpunkt des Auftreffens auf die Oberfläche bestimmt wird. Strahlkenngrößen charakterisieren also den Strahl selbst und berücksichtigen nicht die besonderen Gegebenheiten der Strahlmaschine bzw. des Strahlgerätes.

### Strahlkenngrößen

- Strahlmittelart: Werkstoff und ggf. Herstellungsprozess
- Kornform: Kornform im Neukorn und im Betriebsgemisch
- Kornhärte: Kornhärte im Neukorn und im Betriebsgemisch
- Korngröße: Korngrößenverteilung im Neukorn und im Betriebsgemisch
- Auftreffgeschwindigkeit: Korngeschwindigkeit beim Auftreffen auf die Strahlgutoberfläche
- Auftreffwinkel: Winkel zwischen Kornflugbahn und Strahlgutoberfläche
- Beaufschlagung: Strahlmittelmenge pro Strahlgutoberfläche

Die **Strahlmittelart**, also Werkstoff und Herstellungsprozess, bestimmt entscheidend die Verrundungs- und Bruchcharakteristik im Betrieb und damit die Lebensdauer des Strahlmittels. Sehr spröde Werkstoffe wie Schlacken zerschlagen meist schon beim einmaligen Auftreffen und sind daher nur als Einwegstrahlmittel geeignet.

Bei den meisten Strahlmittelarten lassen sich runde und kantige **Kornformen** unterscheiden, wobei sich in einem Betriebsgemisch je nach Strahlmittelart auch Misch- und Übergangsformen wie kantenverrundete Körner bilden können.

Mit der Wahl der Strahlmittelart lässt sich die Kornform und Kornhärte des Betriebsgemisches und damit seine abrasive Wirkung gezielt beeinflussen. Mit harten und spröden Umlaufstrahlmitteln wie etwa Hartguss lässt sich ein dauerhaft kantiges und abrasives Betriebsgemisch erzielen. Mit harten, aber zähen Strahlmitteln wie etwa Stahldrahtkorn kann ein dauerhaft rundkörniges Betriebsgemisch mit stark umformender und verfestigender Strahlwirkung eingestellt werden. Gleichzeitig ist zu beachten, dass kantige und zugleich harte Körner einen hohen Verschleiß in der Strahlanlage zur Folge haben.

Für runde Strahlmittelsorten ist eine geringe Bruchrate und damit eine hohe Lebensdauer ein entscheidendes Qualitätskriterium für den Strahlprozess insbesondere auf empfindlichen Oberflächen, die durch gebrochene, scharfkantige Strahlmittelanteile verletzt oder gar zerstört werden können.

Die Strahlmittelart bestimmt darüber hinaus die Korndichte und zusammen mit der **Korngröße** die Kornmasse. Hierüber wird die Kornenergie, aber auch das Strömungsverhalten beeinflusst. Körner größerer Dichte lassen sich über einen größeren Strahlabstand nutzen.

Große Körner verfügen über eine höhere Energie als kleine Körner des gleichen Strahlmittel-

werkstoffs und übertragen damit auch mehr Energie zum Verformen, Verfestigen oder Abtragen auf die bestrahlte Oberfläche. Es ist allerdings zu beachten, dass die Kornenergie über die Formel  $W = 1/2mv^2$  zwar proportional mit der Kornmasse, allerdings in dritter Potenz mit der Korngröße zunimmt. Ein doppelt so großes Korn verfügt über das achtfache Volumen, damit auch über die achtfache Masse und Energie und verändert das Strahlergebnis entscheidend.

Für ein in vielen Fällen gewünschtes gleichmäßiges Strahlergebnis ist aber auch ein Betriebsgemisch mit einer bestimmten Korngrößenverteilung erforderlich. Diese Korngrößenverteilung kann nur über ein kontinuierliches oder zumindest in festen Abständen durchgeführtes Nachfüllen sowie eine ordnungsgemäße Wartung der Abscheidesysteme des Strahlmittelkreislaufs erhalten werden. Beides ist betrieblich zu organisieren und sicherzustellen.

Die **Auftreffgeschwindigkeit** hängt zunächst von der Austrittsgeschwindigkeit aus Strahldüse oder Schleuderrad, aber auch vom Strahlabstand und von der Strahlmittelart und -dichte ab. Die für den Strahlprozess entscheidende tatsächliche Geschwindigkeit beim Auftreffen auf die Oberfläche geht quadratisch in die Kornenergie ein, die für den Bearbeitungsprozess zur Verfügung steht. Bei komplizierten Werkstückkonturen gibt es häufiger Flächen, die nur indirekt von abprallenden Körnern getroffen und damit deutlich weniger intensiv gestrahlt werden. Hier muss dann häufig ein Überstrahlen direkt getroffener Flächen in Kauf genommen werden.

Der **Auftreffwinkel** beeinflusst entscheidend das Strahlergebnis im Hinblick auf die Aufteilung in umformende, verfestigende und abtragende Strahlwirkung. Diese Tatsache kann, soweit Strahlgutgeometrie und Strahlsystem

dies zulassen, für eine gezielte Beeinflussung genutzt werden. Hauptsächlich Auftreffwinkel und Kornform entscheiden zusammen mit der Art der Strahlgutoberfläche über die Art der Energieübertragung und die Strahlwirkung. Die Strahlgutoberfläche kann in diesem Fall auch aus einer zu entfernenden Verschmutzung oder Beschichtung bestehen.

Der Auftreffwinkel für eine optimale Energieübertragung des Rundkorns liegt bei 80–85°. Ein noch steileres Auftreffen von bis zu 90° erhöht zwar theoretisch den übertragenen Impuls, führt aber vor allem beim Druckluftstrahlen zu ungünstigen Strömungsbedingungen durch genau gegen die Strahlrichtung zurückprallende Körner. Eine möglichst abrasive Strahlwirkung kann mit kantigem Korn und einem Auftreffwinkel etwa zwischen 30 und 40° erzielt werden. Dabei überträgt das Korn einen noch ausreichenden Impuls und entfaltet gleichzeitig eine gute spanabhebende, schleifende bis schabende Wirkung. Mit zunehmender Kornhärte verstärken sich die Strahlwirkungen, wenn das Korn beim Aufprall nicht bricht. Die verschiedenen Strahlwirkungen zeigt die **Tabelle 7**.

Zum Zwecke des Trennens beim Druckflüssigkeitsstrahlen hingegen wird zur Erzielung einer stark abtragenden Wirkung ein möglichst steiler Strahlwinkel gewählt, wobei dem Druckwasser abrasive Medien zugesetzt werden können.

Die **Beaufschlagung** ist die Summe der auf die Oberfläche gestrahlten Anzahl bzw. Masse von Körnern. Die erforderliche Beaufschlagung zur Erzielung eines bestimmten Strahlergebnisses hängt sowohl von den Strahlgut- als auch von den Strahlkenngrößen ab. Beispielsweise hinterlassen schnellere Körner auf einer Stahloberfläche tiefere und damit größere Eindrücke als langsame Körner, sodass die erforderliche Beaufschlagung mit steigender Auf-

Strahlgutoberfläche	Rundes Korn Auftreffwinkel 75–90°	Kantiges Korn Auftreffwinkel 30–45°
Hart und spröde	Abtragung durch Aufbrechen der Oberfläche	Geringe Strahlwirkung
Hart und zäh	Verfestigung durch Einbringung von Versetzungen und Druckeigenstressungen	Abtragung durch Schleifen
Weich und zäh	Plastische Verformung durch tiefes Eindringen	Starke Abtragung durch Schaben

Tabelle 7: Strahlwirkungen in Abhängigkeit von Oberfläche, Kornform und Auftreffwinkel

treffgeschwindigkeit abnimmt. Aus diesem Grunde sollten allgemeine Angaben zur erforderlichen Beaufschlagung kritisch betrachtet und nicht ohne Angaben zu Strahlmittel und Korngeschwindigkeit zur Effizienzbewertung einer strahltechnischen Bearbeitung oder einer Strahlmaschine herangezogen werden.

In Bezug auf die Betriebskenngrößen ist unbedingt zu beachten, dass ungeeignete Bedingungen wie etwa ein ungünstiges Strahlbild oder verschlissene Strahlorgane die erforderliche Beaufschlagung erheblich erhöhen und damit die Energieeffizienz eines Strahlprozesses negativ beeinflussen können.

### 6.3.3 Betriebskenngrößen

Betriebskenngrößen kennzeichnen die Eigenschaften des Strahlprozesses, die von der eingesetzten Strahlmaschine bzw. dem Strahlgerät sowie deren Betrieb bestimmt werden. Diese Eigenschaften resultieren insbesondere aus dem jeweiligen Strahlsystem, der zugeführten Leistung sowie den geometrischen Verhältnissen einer Strahlmaschine bzw. einer manuell geführten Bearbeitung.

#### Betriebskenngrößen

- Strahlmitteldurchsatz: beschleunigte Strahlmittelmenge pro Zeiteinheit

- Strahldauer: Dauer der Bestrahlung des Strahlgutes bzw. einer Stelle des Strahlgutes
- Strahlleistung: Strahlgutmenge pro Zeiteinheit (z. B. in Stück/h, m<sup>2</sup>/min)
- Strahlabstand: Abstand zwischen Düse bzw. Schleuderrad und Strahlgutoberfläche
- Strahlbild: Strahlkornverteilung im Strahl in einer bestimmten Auftreffebene
- Strahlkonfiguration: Anordnung bzw. Bewegung des Strahlgutes im Strahl
- Strahlmittelaufbereitung: Strahlmittelbehandlung zur Bereitstellung des Betriebsgemisches
- Verschleißzustand: Zustand der Elemente zur Strahlmittelführung und -beschleunigung

Der **Strahlmitteldurchsatz** eines Strahlgerätes oder einer Strahlmaschine hängt außer von den geometrischen Gegebenheiten vor allem von der für die Strahlmittelbeschleunigung bereitgestellten Energie und der Austritts- bzw. Abwurfgeschwindigkeit ab. In Druckluftstrahlsystemen kann bei gleicher eingesetzter Luftleistung mit einer größeren Düse mehr Strahlmittel bei verringerter Austrittsgeschwindigkeit beschleunigt werden. In Schleuderradsystemen kann bei gleicher elektrischer Antriebsleistung durch Verringerung der Schleuderraddrehzahl eine Erhöhung des Strahlmitteldurchsatzes erzielt werden.

Die **Strahldauer** während eines Strahlprozesses hängt von den Anforderungen der Oberfläche bzw. des zu erzielenden Strahlergebnisses ab. Dieses kann etwa durch Angabe eines Reinheits- oder Rauheitsgrades oder durch Festlegung einer gewünschten Verfestigung bei einem mindestens geforderten Deckungsgrad definiert werden.

Die **Strahlleistung** bzw. Ausbringung einer Strahlanlage hängt zunächst von einem anforderungsgerecht ermittelten und eingestellten Strahlprozess sowie einer ordnungsgemäß gewarteten Strahlanlage ab.

Sind diese Voraussetzungen gegeben, muss die Strahlleistung über die eingesetzte Strahlenergie passend gewählt werden. In der Praxis geschieht dies bei Druckluftanlagen über die Variation von Luftdruck, Luftmenge, Düsendurchmesser und Düsen- bzw. Strahleranzahl. Bei Schleuderradanlagen können Antriebsleistung, Durchmesser, Drehzahl und Anzahl der Turbinen verändert werden.

Die Strahlleistung hängt zwar auch vom Strahlmittel ab, eine Veränderung des Strahlmittels zur Erhöhung der Strahlleistung kommt aber nur in Frage, wenn der Strahlprozess dadurch nicht negativ beeinflusst wird und der Maschinenverschleiß sich nicht unwirtschaftlich erhöht.

Der **Strahlabstand** ergibt sich durch die Anordnung zwischen Strahldüse bzw. Schleuderrad und der Werkstückoberfläche im konkreten Anwendungsfall. Hierbei müssen verschiedene Effekte beachtet werden.

Mit zunehmendem Abstand sinkt die Geschwindigkeit des einzelnen Korns und damit seine kinetische Energie durch den Luftwiderstand ab. Bei dem Schleuderradstrahl ist dieser Effekt stärker, da es keinen Trägerstrahl wie beim Druckluft- oder Druckwasserstrahlen gibt. Bei diesen Strahlsystemen können aber ein Luftstau oder eine Luftströmung ein zusätzliches Ab-

bremsen bzw. ein unerwünschtes Umleiten des Strahls bewirken. Daher gibt es insbesondere beim Druckluftstrahlen einen kleinen Bereich des optimalen Strahlabstands.

Mit zunehmendem Abstand steigt zusätzlich auch die Aufweitung des Strahls. Die Ausbreitung erfolgt beim Strahlen aus einer Düse kegelförmig mit geringer Aufweitung, beim Schleuderradstrahlen fächerförmig mit starker Aufweitung. Diese Strahlausbreitung bewirkt ein stark flächiges Strahlbild, wobei die Beaufschlagung stark absinkt. Aufgrund des bauartbedingt größeren Strahlmitteldurchsatzes wird dieser Effekt jedoch ausgeglichen. Im Allgemeinen eignet sich das Schleuderradstrahlen damit eher für großflächige Anwendungen.

Darüber hinaus muss beachtet werden, dass komplizierte oder große Werkstücke nicht ohne weiteres homogen gestrahlt werden können, da sich trotz Anordnung mehrerer Düsen oder Schleuderräder zum Teil stark unterschiedliche Strahlabstände ergeben können. In diesen Fällen müssen näher liegende Flächen überstrahlt werden, um weiter entfernt liegende vollständig zu bearbeiten.

Das **Strahlbild** normaler Runddüsen ist kreisrund, das von Schleuderrädern länglich. Das Strahlbild wird außerdem durch die Verteilung und Flugrichtung der Körner im Strahl beeinflusst. Die Lage des Strahlbildes muss so eingestellt werden, dass das Strahlmittel optimal auf die Strahlgutoberfläche gelenkt bzw. verteilt wird. Bei beiden Strahlsystemen sind die Auswirkungen des Verschleißes unbedingt zu beachten. Durch Aufweitung der Düse vergrößert sich das Strahlbild. Durch Auswaschen der strahlenkenden Leithülse des Schleuderrades verändert es seine Lage. Hieraus ergibt sich die dringende Notwendigkeit, den Verschleißzustand der Strahlorgane und das Strahlbild selbst in festen Abständen zu kontrollieren.

Die **Strahlkonfiguration** beschreibt die Anordnung des Strahlgutes im Verhältnis zum Strahl. In den meisten Fällen muss das Strahlgut im bzw. durch den Strahl bewegt werden, um eine allseitige bzw. homogene Strahlmittelbeaufschlagung zu erreichen. Alternativ dazu können die Strahlorgane, insbesondere Düsen, bewegt werden.

Besonderen Einfluss auf das Strahlergebnis haben auch die **Strahlmittelaufbereitung** (vgl. Kapitel 4.3 und 8.1) sowie der **Verschleißzustand** von Elementen zur Strahlmittelführung und -beschleunigung (vgl. Kapitel 8.2).

## 7 Eigenschaften und Prüfung gestrahlter Oberflächen

### 7.1 Bewertung durch Kenngrößen

Je nach Anwendung sind die durch das Strahlen zu erzielenden Oberflächen vollkommen unterschiedlich. Die in Kapitel 6.1 erläuterten grundsätzlichen Strahlwirkungen sind dabei entscheidend für Gestalt und Eigenschaften der fertig gestrahlten Oberfläche.

Die möglichst exakte Beschreibung des durch den Strahlprozess herzustellenden Werkstücks bzw. der herzustellenden Oberfläche ist Voraussetzung für die Festlegung des geeigneten Strahlverfahrens mit allen beteiligten Strahlparametern. Da eine solche Beschreibung durch die Komplexität der Strahlaufgabe häufig schwierig und im Vorhinein teilweise auch gar nicht möglich ist, werden vor der Applikation neuer Strahlprozesse in der Regel Strahlversuche durchgeführt. Diese dienen zur Herstellung eines Musters, anhand dessen dann die zu erzielenden Oberflächeneigenschaften festgelegt werden können. Handelt es sich um eine technisch bereits

validierte bzw. standardisierte Strahlanwendung wie etwa das Entzundern warmgewalzter Stahlbleche, so kann der Oberflächenzustand nach dem Strahlen auch ohne Strahlversuche durch normierte Oberflächenangaben verbindlich festgelegt werden.

### Oberflächenkenngrößen

- **Strahlgutabtrag:** Masseverlust des Strahlgutes durch den Strahlprozess
- **Strahlverlust:** unerwünschter Teil des Strahlgutabtrages
- **Äußere Erscheinung:** Farbe, Glanz, Rauheitsprofil, Haptik und Sauberkeit
- **Rauigkeit bzw. Rauheit:** visuelle und taktile Rauigkeit bzw. Rauheitsprofil
- **Reinheitsgrad bzw. physikalisch-chemische Reinheit:** Reinheit von Zunder und Rost bzw. Reinheit von Fremdpartikeln und -substanzen

- **Deckungsgrad:** Anteil der von Strahlmitteln getroffenen Strahlgutoberfläche in Prozent; Maß für die Homogenität einer Strahlgutoberfläche
- **Strahlintensität:** Maß für die Hämmerwirkung des Strahlmittels auf die Strahlgutoberfläche (Almen-Messverfahren)

## 7.2 Bewertungs- und Messverfahren

Bei der Erfassung und qualitätsmäßigen Bewertung strahltechnisch erzeugter Oberflächen werden nicht nur Messungen, sondern aus praktischen Gründen heraus häufig auch subjektive Bewertungsmethoden genutzt. Die **Tabelle 8** zeigt die wichtigsten Kenngrößen mit ihren Mess- oder Referenzgrößen sowie den zugehörigen Mess- bzw. Referenzmitteln.

Auch wenn die objektiven Messmethoden klare Bewertungskriterien zulassen, sind die subjektiven Vergleichsmethoden häufig besser geeignet, da eine vollständig messtechnische Beschreibung einer Oberfläche zum einen extrem aufwändig und teuer sein kann und zum anderen vor allem im täglichen Gebrauch oft nicht praktikabel ist. Die subjektiven Methoden erfordern allerdings eine gewisse strahltechnische Erfahrung und können leicht zu individuell unterschiedlichen Einschätzungen führen.

Wie bereits erwähnt lässt sich neben dem ggf. gewünschten **Strahlgutabtrag** auch ein unerwünschter **Strahlverlust** nicht gänzlich vermeiden. Dieser kann jedoch im Vorfeld einer Strahlanwendung in den meisten Fällen durch Versuche ermittelt und mittels einer ausreichend genauen Waage überwacht werden.

Kenngröße	Mess- bzw. Referenzgröße	Mess- bzw. Referenzmittel
Strahlgutabtrag, Strahlverlust	Werkstückgewicht vor und nach dem Strahlen	Waage
äußere Erscheinung (Farbe, Glanz, Rauheitsprofil, Haptik, Sauberkeit)	bildgebende Verfahren mit Farbabgleich, subjektive visuelle und taktile Beurteilung	gestrahltes Vergleichsmuster des Originalteils
Rauigkeit	subjektive visuelle und taktile Beurteilung (Fingernagel)	ISO-Rauheitsvergleichsmuster nach DIN EN ISO 8503-1 oder Rugotester
Rauheit	arithmetischer Mittenrauwert $R_a$ , gemittelte Rautiefe $R_z$ , maximale Rautiefe $R_{max}$ , Spitzenzahl $R_{pC}$	Rauheitsmessgerät (Tastschnittverfahren) nach DIN EN ISO 8503-4
Reinheitsgrad Zunder und Rost (für warmgewalzte Stahloberflächen)	subjektive Klassifikation nach ISO 8501-1	optische Vergleichsmuster nach ISO 8501-1 Supplement
physikalisch-chemische Reinheit	physikalische bzw. chemische Beurteilung	Messverfahren nach DIN EN ISO 8502, Teil 2 bis 12
Deckungsgrad	Anteil der gestrahlten Oberfläche zur gesamten Oberfläche	fotografische Vergleichsmuster; Auszählung unter Vergrößerung mit Lichtlupe oder Mikroskop; Kontrolle mit fluoreszierendem Markerspray und UV-Lampe nach SAE AMS 13165
Strahlintensität	Durchbiegung eines Prüfstreifens aus Federstahl	Almen-Messverfahren nach SAE J442/J443

Tabelle 8: Strahltechnische Oberflächenkenngrößen

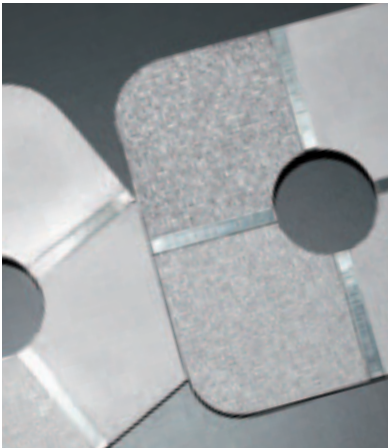


Abb. 25: Rauheitsvergleichsmuster nach DIN EN ISO 8503-1

Die **äußere Erscheinung** einer Oberfläche ist messtechnisch schwer zu erfassen. Mit Einschränkungen können bildgebende Verfahren mit Farbabgleich zum Vergleich von Ist- und Solloberflächen eingesetzt werden. Wird ein gestrahltes Originalteil als Referenzteil genutzt, so muss dieses eindeutig gekennzeichnet und langfristig aufbewahrt werden, um auch zu einem späteren Zeitpunkt einen Vergleich mit dem aktuellen Strahlergebnis zu ermöglichen. Hierbei sind möglicherweise durch die Lagerung bedingte Korrosionserscheinungen zu berücksichtigen.

Zur einfachen visuellen und taktilen Überprüfung der **Rauigkeit** anhand von Mustern können sogenannte Rugotester oder aber die genormten ISO-Rauheitsvergleichsmuster für rundes und kantiges Strahlmittel verwendet werden, siehe **Abb. 25**. Diese bestehen aus je einer quadratischen Stahlplatte mit 85–88 mm Kantenlänge und vier Musterflächen unterschiedlicher Rauigkeiten.

Zur Ermittlung der genauen **Rauheit** bzw. des Rauheitsprofils mit den in der Tabelle 8 genannten Rauheitsmessgrößen wird in der Regel ein sogenanntes Tastschnittgerät verwendet, siehe **Abb. 26**.

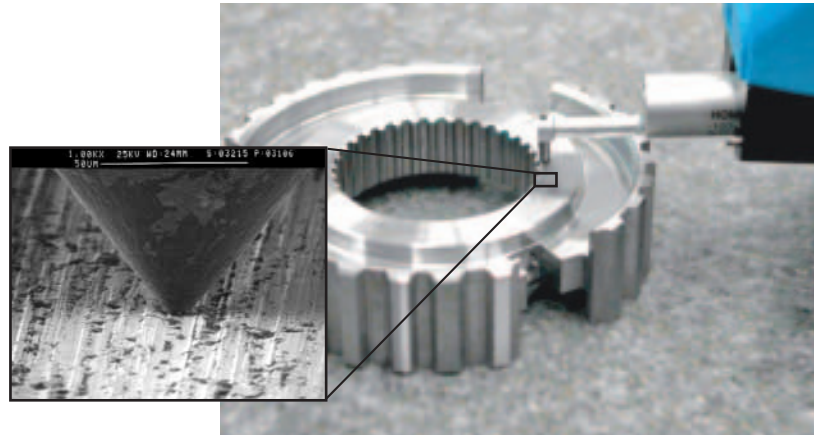


Abb. 26: Rauheitsmessung mit Tastschnittgerät und Diamantspitze

Aufwändigere optische und bildgebende Verfahren erlauben etwa mittels eines Konfokalmikroskops deutlich erweiterte Oberflächenanalysen, siehe **Abb. 27**.

Zur Feststellung des **Reinheitsgrades** in Bezug auf **Zunder und Rost** von Stahloberflächen nach dem Strahlen gibt der Anhang zur Norm DIN EN ISO 8501-1 fotografische Vergleichsmuster vor. Der Endzustand wird entsprechend der Strahlintensität in vier Kategorien eingeteilt, die mit dem Kürzel „Sa“ für die Oberflächenvorbereitung „Strahlen“ und der entsprechenden Klassifizierung gekennzeichnet werden:

- Sa 1: Leichtes Strahlen
- Sa 2: Gründliches Strahlen
- Sa 2<sup>1/2</sup>: Sehr gründliches Strahlen

- Sa 3: Strahlen, bis auf dem Stahl visuell keine Verunreinigungen mehr zu erkennen sind

Aufgrund der unterschiedlichen Ausgangszustände bzw. Rostgrade vor dem Strahlen stellt die Norm für den Rostgrad A zwei und für die Rostgrade B bis D vier fotografische Vergleichsmuster zur Bestimmung des Reinheitsgrades zur Verfügung. Weitere Informationen zu den Rostgraden sind dem Kapitel 2.3 zu entnehmen.

Zur Beurteilung der **physikalisch-chemischen Reinheit** werden verschiedene Verfahren eingesetzt, die in der DIN EN ISO 8502 zusammengefasst sind (siehe Kapitel 11). Als Beispiele hierfür sind die Prüfung auf Staub nach dem Klebebandverfahren (Teil 2)

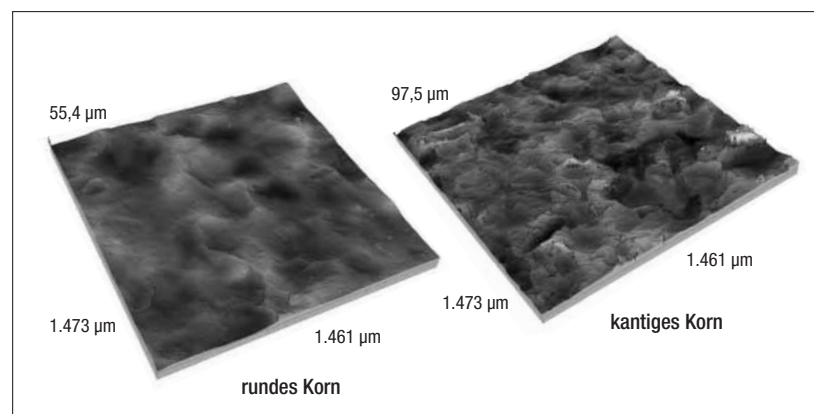


Abb. 27: Rauheitsbestimmung gestrahlter Oberflächen mit dem Konfokalmikroskop

oder die Prüfung auf wasserlösliche Salze (Teil 9) zu nennen.

Der **Deckungsgrad** kann messtechnisch zuverlässig nicht exakt bestimmt werden, sondern erfolgt durch Auszählen von gestrahlten und ungestrahlten Oberflächenanteilen. Diese lassen sich in der optischen Vergrößerung mit Lichtlupe oder Mikroskop nachweisen. In einfachen Fällen genügen ggf. auch fotografische Vergleichsmuster, siehe **Abb. 28**. Eine deutliche Vereinfachung der Deckungsgradkontrolle stellt die Einfärbung der ungestrahlten Oberfläche mit fluoreszierender Markerfarbe und Betrachtung mit einer UV-Lampe nach dem Strahlen nach SAE AMS 13165 und gemäß **Abb. 29** dar.

Die **Strahlintensität** lässt sich messtechnisch nicht ohne weiteres erfassen, da die physikalischen Wirkungen des Strahlprozesses sehr komplex sind und die Bearbeitung unter extrem aggressiven Bedingungen stattfindet. Daher hat sich an Stelle direkter Messverfahren eine indirekte Messung nach dem sogenannten Almen-Messverfahren etabliert.

Für die Bestimmung der Intensität beim Kugelstrahlen kommt das Almen-Messverfahren nach SAE J442/J443 und **Abb. 30** zum Einsatz. Hierbei wird ein genormtes Prüfblech aus Federstahl auf einen ebenfalls genormten Prüfblock geklemmt und für eine bestimmte Zeit dem Strahl ausgesetzt. Zur Nachbildung einer Werkstückkontur können auch mehrere Prüfblöcke gleichzeitig an einem Halter oder am Werkstück selbst befestigt werden.

Nach Ende des Strahlprozesses wird die Durchbiegung der gestrahlten Prüfstreifen gemessen. Eine Sättigung ist erreicht, wenn bei Verdoppelung der Strahlzeit die Durchbiegung nicht mehr als 10% zunimmt. Die an diesem Punkt auftretende Durchbiegung ist das Maß für die Intensität, wobei zwischen den beteiligten Strahlkenngrößen und der so bestimm-

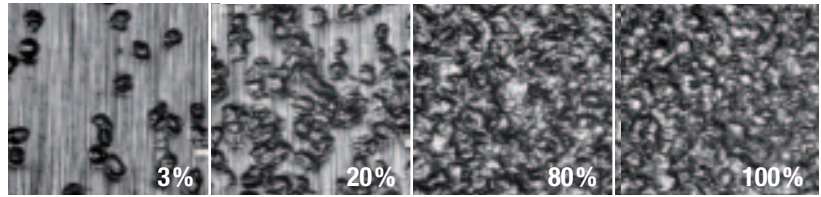


Abb. 28: Fotografische Vergleichsmuster zur Beurteilung des Deckungsgrades

Abb. 29:  
Deckungsgrad-  
kontrolle an  
Ventilfedern



ten Strahlintensität zwar Zusammenhänge, aber nur eingeschränkt mathematisch beschreibbare Abhängigkeiten bestehen.

Aus diesem Grunde reicht es zur Definition eines Strahlergebnisses keinesfalls aus, nur die Strahlintensität anzugeben. Vielmehr

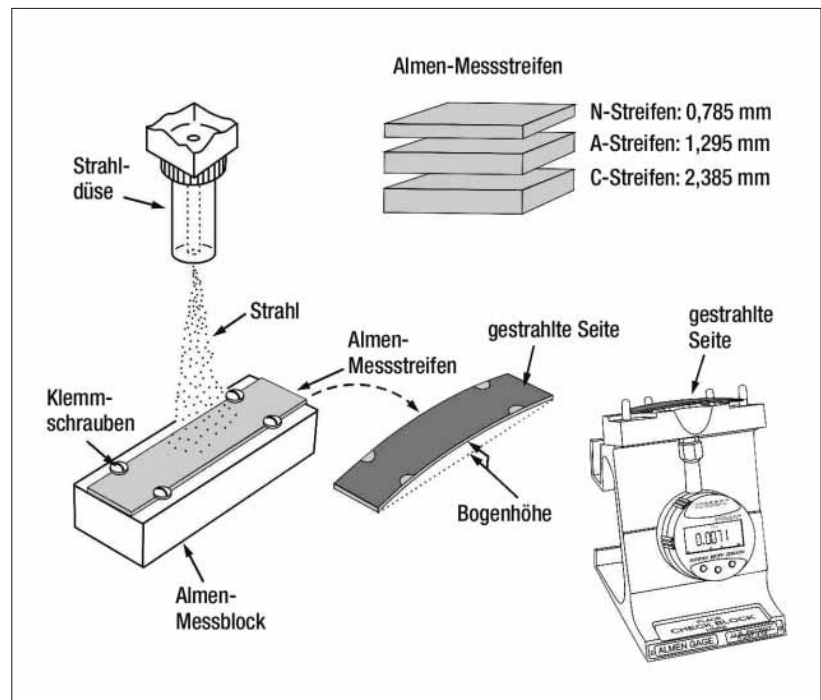


Abb. 30: Messung der Strahlintensität beim Kugelstrahlen

ist insbesondere das verwendete Strahlmittel eindeutig zu spezifizieren.

Das Almen-Messverfahren wird vor allem auch eingesetzt, um über die Messung der Strahlintensität die Einhaltung von in der Vorserienphase eingestellten Maschinenparametern dauerhaft zu überwachen.

## 7.3 Oberflächengestalt und -funktion

### 7.3.1 Einfluss auf Beschichtungen

Die heutigen Qualitätsansprüche an Beschichtungen und auch die aus Gründen des Umweltschutzes zurückgedrängte Verwendung von Lacken auf Lösemittelbasis führen zu erhöhten Anforderungen an die Oberflächenvorbehandlung. Zu diesem Zwecke kommen grundsätzlich auch chemische Verfahren in Frage, diese sind häufig jedoch verfahrenstechnisch aufwändig und erfordern besondere Maßnahmen zum Umwelt- und Gewässerschutz. Die strahltechnische Vorbehandlung einer Oberfläche erfolgt zum Zwecke der Reinigung und Aufräufung.

#### Reinheitsgrad/physikalisch-chemische Reinheit

Der Reinheitsgrad nach DIN EN ISO 8501-1 beschreibt die Reinheit von Zunder und Rost warmgewalzter Stahlerzeugnisse. Eine beschichtungsfähige Stahloberfläche erfordert im Allgemeinen mindestens den Reinheitsgrad Sa 2<sup>1/2</sup>, besser Sa 3. Bei geringeren Reinheitsgraden müssen ggf. sogenannte untergrundtolerante Beschichtungsstoffe verwendet werden.

Die Reinigung einer Oberfläche von Fremdpartikeln ist im Bereich des Korrosionsschutzes von besonderer Bedeutung, da Reststoffe auf der Oberfläche die Haftung und Korrosionsbeständigkeit einer nachfolgenden Beschichtung erheblich beeinflus-

sen können. Diese können sein:

- Öle, Fette und Wachse
- lösliche Salze wie Chloride und Sulfate
- Staub
- Feuchte

Insbesondere die beiden ersten Stoffgruppen sind problematisch, da sie visuell oftmals nicht zu erkennen und schwer zu beseitigen sind. Für eine effektive Reinigung kommen hier nur Nassstrahlverfahren in Frage, die den eigentlichen Strahlprozess mit einem Waschprozess verbinden.

Der Aufwand für die strahltechnische Reinigung der Oberflächen kann durch einfache Maßnahmen erheblich reduziert werden, wenn diese organisatorisch umsetzbar sind:

- trockene, zumindest überdachte Lagerung von Stahlblechen und -profilen
- bei längerer Lagerung frühzeitiges Strahlen und Konservierung durch einfache Beschichtung (Shop-Primer)
- Vermeidung von Beölung und Befettung vor dem Strahl- und Beschichtungsprozess; insbesondere auch weitgehende Vermeidung des Eintrags dieser Stoffe in die Strahlanlage

#### Rauigkeit, Rauheitsprofil und Spitzenzahl

Eine höhere Rauigkeit erlaubt im Allgemeinen eine bessere Haftung von Beschichtungsstoffen durch die Vergrößerung der Oberfläche sowie den durch das Verkrallen verbesserten Formschluss zwischen Oberfläche und Beschichtungswerkstoff. Für optimale Bedingungen sind allerdings nicht nur die Rauheitskenngrößen arithmetischer Mittenrauwert  $R_a$ , gemittelte Rautiefe  $R_z$  und maximale Rautiefe  $R_{max}$  entscheidend, sondern vor allem auch die Spitzenzahl  $R_{p_c}$  innerhalb einer Messstrecke sowie die Form der Spitzen.

Große Rautiefen und scharfe Spitzen sind insbesondere für dickschichtige Lackierungen vor-

teilhaft. In diesen Fällen werden bevorzugt kantige Strahlmittel in Druckluftstrahlanlagen eingesetzt. Für dünnsschichtige Lacksysteme hingegen ist eher eine große Spitzenzahl bei abgerundetem Rauheitsprofil und geringeren Rautiefen geeignet, da die Schutzwirkung der Beschichtung entscheidend auch von der ausreichenden Bedeckung der Rauheitsspitzen abhängt. Hierbei kommen bevorzugt Schleuderradstrahlsysteme mit runden oder aber weicheeren kantigen Strahlmittelsorten zum Einsatz.

### 7.3.2 Einfluss auf Verfestigung und Druckeigenspannungen

#### Deckungsgrad

Zur homogenen und effektiven Verfestigung dynamisch beanspruchter Bauteile und Einbringung von Druckeigenspannungen beim Kugelstrahlen ist ein hoher Deckungsgrad erforderlich. Dieser wird vereinfachend oft auch nur als „Überdeckung“ bezeichnet. Zur Herstellung einer homogenen Oberfläche sollte die Überdeckung annähernd 100% betragen, da ungestrahlte Oberflächensegmente unter späterer Belastung Ausgangspunkt für eine unerwünschte Rissausbreitung sein können. In der Praxis wird bei einem Deckungsgrad von mehr als 98% von einer vollständigen Überdeckung ausgegangen.

In anspruchsvollen Anwendungen wird ein Überstrahlen mit Überdeckungen von mehr als 100% gefordert. Solche nur theoretischen Deckungsgrade bezeichnen das jeweilige Vielfache der Strahleinwirkdauer zur Erreichung einer Überdeckung von 100%.

#### Strahlintensität

Die Strahlintensität beeinflusst die Druckeigenspannungen in bestimmten Grenzen. Eine höhere Strahlenergie durch härtere oder

Funktionsgruppe	Druckstrahlanlage	Schleuderrad-strahlanlage
Strahlsystem	Druckstrahlkessel mit Strahldüse	Schleuderrad
Strahlmitteldosierung	Mischventil	Muschelschieber
	Elektromagnetische Dosierung (MagnaValve)	Elektromagnetische Dosierung (MagnaValve)
Strahlmittelführung	Rohrleitung und/oder Druckstrahlschlauch	Rohrleitung und/oder Strahlmittelschlauch
Strahlraum	Strahlkabine	Strahlkabine
	Freistrahlsraum/-halle	–
Primärer Verschleißschutz (direkter Strahl)	Strahlkabinenauskleidung aus verschleißfestem Manganstahl oder gehärtetem Stahl	Strahlkabinenauskleidung aus verschleißfestem Manganstahl oder gehärtetem Stahl
Sekundärer Verschleißschutz (indirekter Strahl)	Strahlkabinenauskleidung aus Gummimatten	Strahlkabine aus verschleißfestem Manganstahl
	Wandverkleidung aus Gummimatten oder starken Kunststoffplanen	Strahlkabinenauskleidung aus Gummimatten
Strahlmittelsammlung und Horizontalförderung	Trichter mit Förderschnecke	Trichter mit Förderschnecke
	Trichter mit Kratzförderer	Trichter mit Förderband
	Trichter mit pneumatischer Förderung	Trichter mit Vibroförderer
Schrägförderung	Schrägförderschnecke	Schrägförderschnecke
Vertikalförderung	Becherwerk	Becherwerk
Strahlmittel-aufbereitung Grobabscheidung	Sieb, Lochblech, Gitter	Sieb, Lochblech, Gitter
	Rüttelsieb	Rüttelsieb
	Vibroförderer mit Siebstrecke	Vibroförderer mit Siebstrecke
Strahlmittel-aufbereitung: Feinabscheidung	Windsichter	Windsichter
	Taumelsieb	Taumelsieb im Bypass
	Zyklon	–
Strahlmittelaufbereitung: Sandabscheidung	Magnetsichter	Magnetsichter
Strahlmittelaufbereitung: Abscheidung von Bruchkorn	Spiralseparator (Trieur), Schrägband	–
Strahlmittelvorrhaltung	Strahlmittelsilo oberhalb Druckkessel	Strahlmittelsilo oberhalb Turbinen
Absaugung	Patronenfilteranlage	Patronenfilteranlage
	Nassfilteranlage	Nassfilteranlage

Tabelle 9: Funktionsgruppen und übliche Ausführungsformen bei Strahlmaschinen

schwerere Körner oder durch erhöhte Auftreffgeschwindigkeit kann den Betrag sowie die Tiefenlage des Druckeigenspannungsmaximums in der Randschicht erhöhen.

## Rauheit

Der gegenläufige Effekt liegt allerdings in der mit zunehmender Intensität ebenfalls zunehmenden Rauheit und der damit verbundenen Kerbwirkung. Diese kann durch die auf der Oberfläche entstehenden lokalen Spannungsspitzen die Dauerfestigkeit letztlich auch verringern. Glattere Oberflächen neigen im Vergleich dazu weniger zur Rissbildung. Durch ein zweistufiges Strahlen mit Kugeln grober und feiner Körnung bzw. hoher und niedriger Intensität versucht man, die Vorteile beider Ansätze zu kombinieren.

## 8 Strahlanlagentechnik und -betrieb

### 8.1 Anlagenbaugruppen

Der Aufbau einer Strahlanlage hängt zum einen von dem verwendeten Strahlssystem und zum anderen von dem eingesetzten Strahlmittel ab.

Obwohl eine vollständige Betrachtung aller daraus folgenden Bauarten an dieser Stelle nicht möglich ist, können für typische Druckluft- und Schleuderradstrahlanlagen mit Strahlmittelkreislaufsystem übliche Funktionsbaugruppen und deren wichtigste Ausführungsformen anhand der **Tabelle 9** im Überblick dargestellt werden (vgl. auch Abb. 10 a, 11 a und 19).

Die verschiedenen Ausführungsformen haben anwendungs- und prozessspezifische Vor- und Nachteile und beeinflussen den Anschaffungspreis einer Strahlanlage zum Teil erheblich. Darüber hinaus liegen Ursachen für nicht einwandfrei arbeitende Förder-

systeme, Abscheider und Absaugungssysteme in der Regel in technischen Details. Eine sorgfältige technische Prüfung dieser Einrichtungen vor einer Anlagenbeschaffung ist daher empfehlenswert.

### 8.2 Anlagenbetrieb und -instandhaltung

Strahlanlagen sind aufgrund ihres Einsatzzwecks und der meist abrasiven Medien erheblichem Verschleiß unterworfen. Letztlich ist die Konstruktion einer Strahlmaschine mitentscheidend für die anfallenden Betriebskosten. Dieser Tatsache muss bei der Beschaffung besondere Beachtung geschenkt werden. Insbesondere sollten alle Anlagenteile, die dem Angriff von Strahlmittel ausgesetzt sind, so gestaltet und ausgeführt werden, dass Verschleiß vermindert und wenn möglich sogar vermieden wird. Möglichkeiten der Verschleißvermeidung sind beispielsweise:

- fließgerechte Strahlmittelzuführung (Vermeidung von Stauungen und starken Umlenkungen)
- strömungsgerechte Strahlmittelzuführung in Druckstrahlssystemen (ausreichende Querschnitte, geringe Umlenkungen)
- strömungsgerechte Strahlmittelführung in Strahldüsen und Schleuderrädern (prallarme Strahlmittelbeschleunigung)
- Bildung von Strahlmittelpolstern zur Vermeidung des direkten Aufpralls bewegter Körner auf Anlagenteile (Strahlmittelwannen zum Abbau der Strahlenergie, Umlenkung des Strahlmittelflusses durch Überläufe oder Sackrohre)
- Verhinderung des Eindringens von Strahlmittel in Lagerungen (Labyrinth, Strahlmittelabflüsse)

Bei unvermeidbarem Verschleiß sollten die betroffenen Teile bei vertretbaren Kosten verschleißfest ausgeführt werden:

- Einsatz von keramischen Materialien wie Silicium- oder Borcarbid in der Strahldüse
- Einsatz von Werkzeugstahl oder Hartmetallkomponenten im Schleuderrad
- Einsatz verschleißfester Materialien für alle strahlmittelführenden Teile der Strahlanlage

Schließlich müssen alle Teile, die einem starken Verschleiß und damit einem häufigen Austausch unterliegen, leicht zu wechseln sein. Zur Wartungsfreundlichkeit gehören u.a.:

- Ermöglichung von Sichtprüfungen ohne Werkzeug
- Anzeige von Verschleißzuständen über die Anlagensteuerung
- gute Zugänglichkeit zu allen Wartungsstellen
- leichter Aus- und Einbau von Verschleißteilen, insbesondere im Bereich von Düsen und Schleuderrädern
- gute Zugänglichkeit der Strahlkabine
- leichter Ein- und Ausbau von Verschleißauskleidungen

Die Wartungsfreundlichkeit einer Strahlanlage hat indirekt auch Einfluss auf deren Instandhaltungszustand, da wartungsfreundliche Anlagen erfahrungsgemäß besser gepflegt werden. Gut gewartete Strahlanlagen gewährleisten einen wirtschaftlichen Anlagenbetrieb bei gleich bleibender Strahlqualität.

## 9 Arbeitssicherheit und Umweltschutz

### 9.1 Arbeitsschutz beim Strahlen

Bereits seit 1976 ist das gewerbliche Strahlen mit Quarzsand gesetzlich nur noch für Bauwerke aus Sandstein oder Beton erlaubt, die selbst aus hochquarzhaltigen Materialien bestehen. Bis dahin stellte die Gefahr der Silikose

Schrift	Titel	Geltungsbereich
BGR 500	Betreiben von Arbeitsmitteln	–
Kapitel 2.24 (ehemals VBG 48)	Arbeiten mit Strahlgeräten (Strahlarbeiten)	Strahlen von Oberflächen bei Verwendung körniger Strahlmittel, die durch Druckluft oder mechanisch beschleunigt werden
Kapitel 2.26 (ehemals VBG 15)	Schweißen, Schneiden und verwandte Verfahren	Flammstrahlen
Kapitel 2.33 (ehemals VBG 61)	Betreiben von Anlagen für den Umgang mit Gasen	Bereiche im Freien oder in Räumen, in denen mit Gasen umgegangen wird, hier: Kaltgasstrahlen mit Stickstoff
Kapitel 2.36 (ehemals VBG 87)	Arbeiten mit Flüssigkeitsstrahlern	Betriebsüberdruck 25 bar und mehr oder Betriebstemperatur von mehr als 50 °C, hier: Heißwasserstrahlen, Dampfstrahlen, Druckflüssigkeitsstrahlen
BGI 5047	Mineralischer Staub	Strahlen mit silikogenen Strahlmitteln, z. B. Quarzsand
DIN EN 1248	Gießereimaschinen – Sicherheitsanforderungen für Strahlanlagen	Vom Hersteller von Strahlanlagen zu beachtende Anforderungen für die vorhersehbaren signifikanten Gefährdungen aufgrund Konstruktion, Errichtung und Einbau bei Inbetriebnahme, Betrieb, Wartung und Außerbetriebnahme von Druckluft- und Schleuderradstrahlanlagen

Tabelle 10: Arbeitsschutzrechtliche Vorschriften (Stand: Januar 2009)

(Staublunge) ein wesentliches Problem des Arbeitsschutzes dar. Diese entsteht durch längerfristiges Einatmen von Stäuben freier Kieselsäure SiO<sub>2</sub>, die bei Strahlarbeiten mit dem bis dahin verwendeten Quarzsand freigesetzt wurden.

Die das Strahlen und seine Auswirkungen betreffenden Unfallverhütungsvorschriften (UVV) in Form der ehemaligen VBG (Vorschriften der Berufsgenossenschaften) wurden zurückgezogen und in die Berufsgenossenschaftliche Regel BGR 500 (Betreiben von Arbeitsmitteln) und die Berufsgenossenschaftliche Information BGI 5047 (Mineralischer Staub) integriert. Die hieraus erwachsenden zusätzlichen Auflagen für das Strahlen mit Quarzsand und die Entwicklung von nicht silikogenen Ersatzstrahlmitteln mit ähnlichen Eigenschaften haben den Einsatz dieses Strahlmittels praktisch beendet. Beim Putzstrahlen von Gussteilen allerdings gelangen zusammen mit den zu reinigenden Werkstücken auch beachtliche Mengen Formsand in den Kreislauf von Strahlanlagen. Insbesondere in diesen Anwendungsfällen

ist auf eine geringe Staubemission der Strahlanlage und eine funktionierende Absaugung zu achten. Bei Wartungs-, Reparatur- und Reinigungsarbeiten sind ggf. Schutzmaßnahmen und -ausrüstungen gemäß BGI 5047 vorzusehen. Darüber hinaus gilt für diese Anwendungen die DIN EN 1248 (Gießereimaschinen – Sicherheitsanforderungen für Strahlanlagen).

Den derzeitigen Stand der arbeitsschutzrechtlichen Vorschriften zeigt die **Tabelle 10**. Ggf. sind weitere gesetzliche Vorschriften, die UVV, BGR und spezielle Richtlinien zu berücksichtigen.

### 9.1.1 Arbeitssicherheit beim Freistrahlen

Die folgenden Vorschriften sind Auszüge aus der BGR 500, Kapitel 2.24. Die vollumfängliche Beachtung der Richtlinie ist unbedingt zu gewährleisten.

#### Persönliche Schutzausrüstung (PSA)

- Für das allgemeine Freistrahlen
  - a) Atemschutzgeräte
  - b) Schutzhandschuhe
  - c) Schutzschuhe
  - d) Augenschutz beim Aufenthalt in der Nähe von Strahlmaschinen und -anlagen

- b) Schulter und Körper bedeckende Prallschutzkleidung
- c) Schutzhandschuhe
- d) Schutzschuhe

- Für das Freistrahlen, wenn mindergiftige (gesundheitsschädliche), giftige, sehr giftige, krebs erzeugende, fruchtschädigende oder erbgutverändernde Stoffe freigesetzt werden können

- a) glatte und reißfeste einteilige Schutzanzüge (Kombinationsanzüge) in Verbindung mit Atemschutzgeräten für Strahlarbeiten
- b) Schutzhandschuhe
- c) Schutzschuhe
- d) Augenschutz beim Aufenthalt in der Nähe von Strahlmaschinen und -anlagen

- Für das Reinigen von Strahlräumen und Beseitigen von Strahlschutt

- a) Atemschutz
- b) Schutzkleidung

#### Schnellabschaltvorrichtungen (Totmannschaltung)

Schnellabschaltvorrichtungen für handbetätigte Strahldüsen sind Einrichtungen mit selbsttätiger Rückstellung, die das unmittelbare

Unterbrechen des Strahlvorgangs bewirken sollen. Dadurch muss sichergestellt werden, dass nach Loslassen des Dosierhebels kein Druckstrahl austreten kann.

## Notfallmaßnahmen

Durch organisatorische und technische Maßnahmen ist sicherzustellen, dass im Gefahr-falle ein Eingriff von außen ermöglicht wird. Hierzu gehören z.B. Not-signal-Anlagen, Sprechfunk oder Not-Befehlseinrichtungen (Not-Aus) in geschlossenen Strahl-räumen. Weiterhin ist dafür Sorge zu tragen, dass die genannten Ein-richtungen nicht unwirksam ge-macht werden.

## 9.1.2 Gefahren durch Staub

Jedes Strahlen mit festen Strahl-mitteln lässt Staub entstehen. Dies hat folgende Ursachen:

- Staubgehalt des Strahlmittels im Anlieferungszustand
- Abrieb durch Schleifen von Strahlmittelkörnern untereinander sowie an Wandungen und Fördereinrichtungen der Strahl-anlage
- Abtragen von Strahlgutbestand-teilen
- Zerschlagen von Körnern im Strahlbetrieb

Die Menge des Staubes ist je nach Strahlmittelart, Strahlgut und Anlagenparametern unterschiedlich stark. Wie schon erwähnt, sollte das zu strahlende Gut nach Möglichkeit in einer staubdicht geschlossenen Anlage mit auto-matischer Strahlmittelreinigung und Staubabsaugung bearbeitet werden. Sollte dies nicht möglich sein, sollte unter Beachtung der dargestellten Maßnahmen zur Ar-beitssicherheit bevorzugt in Strahl-räumen gestrahlt werden, in denen die Luft erst nach wirkungsvoller Staubabscheidung ins Freie gelan-gen kann.

Ist eine Verbringung des Strahl-guts wie bei größeren oder orts-

unveränderlichen Bauteilen oder Gebäuden nicht möglich, kann ggf. auf das staubfreie Saugkopf-strahlen oder verschiedene Nass-strahlverfahren zurückgegriffen werden. Bei Trockenstrahlarbeiten im Freien ist auf die genannten Vorschriften zum Arbeitsschutz zu achten und eine Trennung des Strahlbereiches von der Umwelt vorzusehen (s. u.).

In Bezug auf die Arbeitssicher-heit beim Strahlen ist beim Betrieb aller Strahleinrichtungen auf die Einhaltung der maximalen Arbeits-platzkonzentrationen (MAK) von Feinstaub zu achten. Seit dem 1. Januar 2005 besteht mit dem Inkrafttreten der neuen Gefahr-stoffverordnung (GefStoffV) auch ein neues Grenzwert-Konzept mit den gesundheitsbasierten Grenzwerten Arbeitsplatzgrenzwert (AGW) und Biologischer Grenz-wert (BGW). Die alten MAK-Werte können und sollen jedoch bis zur vollständigen Umsetzung der neuen Grenzwerte als Richt- und Orientierungsgrößen weiter ver-wendet werden. Detaillierte Infor-mationen sind den Technischen Regeln für Gefahrstoffe (TRGS), insbesondere der TRGS 900 (Ar-beitsplatzgrenzwerte, Stand 2006-01) sowie der TRGS 500 (Schutz-maßnahmen: Mindeststandards, Stand 1998-03), zu entnehmen.

## 9.1.3 Gefahren durch Lärm

Für Lärmemissionen und den Lärmschutz im Betrieb gelten keine speziellen auf das Strahlen bezo-genen Bestimmungen. Die Lärm-quellen liegen beim Druckluft-strahlen in der Druckluftversor-gung über Kompressoren und dem Austrittsgeräusch an der Strahl-düse, beim Schleuderradstrahlen hingegen besonders im Laufge-räusch der Turbinen und im Auf-treffgeräusch des Strahlmittels beim Aufprall auf das Strahlgut und die Innenwände der Strahl- kabine. Die hierbei auftretenden Schallemissionen sind messtech-

nisch zu ermitteln und ggf. durch schalldämmende Maßnahmen zu mindern. Bei Überschreitung der zulässigen Schalldruckpegel ist das Tragen von Gehörschutz verbind-lich vorgeschrieben. Nähere Be-stimmungen dazu enthält die Be-rufsgenossenschaftliche Vorschrift BGV B3 (Lärm, Stand 2006-11-01).

## 9.1.4 Brand- und Explosionsschutz

Gemäß der BGR 500, Kapitel 2.24 ist ein wechselweises oder gleichzeitiges Strahlen von Leicht-metallen und eisenhaltigen Teilen in einem Strahlraum nur zulässig, wenn keine Zündquellen vorhan-den sind oder Schutzmaßnahmen gegen das Entzünden von ab-gelagertem oder aufgewirbeltem Staub getroffen sind.

Staub in einer Mischung aus Leichtmetall- und Rostpartikeln birgt aufgrund möglicher alumi-nothermischer Reaktion ein er-höhtes Entzündungsrisiko. Aber auch unvermischte oxidierbare Stäube aus Leichtmetall- und Eisen-partikeln sind brennbar. Mögliche Zündquellen sind vor allem offene Flammen, Zigarettenglut, heiße Oberflächen, aber auch die Fun-kenbildung beim Strahlen.

Der Grad der jeweiligen Feuer- und Explosionsgefahr ist festge-legt durch die Einteilung in feuer- und explosionsgefährdete Berei-che. Diesbezüglich gelten die Maß-gaben der BGR 104 (Explosions-schutz-Regeln, Stand 2005-03), die für einen Bereich, in dem sich bei Normalbetrieb gelegentlich eine gefährliche explosionsfähige Atmosphäre bildet, die Zone 21 vorsieht. Ein solcher teilweise ex-plusionsgefährdeter Bereich kann für das Innere von Trockenfilter-anlagen angenommen werden. Hierfür muss das Auftreten von Zündquellen ausgeschlossen wer-den. Dies muss durch hersteller-seitige Maßnahmen und bestim-mungsgemäße Verwendung der Filteranlage gewährleistet werden.

Insbesondere müssen die zur Entstaubung von Strahlanlagen eingesetzten Filteranlagen der als ATEX-Produkt-Richtlinie (Atmosphères Explosibles) bekannten europäischen Richtlinie 94/9/EG für „Geräte und Schutzsysteme zur bestimmungsgemäßen Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen“ vom 23. März 1994 entsprechen.

## 9.2 Umweltschutz beim Strahlen

Für den Umweltschutz beim Strahlen ist eine Vielzahl von Gesetzen, Verordnungen und Richtlinien des Umweltrechts relevant, die an dieser Stelle nur sehr eingeschränkt angesprochen werden können. Durch den ordnungsgemäßen Betrieb geschlossener Strahlanlagen bzw. Strahlräume sind durch die Maßnahmen zum Arbeitsschutz in der Regel auch die Auflagen des Umweltrechts erfüllt. In ihren Auswirkungen auf die Umwelt besonders zu berücksichtigen sind jedoch Strahlarbeiten an Bauteilen und Bauwerken, die sich aufgrund ihrer Lage, Funktion und Größe nicht in einen Strahlraum verbringen lassen.

### 9.2.1 Trennung des Strahlbereiches von der Umwelt

Bei der Sanierung von Stahlbauten wie etwa Brücken lässt sich das Trockenstrahlen zur Entschichtung, Entrostung, Reinigung und Vorbehandlung der Oberflächen kaum wirtschaftlich ersetzen, da das Saugkopfstrahlen nicht leistungsfähig genug ist und Nassstrahlverfahren durch erforderliche Nachbehandlung sowie Abwassersammlung und -aufbereitung an Bauwerken nur mit sehr viel technischem Aufwand anzuwenden sind. Hierdurch entstehen emissionstechnische Probleme durch Stäube, die zudem mit ab-

gestrahlten Beschichtungsstoffen beladen sind und nicht freigesetzt werden dürfen. Gleiches gilt für silikogene Stäube bei Strahlarbeiten an Beton- und Sandsteinflächen. Daher ist der Strahlbereich durch Einhausungen oder Abplanungen des jeweiligen Strahlgutes vor Ort abzutrennen.

In Ergänzung der DIN EN ISO 12944 (Beschichtungsstoffe – Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme) hat das Bundesverkehrsministerium die Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Korrosionsschutz von Stahlbauten (ZTV-KOR-Stahlbauten) herausgegeben. Diese gelten ursprünglich für den Fernstraßenbau, lassen sich aber nicht nur auf Brücken, sondern auch auf alle anderen zu strahlenden Bauwerke anwenden.

Als Einhausung gilt eine allseitig dichte Einrüstung mit festen Böden, Wänden und Decken sowie dichten Anschlüssen zum Bauwerk, Luftabsaugung und Filtrierung. Bei Abplanungen bestehen Wände und Decken aus dichten und reißfesten Planen mit Stoßüberdeckungen und ebenfalls dichten Bauwerksanschlüssen. Die Einhausung und Abplanungen einschließlich der dazu nötigen Gerüste sowie des darauf anfallenden Strahlschuttes dürfen das Bauwerk nicht über das statisch Zulässige hinaus belasten.

### 9.2.2 Emissionen von Filteranlagen

Filteranlagen sind in regelmäßigen Abständen auf eine einwandfreie Funktion der Staubabscheidung hin zu prüfen. Die eingesetzten Filtermedien sollten auf ihre Eignung nach VDI 3926 geprüft und durch das Berufsgenossenschaftliche Institut für Arbeitssicherheit (BGIA) zertifiziert sein. Näheres zur Luftreinhaltung regelt die Technische Anleitung Luft (TA Luft).

### 9.2.3 Lärmemissionen

Die nach außen tretenden Lärmemissionen können durch den Strahlbetrieb selbst, aber auch durch Ausblasgeräusche, Ventilatoren oder Druckluftstöße einer Filteranlage verursacht werden. Sowohl bei Abluftrohrleitungen ins Freie als auch bei Außenaufstellung von Filteranlagen sind die Bestimmungen der Technischen Anleitung Lärm (TA Lärm) zu berücksichtigen.

### 9.2.4 Entsorgung

Laut Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz § 4 (KrW-/AbfG) sind Abfälle in erster Linie zu vermeiden und in zweiter Linie stofflich zu verwerten (z.B. nach eindeutiger Prüfung durch Rückführung in Produktionsprozesse) oder zur Gewinnung von Energie zu nutzen. Der als Strahlschutt bezeichnete Abfall setzt sich aus der von der Oberfläche des behandelten Objektes entfernten Beschichtung oder Verunreinigung, Partikeln des Strahlgutes selbst und zerschlagenem Strahlmittel zusammen und kann in Form von separierten Grobteilen, feinkörnigen Reststoffen und Stäuben vorliegen.

Ist der Strahlschutt mit Schadstoffen wie etwa aus abgestrahlten Beschichtungen belastet, muss dieser von einem anerkannten Entsorgungsfachbetrieb nachweislich entsorgt werden. Im anderen Falle kann eine stoffliche Verwertung in Produktionsprozessen der Metallindustrie die Entsorgungskosten erheblich senken. Des Weiteren ist zu prüfen, ob sich die Entsorgungskosten für die genannten Kornfraktionen unterscheiden, sodass eine getrennte Sammlung und Entsorgung sinnvoll ist. In Einzelfällen können für einen bestimmten, als Wertstoff anzusehenden Strahlschutt auch Verkaufserlöse erzielt oder aber abgeschiedene Feinkornanteile an den Strahlmittelproduzenten zurückgegeben werden.

Aufgrund der hohen Entsorgungskosten für belasteten Strahlschutt ist die früher übliche Verwendung von Einwegstrahlmitteln zur Bauwerkssanierung in der Regel nicht mehr wirtschaftlich, sodass an solchen Baustellen mobile Strahlmittelaufbereitungs- und Entstaubungsanlagen eingesetzt werden, die die Wiederverwendung von Strahlmitteln erlauben.

## 10 Kosten des Strahlens

Schon eine durchschnittlich ausgelastete Strahlmaschine verursacht im Laufe ihrer Nutzungsdauer ein Vielfaches ihrer Anschaffungskosten an Betriebskosten, vor allem in Form von Personaleinsatz, Energieaufwand sowie Verschleiß und Strahlmittelverbrauch. Sowohl bei der Strahlanlagenbeschaffung als auch im laufenden Betrieb müssen die anfallenden Betriebskosten daher intensiv geprüft werden, um einen wirtschaftlichen Anlagenbetrieb zu gewährleisten und realistische Stückkosten der strahltechnischen Bearbeitung zu ermitteln.

Eine detaillierte Betriebskostenanalyse ist zwar nicht immer ohne organisatorischen Aufwand möglich, ist aber der erste Schritt zur Aufdeckung von Kostentreibern sowie der Identifikation und Quantifizierung möglicher Einsparpotentiale. Eine solche Analyse bedarf einer genauen Betrachtung im Einzelfall.

Die wesentlichen Kostenfaktoren einer Strahlanlage sind

- Beschaffung:  
Recherche, Gespräche mit Anbietern, Strahlversuche, Angebotsvergleich, Einkauf
- Finanzierung:  
Zinsen, Kapitalbindung, Sicherheiten
- Personal:  
Anlagenbedienung, Wartung, Reinigung

- Energie:  
Strombedarf, Druckluftbedarf
- Strahlmedien:  
Strahlmittel, Zusätze wie Waschsubstanzen, Inhibitoren
- Entsorgung:  
abgestrahlte Werkstückanhaftungen, nicht nutzbare Strahlmittelfeinteile, Staub, Schlamm
- Instandhaltung:  
Ersatz- und Verschleißteile, externe Wartung, Reparatur
- Sonstige Kosten:  
Gebühren, Versicherungen, sonstige direkt zuordenbare Kosten, ggf. zugeordnete Gemeinkosten

Generell muss festgehalten werden, dass ein wirtschaftlicher Anlagenbetrieb bei hoher Produktqualität in erster Linie durch einen anforderungsgerechten Strahlprozess und eine regelmäßige Anlagenwartung gewährleistet werden kann. Häufig sind aber auch durch Optimierungen im Anlagenbetrieb Einsparungen zu erzielen. Ansatzpunkte können sein:

- rationelle Anlagenbedienung, insbesondere durch automatische Abläufe und eine optimierte Be- und Entladung
- Abschalten der Anlage in Pausenzeiten bzw. Herunterfahren in Bereitschaftsmodus
- Einsatz qualitativ hochwertiger Strahlmittel mit langer Lebensdauer
- Verwendung langlebiger Verschleißteile

Die wirksamste Möglichkeit der Kostenbeeinflussung liegt allerdings eindeutig in der Phase der Beschaffung einer neuen Strahlanlage, in der die zu erwartenden Betriebskosten durch die Auswahl des Strahlprozesses und der Anlagenausführung weitgehend festgelegt werden. Daher sollte der Anlagenhersteller auf Basis seiner Erfahrungen sowie der Qualität und Kosten seiner Verschleiß- und Ersatzteile in die Prognose der Betriebskosten einbezogen werden.

## 11 Normen und Regelwerke

Das Strahlen als Fertigungsverfahren hat in verschiedene Normen, Technische Regeln u.Ä. Eingang gefunden. Dabei kommt zum Tragen, dass das Strahlen für sehr unterschiedliche Anwendungen eingesetzt wird, deren spezielle Anforderungen dann wiederum in verschiedenen Normen festgehalten werden.

Die grundlegende Norm der Strahlverfahrenstechnik in Deutschland war bis zu ihrer ersatzlosen Zurückziehung die DIN 8200. Da andere offizielle Grundlagen zurzeit fehlen, hat diese Norm zumindest hinsichtlich der strahltechnischen Begriffe weiterhin eingeschränkte Bedeutung. Große praktische Bedeutung haben demgegenüber vor allem die international gültigen und auch in Deutschland anerkannten Normen DIN EN ISO 8501-8504 zur Oberflächengüte von Stahloberflächen bzw. gestrahlten Oberflächen sowie die DIN EN ISO 11124-11126 zu Strahlmitteln und deren Prüfung.

Über die Normen hinaus haben verschiedene Fachverbände technische Regeln herausgegeben, in denen die spezifisch wichtigen Anforderungen an den Strahlprozess festgeschrieben werden. Diese Regeln werden häufig als verbindlich anerkannt bzw. finden Eingang in Werknormen oder Lastenhefte.

Eine thematisch gegliederte Auflistung relevanter Normen, Regeln und Richtlinien zeigt die **Tabelle 11**.

Norm	Titel
<b>Grundlagen der Strahlverfahrenstechnik</b>	
DIN 8200	Strahlverfahrenstechnik; Begriffe, Einordnung der Strahlverfahren 2008-04 ersatzlos zurückgezogen
<b>Beurteilung von Stahloberflächen</b>	
DIN EN ISO 8501	Vorbereitung von Stahloberflächen vor dem Auftragen von Beschichtungsstoffen – Visuelle Beurteilung der Oberflächenreinheit
DIN EN ISO 8502	Vorbereitung von Stahloberflächen vor dem Auftragen von Beschichtungsstoffen – Prüfungen zur Bewertung der Oberflächenreinheit
DIN EN ISO 8503	Vorbereitung von Stahloberflächen vor dem Auftragen von Beschichtungsstoffen – Rauheitskenngrößen von gestrahlten Stahloberflächen
DIN EN ISO 8504	Vorbereitung von Stahloberflächen vor dem Auftragen von Beschichtungsstoffen – Verfahren für die Oberflächenvorbereitung
DIN EN 10049	Messung des arithmetischen Mittenrauwertes $R_a$ und der Spitzenzahl $R_{pC}$ an metallischen Flacherzeugnissen
<b>Anforderungen an Strahlmittel</b>	
DIN EN ISO 11124	Vorbereitung von Stahloberflächen vor dem Auftragen von Beschichtungsstoffen – Anforderungen an metallische Strahlmittel
DIN EN ISO 11125	Vorbereitung von Stahloberflächen vor dem Auftragen von Beschichtungsstoffen – Prüfverfahren für metallische Strahlmittel
DIN EN ISO 11126	Vorbereitung von Stahloberflächen vor dem Auftragen von Beschichtungsstoffen – Anforderungen an nichtmetallische Strahlmittel
DIN EN ISO 11127	Vorbereitung von Stahloberflächen vor dem Auftragen von Beschichtungsstoffen – Prüfverfahren für nichtmetallische Strahlmittel
<b>Weitere relevante Normen zu Strahlmitteln</b>	
DIN 50312	Prüfung von Strahlmitteln; Prüfkabine für das Druckluftstrahlen
DIN 50315	Prüfung metallischer Strahlmittel durch Schleuderstrahlen; Verschleißprüfung, Wirkungsprüfung
DIN ISO 2395	Analysensiebe und Siebanalyse – Begriffe
DIN 66165-1	Partikelgrößenanalyse; Siebanalyse; Grundlagen
DIN 66165-2	Partikelgrößenanalyse; Siebanalyse; Durchführung
<b>Industrielle Strahlanwendungen</b>	
DIN EN 1248	Gießereimaschinen – Sicherheitsanforderungen für Strahlanlagen
DIN EN 10238	Automatisch gestrahlte und automatisch fertigungsbeschichtete Erzeugnisse aus Baustählen
DIN 65468	Luft- und Raumfahrt; Strahlen abtragend, reinigend
DIN EN 2497	Luft- und Raumfahrt; Trockenstrahlen von Titan und Titanlegierungen
ISO 3861	Gummischläuche zum Sandstrahlen – Anforderung
<b>Allgemeine Fertigungsverfahren</b>	
DIN 8580	Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung
DIN 8590	Fertigungsverfahren Abtragen – Einordnung, Unterteilung, Begriffe
DIN 8590 Berichtigung 1	Berichtigungen zu DIN 8590:2003-09
DIN 8592	Fertigungsverfahren Reinigen – Einordnung, Unterteilung, Begriffe
<b>Technische Regeln</b>	
DVS 2606	Hinweise auf mögliche Oberflächenvorbereitungen für das flussmittelfreie Hart- und Hochtemperaturlöten
VDFI 8001	Metallisches Strahlmittel, Stahldrahtkorn, Güteanforderungen, Prüfungen
SEP 1940, 3. Ausgabe	Messung des arithmetischen Mittenrauwertes $R_a$ und der Spitzenzahl $R_{pC}$ an kaltgewalzten Flacherzeugnissen aus Stahl. Ersetzt durch DIN EN 10049.
VDI 3423	Verfügbarkeit von Maschinen und Anlagen – Begriffe, Definitionen, Zeiterfassung und Berechnung
<b>Spezifische Normen zum Kugelstrahlen</b>	
SAE J442	Test Strip, Holder, and Gage for Shot Peening
SAE J443	Procedures for Using Standard Shot Peening Test Strip
SAE AMS-S-13165	Shot Peening of Metal Parts 2007-12 zurückgezogen, ersetzt durch SAE AMS 2430
AMS 2430	Shot Peening, Automatic
AMS 2432	Shot Peening, Computer Monitored

Tabelle 11: Strahltechnisch relevante Normen, Regeln und Richtlinien (Stand: Januar 2009)

## 12 Literaturhinweise

Bahlmann, W.:  
Erfahrungen mit Ersatzstoffen für  
silikogene Strahlmittel, Dortmund,  
1981

Carpell, A. W. H., Kaiser, W.-D.,  
Öchsner, P., Schmidt, R.:  
Korrosionsschutz von Stahlbauten  
durch Beschichtungssysteme,  
Leistungsbereich DIN EN ISO  
12944, Frankfurt am Main, 1999

Horowitz, I.:  
Oberflächenbehandlung mittels  
Strahlmitteln, Essen, 1982

Kiefer GmbH Oberflächen &  
Strahltechnik:  
Kugelstrahlen im Lohnauftrag,  
Oberhausen, 2003

Kiess GmbH & Co. KG:  
Korrosionsschutz – Seminar,  
Maschinen- und Gerätekunde der  
Strahltechnik, Mülheim an der  
Ruhr

Metal Improvement Company, LLC:  
Broschüre der Metal Improvement  
Company, Unna

Momber, A.:  
Blast Cleaning Technology,  
Berlin, 2008

## 13 Bildnachweis

Abb. 1, 20 a:  
Konrad Rump Oberflächentechnik  
GmbH & Co. KG  
33154 Salzkotten

Abb. 2, 7, 11 b, 16, 17, 19, 20 b  
und Titelbild:  
Wheelabrator Group GmbH  
48629 Metelen

Abb. 3, 20 d:  
AGTOS GmbH  
48282 Emsdetten

Abb. 4, 15:  
Muehlhan AG  
21107 Hamburg

Abb. 5:  
Edelstahl Service Ahaus GmbH  
48683 Ahaus

Abb. 6, 10 a, 11 a, 23, 24, 29:  
strahlportal  
45711 Datteln

Abb. 8:  
SLF Oberflächentechnik GmbH  
48268 Greven

Abb. 9:  
Clemco International GmbH  
83052 Bruckmühl

Abb. 10 b:  
KIESS GmbH & Co. KG  
45472 Mülheim an der Ruhr

Abb. 12:  
Stahl-Informations-Zentrum  
40237 Düsseldorf

Abb. 13:  
Munk + Schmitz Oberflächentech-  
nik GmbH & Co. KG  
51105 Köln

Abb. 14:  
IES Industrie Engineering Service  
GmbH  
47829 Krefeld

Abb. 18 und Titelbild:  
DISA Industrie AG  
8184 Bachenbülach, Schweiz

Abb. 20 c:  
RÖSLER Oberflächentechnik  
GmbH  
96190 Untermerzbach

Abb. 21:  
Sonats SA  
44475 Carquefou, Frankreich

Abb. 22 und Titelbild:  
SQH Strahltechnik  
45711 Datteln

Abb. 25:  
sentenso GmbH  
Strahlprozesstechnik  
45711 Datteln

Abb. 26:  
HOMMEL-ETAMIC GmbH  
40880 Ratingen

Abb. 27:  
Nanofocus  
46149 Oberhausen

Abb. 28:  
Lambda Technologies  
Cincinnati, OH 45227, USA

Abb. 30:  
Electronics Incorporated  
Mishawaka, IN 46545, USA



**Stahl-Informations-Zentrum  
im Stahl-Zentrum**

Postfach 10 48 42 · 40039 Düsseldorf

Sohnstraße 65 · 40237 Düsseldorf

E-Mail: [siz@stahl-info.de](mailto:siz@stahl-info.de) · [www.stahl-info.de](http://www.stahl-info.de)