



## Leseprobe

Reinhard Koether, Alexander Sauer

Fertigungstechnik für Wirtschaftsingenieure

ISBN (Buch): 978-3-446-44831-5

ISBN (E-Book): 978-3-446-44990-9

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-44831-5>

sowie im Buchhandel.

# Inhalt

<b>Vorwort zur 5. Auflage</b> .....	<b>5</b>
<b>1 Grundlagen</b> .....	<b>13</b>
1.1 Aufgaben der Fertigungstechnik .....	13
1.2 Hauptgruppen der Fertigungsverfahren nach DIN 8580 .....	18
1.3 Auswahl von Fertigungsverfahren .....	19
1.4 Wesentliche Eigenschaften der Fertigungsverfahren .....	21
<b>2 Urformende Fertigungsverfahren</b> .....	<b>26</b>
2.1 Gießen .....	27
2.1.1 Stranggießen .....	27
2.1.2 Gießen in verlorene Formen .....	28
2.1.3 Gießen in Dauerformen .....	35
2.1.4 Verfahrensvergleich Sandguss – Kokillenguss .....	39
2.1.5 Gießerei .....	41
2.2 Sintern von Metallwerkstoffen .....	43
2.2.1 Verfahrensablauf .....	44
2.2.2 Vergleich pulvermetallurgischer Fertigungsverfahren .....	49
2.2.3 Vorteile, Nachteile und Anwendungsfelder des Sinterns .....	51
2.3 3D-Druck .....	53
2.3.1 3D-Druckverfahren .....	53
2.3.2 Verfahrensvergleich 3D-Druckverfahren .....	59
2.3.3 Anwendung 3D-Druck .....	61
<b>3 Umformende Fertigungsverfahren</b> .....	<b>64</b>
3.1 Grundlagen des Umformens .....	66
3.2 Massivumformen .....	76
3.2.1 Stauchen .....	76

---

3.2.2	Frei- und Gesenkformen	78
3.2.3	Verfahrensvergleich Gesenkformen – Gießen	82
3.2.4	Walzen	84
3.2.5	Eindrücken	90
3.2.6	Strangpressen und Fließpressen	92
3.2.7	Verfahrensvergleich Strangpressen – Walzen	97
3.2.8	Gleitziehen	98
3.2.9	Rundkneten	101
3.3	Blech- und Profillumformen	104
3.3.1	Biegen	104
3.3.2	Tiefziehen	106
3.3.3	Verfahrensvergleich Tiefziehen – Fließpressen	111
3.3.4	Tiefziehen mit elastischen Werkzeugen und Wirkmedien	112
3.3.5	Streckziehen	114
3.3.6	Walzprofilieren, Walzziehen, Walzrichten	116
3.3.7	Drücken	118
3.3.8	Verfahrensvergleich Drücken – Tiefziehen	122
3.3.9	Innenhochdruck-Umformen (IHU)	123
<b>4</b>	<b>Trennende Fertigungsverfahren</b>	<b>125</b>
4.1	Zerteilen – Spanloses Trennen	125
4.1.1	Scherschneiden	127
4.1.2	Feinschneiden	129
4.1.3	Werkzeuge für Umform- und Schneidvorgänge	131
4.2	Zerspanungstechnik	133
4.2.1	Bewegungen und Geometrie am Schneidwerkzeug	133
4.2.2	Schnitt-, Spanungsgrößen und Spanbildung	139
4.2.3	Schnittkraft, Leistungsbedarf und Hauptnutzungszeit	144
4.2.4	Schneidstoffe und Kühlschmierstoffe	151
4.2.5	Werkzeugverschleiß und Werkstückoberfläche	157
4.2.6	Standzeit eines Werkzeuges	162
4.2.7	Optimierung der Zerspanung	164
4.2.8	Zerspanbarkeit von Werkstoffen	167
4.2.9	Trends in der spanenden Fertigung	167
4.3	Spanende Fertigungsverfahren mit geometrisch bestimmten Schneiden	172
4.3.1	Drehen	172
4.3.2	Bohren, Senken und Reiben	176
4.3.3	Fräsen	182
4.3.4	Räumen	187

---

4.3.5 Sägen .....	190
4.3.5.1 Werkzeuge .....	192
4.3.5.2 Maschinen .....	192
4.4 Spanende Fertigungsverfahren mit geometrisch unbestimmten Schneiden	193
4.4.1 Schleifen .....	195
4.4.2 Honen .....	199
4.4.3 Läppen .....	201
4.4.4 Strahlspanen, Strahlen und Reinigen .....	203
4.4.5 Entgraten .....	205
4.5 Abtragende Verfahren .....	208
4.5.1 Erodieren .....	209
4.5.2 Verfahrensvergleich Erodieren - Fräsen .....	213
4.5.3 Laserbearbeitung .....	214
4.5.4 Verfahrensvergleich Laserbrennschneiden - Nibbeln .....	216
4.5.5 Wasserstrahlschneiden .....	218
<b>5 Fügende Fertigungsverfahren .....</b>	<b>221</b>
5.1 Montage .....	222
5.2 Schweißen .....	224
5.2.1 Autogenschweißen .....	225
5.2.2 Lichtbogenschweißen .....	227
5.2.3 Laserstrahlschweißen .....	233
5.2.4 Widerstandspressschweißen .....	236
5.2.5 Ultraschallschweißen und Reibschweißen .....	241
5.3 Löten .....	242
5.3.1 Weichlöten .....	244
5.3.2 Hartlöten .....	246
5.3.3 Verfahrensvergleich Laserstrahlschweißen - MIG/MAG-Schweißen - Hartlöten .....	249
5.4 Kleben .....	252
5.5 Fügen durch Umformen .....	255
5.5.1 Nieten .....	256
5.5.2 Clinchen oder Durchsetzfügen .....	260
5.5.3 Falzen und Bördeln .....	262
5.6 Schrauben .....	264
5.7 Klipsen und Einrasten .....	268

---

<b>6 Beschichten</b> .....	<b>270</b>
6.1 PVD- und CVD-Verfahren .....	273
6.2 Lackieren und Lacksysteme .....	275
6.3 Tauchlackieren .....	277
6.4 Spritzlackieren .....	279
6.5 Emaillieren .....	285
6.6 Thermisches Spritzen .....	287
6.7 Galvanisieren, Oxidieren und elektrolytische Tauchabscheidung .....	291
6.8 Wirbelsintern und elektrostatisches Pulverbeschichten .....	293
6.9 Coil Coating .....	296
6.10 Prozesstechnische Pkw-Serienlackierung .....	296
<b>7 Werkzeugmaschinen</b> .....	<b>300</b>
7.1 Einführung .....	300
7.2 Gestelle .....	302
7.3 Schlitten und Tische .....	308
7.4 Führungen .....	308
7.5 Lagerungen .....	315
7.6 Antriebe .....	318
7.6.1 Hauptantriebe .....	319
7.6.2 Nebenantriebe .....	323
7.7 Getriebe .....	326
7.7.1 Translationsgetriebe .....	326
7.7.2 Rotationsgetriebe .....	329
7.8 Beispiele für Werkzeugmaschinen .....	334
7.8.1 Spanende Werkzeugmaschinen .....	335
7.8.2 Werkzeugmaschinen für die Umformung und das Zerteilen .....	339
<b>8 Steuerung von Werkzeugmaschinen</b> .....	<b>342</b>
8.1 Aufgaben von Steuerungen in Werkzeugmaschinen .....	342
8.2 Numerische Steuerung (NC) .....	344
8.2.1 Grundlagen der numerischen Steuerung (NC) .....	344
8.2.2 Wegmesssysteme .....	349
8.2.3 Koordinatensysteme, Achsen und Nullpunkte .....	351
8.2.4 NC-Programmierung .....	359
8.2.5 Programmiermethoden .....	361

---

8.3	Logik- und Servosteuerungen .....	368
8.4	Konventionelle Programmsteuerungen .....	370
8.4.1	Kurvensteuerung .....	370
8.4.2	Kopiersteuerungen .....	371
8.5	Digitalisieren .....	372
<b>9</b>	<b>Fertigungsautomatisierung und Industrieroboter .....</b>	<b>374</b>
9.1	Fertigungsautomatisierung .....	374
9.1.1	Einführung .....	374
9.1.2	Begriffe zur Fertigungsautomatisierung .....	377
9.1.3	Ziele der Fertigungsautomatisierung .....	378
9.1.4	Automatisierungsgrad von Fertigungssystemen .....	380
9.2	Aufbau automatisierter Fertigungsanlagen .....	382
9.2.1	Systembestandteile .....	382
9.2.2	Transportieren, Verketteten und Puffern .....	384
9.2.3	Sensoren zum Überwachen, Prüfen und Sichern .....	388
9.3	Industrieroboter .....	392
9.3.1	Handhabungsmaschinen .....	392
9.3.2	Aufbau von Industrieroboteranlagen .....	395
9.3.3	Grundbauformen von Industrierobotern .....	396
9.3.4	Kenngrößen von Industrierobotern .....	399
9.3.5	Greifer- und Wechselsysteme .....	401
9.3.6	Peripheriegeräte .....	403
9.3.7	Industrierobotersteuerung und -programmierung .....	405
<b>10</b>	<b>Steigerung von Flexibilität und Produktivität .....</b>	<b>410</b>
10.1	Zielsetzung .....	410
10.2	Verkürzung der Rüstzeit .....	410
10.3	Verkürzen der Hauptnutzungszeit .....	413
10.4	Verkürzung der Nebenzeit .....	416
10.4.1	Verkürzung der Werkstückwechselzeit .....	416
10.4.2	Verkürzung der Werkzeugwechselzeit .....	419
10.5	Verkürzung der Durchlaufzeit .....	420
10.6	Verlängerung der Maschinennutzung .....	422
<b>11</b>	<b>Energieeffizienz in der Produktion .....</b>	<b>424</b>
11.1	Definitionen .....	424
11.2	Volkswirtschaftliche Aspekte .....	424
11.3	Technische Umsetzungsbeispiele .....	427

<b>12 Formelsammlung</b> .....	<b>431</b>
12.1 Massivumformen .....	431
12.2 Blech- und Profillumformen .....	435
12.3 Schneiden .....	441
12.4 Zerspanungstechnik .....	443
<b>13 Übungsaufgaben</b> .....	<b>450</b>
13.1 Spanende Fertigungsverfahren .....	450
13.2 Spanlose Fertigungsverfahren .....	459
13.3 Werkzeugmaschinen .....	462
<b>14 Kontrollfragen</b> .....	<b>463</b>
14.1 Grundlagen .....	463
14.2 Urformende Fertigungsverfahren – Gießen .....	464
14.3 Umformende Fertigungsverfahren .....	466
14.4 Spanende Fertigungsverfahren und Zerspanungstechnik .....	468
14.5 Fügende Fertigungsverfahren .....	471
14.6 Beschichten .....	472
14.7 Werkzeugmaschinen .....	473
14.8 CNC-Steuerung .....	474
14.9 Verfahrensvergleiche .....	475
<b>Literatur</b> .....	<b>477</b>
<b>Sachwortverzeichnis</b> .....	<b>481</b>

# Vorwort zur 5. Auflage

Zwei wichtige Trends bestimmen aktuell die Lage in der deutschen Industrie: Die Digitalisierung – auch mit Industrie 4.0 bezeichnet und die zunehmende Relevanz der Ressource Energie. Beide Trends werden die Kosten in der Fertigung zukünftig stärker beeinflussen. Gleichzeitig gilt es, die Qualität der Produkte auf hohem Niveau zu halten, um die führende Position der fertigungstechnischen Industrie auf den Weltmärkten abzusichern.

Wirtschaftsingenieure werden bevorzugt an Schnittstellen zwischen wirtschaftlichen und technischen Aufgabenstellungen eingesetzt. Dazu gehört auch die Fertigungsplanung mit der Auslegung der Herstellungsprozesse und der Ablaufplanung für konkrete Fertigungsaufträge. Jedoch brauchen nicht nur Fertigungsplaner fertigungstechnisches Wissen. Auch im Einkauf, in der Projektleitung oder im Controlling produzierender Unternehmen wird Know-how über Fertigungsverfahren und Fertigungsparameter benötigt, um z. B. Kosten zu beurteilen oder um die Fähigkeit von Lieferanten und mögliche Risiken während der Beschaffung einzuschätzen.

Das vorliegende Buch ist aus unseren Vorlesungen an der Fakultät für Wirtschaftsingenieurwesen der Hochschule München entstanden. Eingeflossen sind auch unsere Erfahrungen aus der Berufspraxis, aus Beratungsprojekten sowie Projekten an der Universität Stuttgart sowie dem Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA. Das Buch will Wirtschaftsingenieuren einen Überblick über die gängigen Fertigungsverfahren zur Metallbearbeitung geben und neben den technischen Grundlagen und Abläufen auch die wirtschaftlichen Auswirkungen der Technik zeigen.

Unsere Fertigungstechnik für Wirtschaftsingenieure bietet einen kompakten Überblick über Fertigungsverfahren und Maschinen. Dazu greift es die oben genannten Megatrends auf. Auch deshalb wendet sich das Buch nicht nur an Wirtschaftsingenieure, sondern an alle, die fertigungsnahe Aufgaben zu lösen haben, also auch an Betriebswirte oder Ingenieure, die eine Übersicht über Fertigungsverfahren bekommen wollen.

Für die 5. Auflage wurde die Fertigungstechnik für Wirtschaftsingenieure grundlegend inhaltlich neu bearbeitet. So konnten wir für die Modernisierung des Kapitels Umformtechnik Herrn Dr. Odening gewinnen. Den additiven Fertigungsverfahren wurde wegen ihrer zunehmenden Bedeutung in der Praxis auch im Buch deutlich mehr Raum gegeben. Auch der zunehmenden Bedeutung des Energieverbrauchs in der Industrie für unsere Zukunft haben wir mit der Erstellung eines neuen Kapitels Rechnung getragen. Dazu wurde das Layout modernisiert, sodass das Buch jetzt auch als ebook erhältlich ist.

Wir danken dem Carl Hanser Verlag für die beharrliche Unterstützung des Projekts. Ebenso danken wir dem Coautor der bisherigen Auflagen, Herrn Prof. Dr. Rau für die umfangreichen Vorarbeiten. Unser besonderer Dank gilt unseren Ehefrauen Ingelore Koether und Verena Sauer, die die besonderen Belastungen durch die Arbeit an diesem Buch geduldig mitgetragen haben und durch Korrektur lesen aktiv zum Gelingen beigetragen haben.

Gauting und Stuttgart, Oktober 2016

Reinhard Koether  
Alexander Sauer

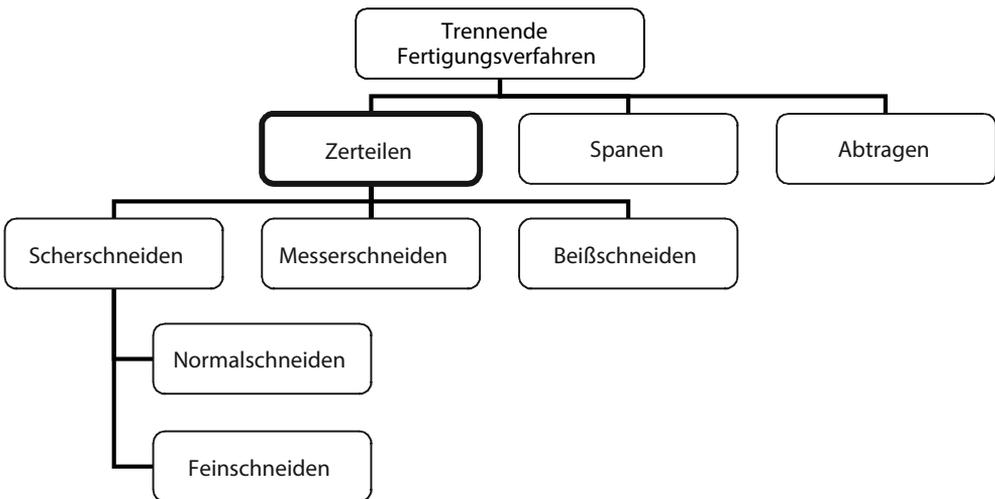
# 4

## Trennende Fertigungsverfahren

### ■ 4.1 Zerteilen – Spanloses Trennen

Zerteilen ist das mechanische Trennen von Werkstücken mit Hilfe von Schneidkanten ohne die Entstehung von Spänen. In der industriellen Praxis sind von Bedeutung (Bild 4.1):

- Scherschneiden,
- Messerschneiden,
- Beißschneiden.



**Bild 4.1** Gliederung der trennenden und zerteilenden Fertigungsverfahren

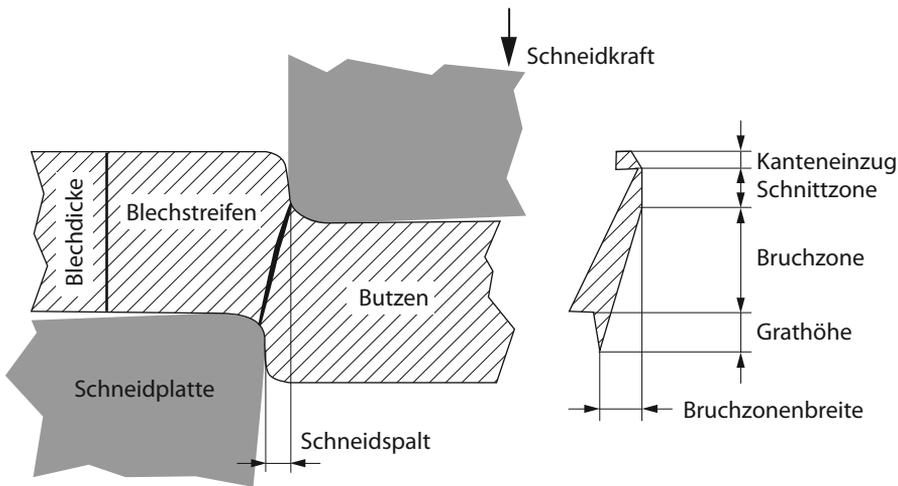
Das **Scherschneiden** ist sehr produktiv und hat deshalb eine große wirtschaftliche Bedeutung. Es kommt vor allem in der Blechbearbeitung zum Einsatz.

Das **Messer-** und **Beißschneiden** wird vornehmlich für weiche Werkstoffe oder zum Beschnneiden eingesetzt.

Eine Zusammenlegung der Trennlinien des zu schneidenden Werkstücks (Anfang und Ende) ermöglicht eine Reduzierung des Schneidaufwandes und des Verschnitts.

### Schneidvorgang (Ablauf):

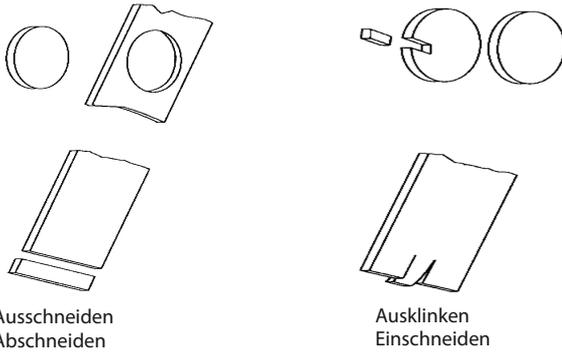
- zunächst elastisches und dann plastisches Verformen,
- Eindringen der Werkzeugschneidkanten in den Werkstoff,
- Abreißen des Werkstoffs, ausgehend von den beiden Schneidkanten entlang der Trennlinien, beim Überschreiten der maximalen Scherspannung und
- Ausbildung einer Bruchzone mit einem Kanteneinzug an der Stempelseite und einem scharfkantigen Grat an der Schneidplattenseite des Werkstücks. Das verbleibende Restmaterial weist die gleichen Bruchzonenmerkmale auf, nur 180° umgekehrt (Bild 4.2).



**Bild 4.2** Schneidvorgang und Begriffe beim Schneiden (*Westkämper*)

### Schneidoperationen zur Werkstückbearbeitung (Bild 4.3):

- Abschneiden – Halbzeugprofil wird auf Länge abgeschnitten,
- Ausschneiden – ausgeschnittenes Teil ist das Werkstück,
- Lochen – Werkstück erhält Löcher (Rund-, Mehrkant-, Langlöcher),
- Ausklinken – seitliches Abschneiden; abgeschnittene Teile sind Abfall,
- Einschneiden – seitliches Einschneiden (für evtl. Aufbiegen),
- Beschneiden – Abschneiden überflüssiger Ränder nach dem Umformen.



**Bild 4.3** Schneidoperationen zur Werkstückbearbeitung (*Lochmann*)

## Schnittkraft $F$

**Schnittkraft bei drückendem Schnitt**  $F_d = A \cdot \tau_{aB}$

$A$  (Breite  $\times$  Dicke des Halbzeugquerschnitts)

$\tau_{aB}$  Abscherbruchfestigkeit

**Schnittkraft bei ziehendem Schnitt**  $F_z = 0,5 \cdot \tau_{aB} \cdot s^2 / \tan \varphi$

$s$  Blechdicke

$\varphi$  Neigung der Schneide ( $2 \dots 6^\circ$ )

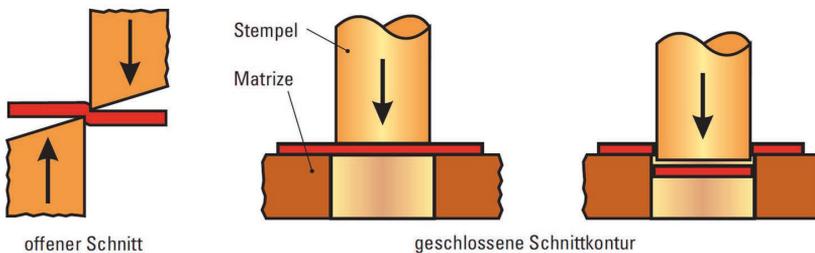
### 4.1.1 Scherschneiden

**Scherschneiden** (Bild 4.4) ist das Zerteilen von Werkstücken zwischen Schneiden, die sich aneinander vorbei bewegen. Dabei können die Werkstücke erhebliche Form- und Maßabweichungen erhalten (bez. Schnittgrat, Winkeligkeit der Schnittflächen und Ebenheit der geschnittenen Werkstücke).

**Typische Scherschneidteile:** Blechzuschnitte, Profil-, Stangenabschnitte

**Einsatzbereich:** Einzel- bis Massenfertigung

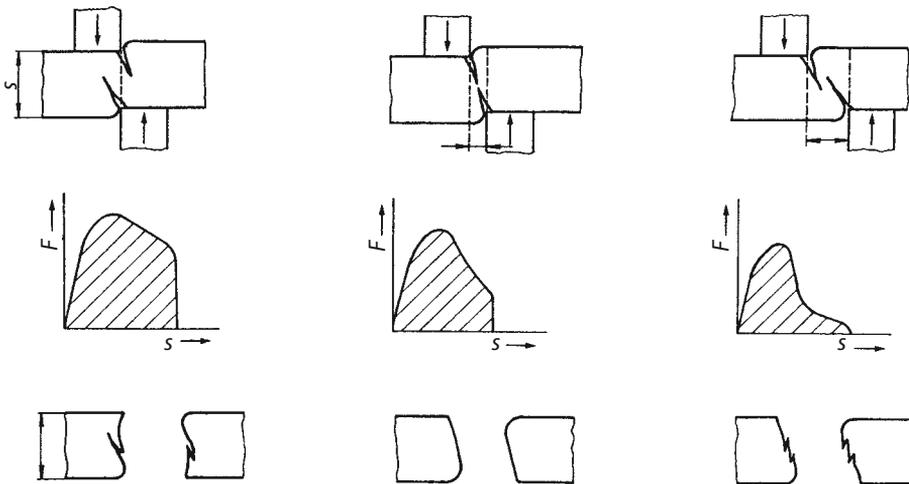
#### Verfahren



**Bild 4.4** Offener und geschlossener Schnitt beim Scherschneiden (*Schuler*)

- aufgrund der geforderten Kontur des Werkstücks:
  - **Offen-Schneiden** - z.B. Abschneiden eines Werkstücks auf Länge
  - **Geschlossen-Schneiden** - z.B. Ausschneiden oder Lochen
- beim Schnittvorgang, mit Auswirkung auf den Schnittkraftbedarf:
  - **Vollkantig-Schneiden** - auf einmal schneiden, plötzlich wirksame Schnittkraft erzeugt Schnittschlag
  - **Kreuzend-Schneiden** - Schnittebene und Schneide kreuzen sich, allmählicher Schnittvorgang, geringere Schnittkraft
- nach dem Fortschreiten des Schneidvorgangs:
  - **Einhubiges Schneiden** - vollkantig oder kreuzend,
  - Nibbelschneiden, **Nibbeln** - mehrhubig fortschreitendes Schneiden mit Abfall erzeugendem Schneidstempel, es lassen sich beliebige Werkstückformen erzeugen.
  - **Kontinuierliches Schneiden** - mit Rollmesser, z.B. Aufspalten von Blechcoils.

Der Schneidspalt beträgt 5 bis 10% der Blechdicke. Bei weichen Materialien wird ein engerer, bei harten Materialien ein größerer Schneidspalt eingestellt (Bild 4.5).



**Bild 4.5** Unterschiedliche Schneidspalte beim Scherschneiden (zu klein, richtig, zu groß)

### Maschinen und Werkzeuge

- manuell bediente Scheren, Exzenter- oder hydraulische Pressen;
- die Werkzeuge können Universalwerkzeuge sein, für komplexere Werkstücke benötigt man eigens angefertigte **Schnittwerkzeuge**. Schneid- und Umformvorgänge werden in Verbundwerkzeugen zusammengefasst.
- Universelle Formen lassen sich mit **Nibbelmaschinen** herstellen. Hierbei wird nicht nur die Außenkontur, sondern es werden auch Lochungen und andere Durchbrüche in einer Bearbeitung ausgeführt.

## Wirtschaftlichkeit

Die Qualität der Schneidkanten ist bestimmt durch:

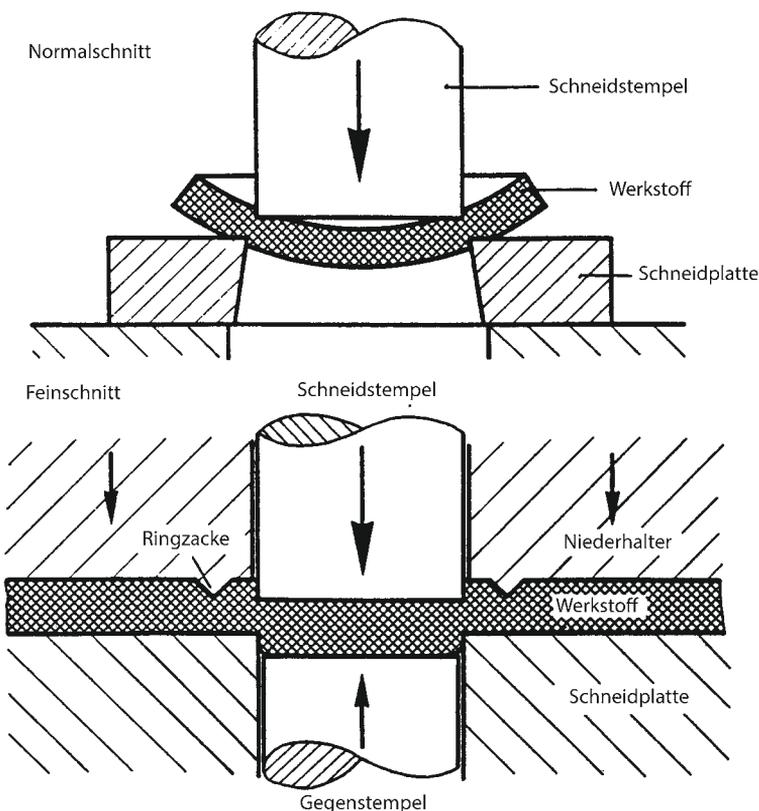
- Rundung am Kanteneinzug,
- Bruchfläche und Schergrat.

Erreichbare Maßgenauigkeit: IT 8 ... 14

### 4.1.2 Feinschneiden

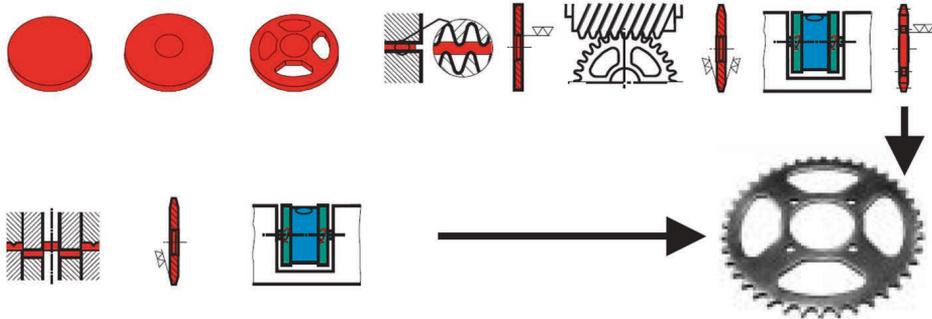
Das Feinschneiden (auch Genauschnitten) ist ein Scherschneiden zur Herstellung von Werkstücken mit glatten und weitgehend rechtwinkligen Schnittflächen.

Das Feinschneiden unterscheidet sich vom Scherschneiden dadurch, dass der Werkstoff des allseitig eingespannten Blechzuschnitts allein durch Fließen (Fliebscheren), also ohne Bruch und unebene Bruchfläche, getrennt wird (Bild 4.6).



**Bild 4.6** Vergleich Normal- und Feinschneiden

**Typische Feinschneidteile sind:** Kettenräder (Bild 4.7), Sitzbeschläge, Kupplungsteile  
**Einsatzbereich:** Massenfertigung



**Bild 4.7** Kettenradfertigung konventionell (oben) und mit Feinschneiden (unten) (Schuler)

### Besonderheiten

- Niederhalter mit Ringzacke zur Fixierung der Blechplatine, damit Blech nicht in Schnittpalt hineingezogen wird,
- enger, genauer Schnittpalt (ca. 0,5 % der Blechdicke), dadurch nur kleine Grate;
- Gegenstempel verhindert Aufwölbung des Bleches,
- geringere Maßtoleranzen und geringe Toleranzabweichungen durch zylindrische Schneidplattendurchbrüche,
- kein Schnittschlag, dadurch weniger Lärm und Erschütterungen und
- Reduzierung der Arbeitsfolgen bis zum fertigen Werkstück.

### Werkzeuge

- hohe Genauigkeit erforderlich, deutlich teurer als konventionelle Schnittwerkzeuge.
- Durch den Bau von Folgeverbundwerkzeugen bietet sich die Möglichkeit, an Werkstücken Umformvorgänge, wie Tiefziehen, Durchsetzungen, Biegungen und Prägungen mit dem Feinschneiden zu kombinieren.

### Maschinen

- Feinschneidpressen müssen drei unterschiedliche Bewegungen ausführen, für Schneidstempel, Niederhalter (Ringzackenkraft) und Gegenstempel.
- Dreifach wirkende Pressen mit gesteuertem Bewegungsablauf sind notwendig.
- Die engen Schneidspalte der Werkzeuge dürfen sich auch unter Belastung der Presse nicht verändern. An Feinschneidpressen werden deshalb hohe Anforderungen bezüglich Stößelführung und Ständersteifigkeit gestellt.

## ■ 11.1 Definitionen

Bei der Diskussion von Energieeffizienz ist es von Bedeutung, die unterschiedlichen Betrachtungsebenen zu unterscheiden:

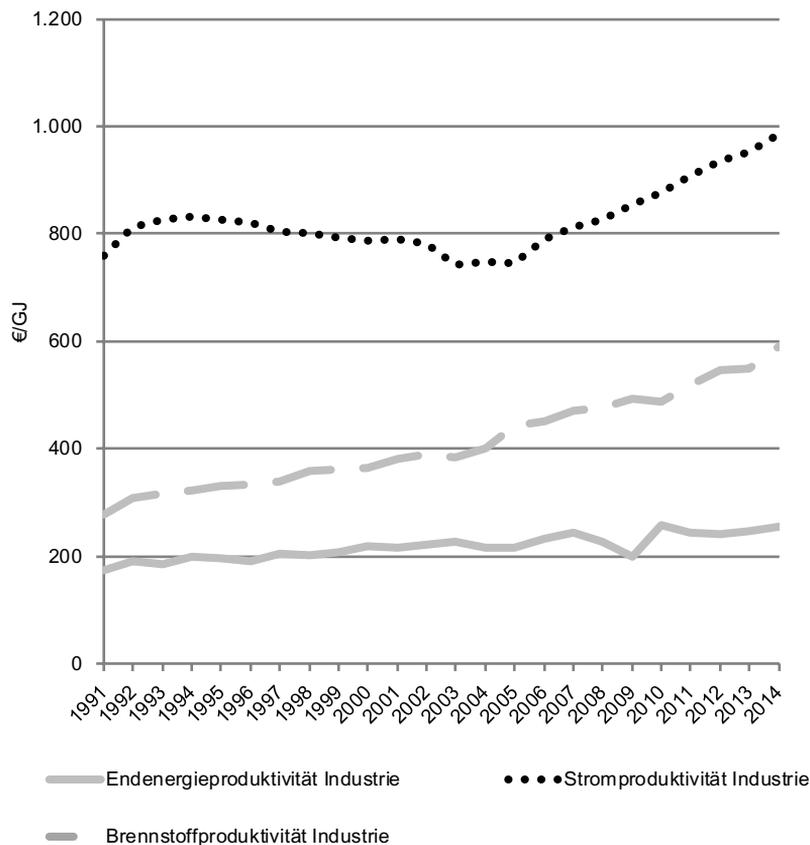
- **Primärenergie** umfasst den Energieinhalt aller natürlich vorkommenden Energieträger, welche technisch noch nicht umgewandelt wurden (AGEB 2015b).
- **Sekundärenergie** bezeichnet den Energieinhalt von Energieträgern, die durch einen oder mehrere (chemische/physikalische) Umwandelungsschritte aus Primärenergie gewonnen wurden. Zu dieser Gruppe gehören alle Stein- und Braunkohlenprodukte sowie Mineralölprodukte, Gichtgas, Konvertergas, Kokereigas, Strom und Fernwärme (AGEB 2015b).
- **Endenergie** ist der Energieinhalt der Primär- bzw. Sekundärenergieträger, der dem Endverbraucher nach Abzug von Übertragungs- und Umwandlungsverlusten zur Erzeugung von Nutzenergie zur Verfügung steht (BMWi 2014a).
- **Nutzenergie** ist die Form der Energie, die nach der letzten Umwandlung in den Geräten des Endverbrauchers zur Bereitstellung von Energiedienstleistungen, wie beispielsweise temperierte Räume oder transportierte Güter, bereitgestellt wird. Verschiedene Arten der Nutzenergie sind z.B. Wärme, Licht oder mechanische Arbeit (BMWi 2014a).

## ■ 11.2 Volkswirtschaftliche Aspekte

Auf der Weltklimakonferenz in Paris Ende 2015 haben sich die teilnehmenden Staaten darauf verständigt, die weltweite Klimaerwärmung auf maximal 2 °C zu beschränken und sogar ein Ziel von 1,5 °C anzustreben. Das bedeutet, dass neben der Abkehr von fossilen Brennstoffen eine enorme Steigerung der Energieeffizienz vorgenommen werden muss, um den absoluten Energieverbrauch zu reduzieren. In Deutschland entfällt fast ein Drittel der verbrauchten Energie auf das verarbeitende Gewerbe und daher ist die Steigerung der Energieeffizienz in der Produktion ein wesentlicher Schritt zum Erreichen der Klimaziele. Bild 11.1 zeigt die Entwicklung der Endenergie-, Brennstoff- und Stromproduktivität der Industrie von 1991 bis 2014.

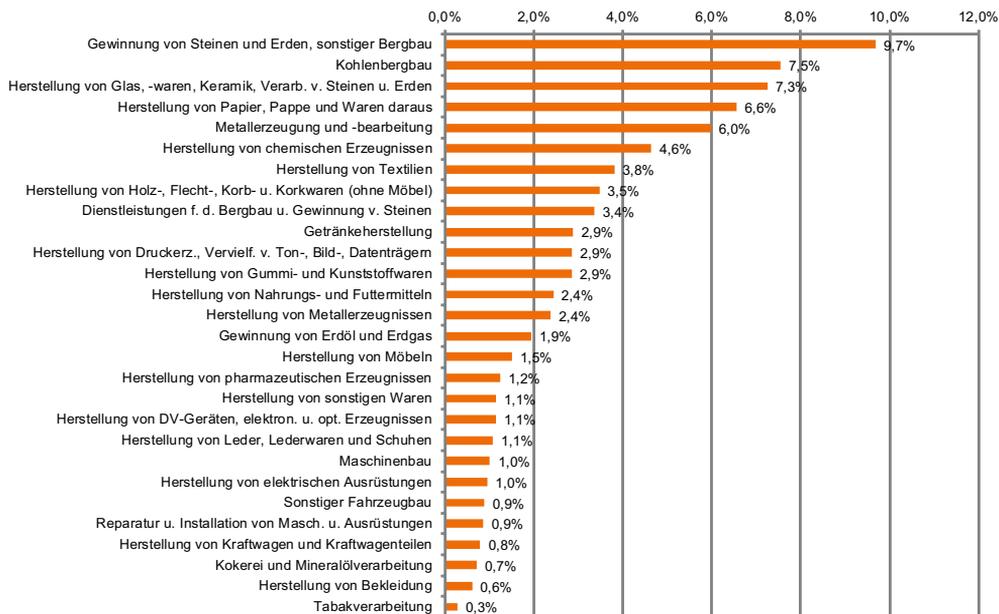
Der Trend zu höheren Produktivitäten ist deutlich erkennbar, wenngleich die Endenergieproduktivität nur relativ langsam steigt. Von 1991 bis 2008 zeigt sich, dass sich eine vermehrte Nutzung von Strom als Energieträger etabliert. Der geringere Anstieg der Endenergieproduktivität im Vergleich zur Brennstoff- und Stromproduktivität hat seine Ursache in einer zunehmend effizienteren Umwandlung von Brennstoff und Strom in Endenergie.

Die Energieproduktivität in der Industrie stieg zwischen 1995 und 2008 jährlich im Mittel um 1,7%. Um das Ziel der Bundesregierung, die Energieproduktivität bis 2020 zu verdoppeln, realisieren zu können, wäre im verbleibenden Zeitraum eine Steigerung der gesamtwirtschaftlichen Energieproduktivität zwischen 3 und 3,7% pro Jahr erforderlich.



**Bild 11.1** Entwicklung der Endenergie-, Brennstoff-, Strom- und CO<sub>2</sub>-Produktivität der Industrie zwischen 1991 und 2014 (BMWi 2015b; StBA 2016b; AGEb 2015a)

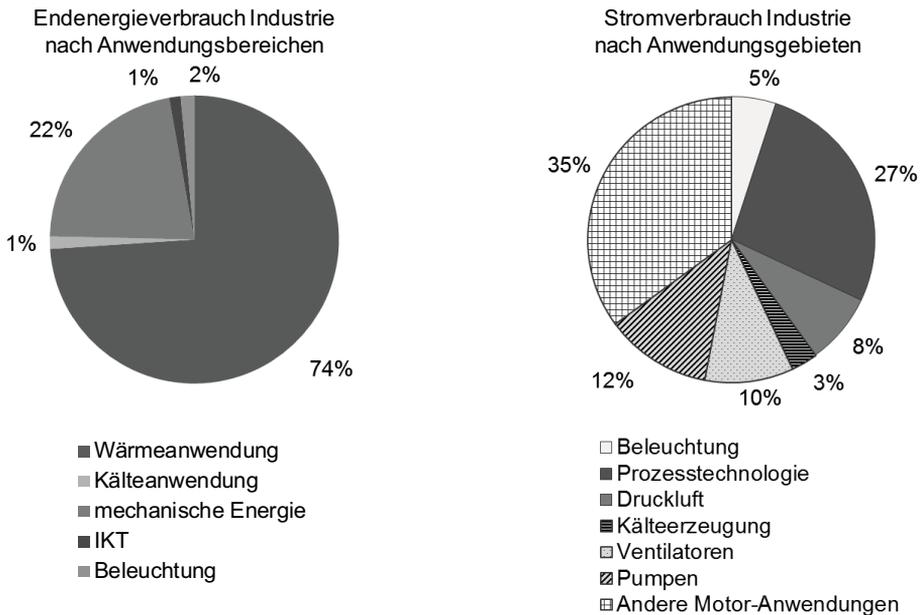
Ein wesentlicher Treiber zur Steigerung der Energieeffizienz in der Produktion ist aus Sicht von Unternehmen neben den gesetzlichen Rahmenbedingungen der Anteil der Energiekosten an den Gesamtkosten, dem Umsatz oder dem Bruttoproduktionswert (Bild 11.2). Nur wenige Branchen haben Energiekosten von über 5% bezogen auf den Bruttoproduktionswert. Das zeigt, dass vielfach zusätzliche Anreize geschaffen werden müssen, damit sich Unternehmen mit dem Thema Energieeffizienz auseinandersetzen.



**Bild 11.2** Anteil der Energiekosten am Bruttoproduktionswert in unterschiedlichen Wirtschaftszweigen im Jahr 2013 (*StBA 2015a*)

Zur effektiven Steigerung der Energieeffizienz in der Industrie ist es entscheidend, die Verwendung der Energie zu betrachten (Bild 11.3). Der Endenergieverbrauch der Industrie setzt sich hauptsächlich aus Energie für Wärmeanwendungen und mechanische Energie zusammen, die zusammen circa 96 % des Energieverbrauchs ausmachen. Im Jahr 2012 beliefen sich 74 % des industriellen Endenergieverbrauchs auf Wärmeanwendungen, überwiegend in Form von Prozess- und Raumwärme. Weitere 22 % wurden für mechanische Energie aufgewandt. Hier liegen somit die größten Hebel zur Steigerung der Energieeffizienz. Die verbleibenden 4 % werden zu annähernd gleichen Teilen durch Kälteanwendungen, Beleuchtung und Informations- und Kommunikationstechnik verbraucht.

Insgesamt besteht der industrielle Endenergieverbrauch zu etwa je einem Drittel aus elektrischer Energie und Gas. Das letzte Drittel teilt sich auf Energieträger Öl, Fernwärme, Kohle und Erneuerbare Energien auf. Neben der Verbrauchshöhe ist die Betrachtung von Strom aufgrund der hohen Einsatzflexibilität interessant. Branchenübergreifende Technologien wie elektrische Antriebe, Druckluft- und Pumpensysteme sowie Anlagen zur Kälteerzeugung und Klimatisierung, aber auch mechanischer Energie und Licht finden eine breite Anwendung in der Industrie und dominieren den elektrischen Energieeinsatz der Branchen. So werden circa 73 % des industriellen Stromverbrauchs durch die Nutzung und den Betrieb von Querschnittstechnologien wie Druckluft, Pumpen, Ventilatoren sowie Beleuchtungseinrichtungen verursacht. Circa 27 % des industriellen Stromverbrauchs entfällt auf prozessspezifische Technologien – z. B. auch Härteprozesse oder Fügeprozesse.



**Bild 11.3** Endenergieverbrauch in 2011 (AGEB 2014b) und Stromverbrauch 2008 (Fleiter 2008)

## 11.3 Technische Umsetzungsbeispiele

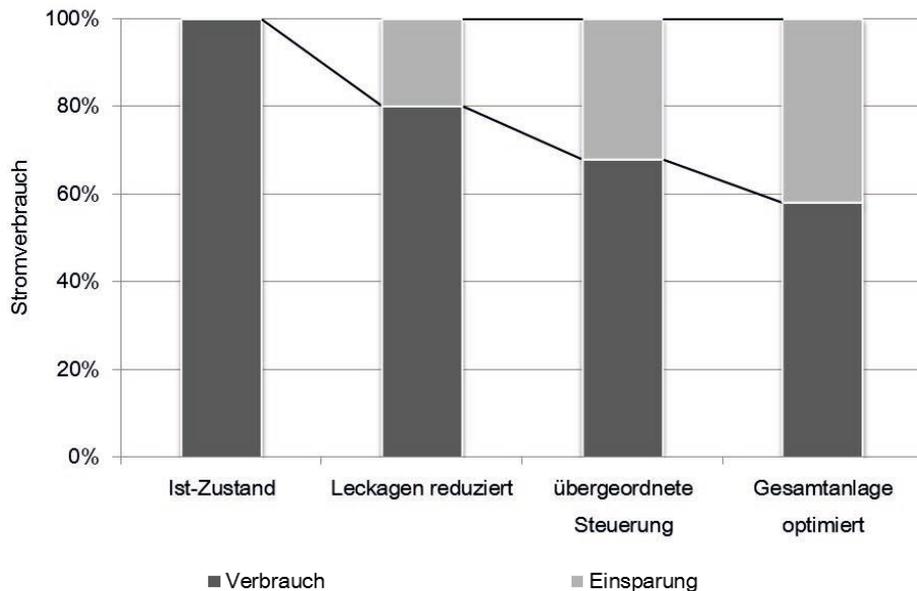
An ausgewählten technischen Beispielen werden Potenziale zur Steigerung der Energieeffizienz in der Produktion vorgestellt.

Mit über 60 000 installierten Anlagen und einem bundesweiten Verbrauch von jährlich circa 16 Mrd. kWh gehören Druckluftsysteme zu den weitverbreitetsten Querschnittstechnologien und kommen u. a. in folgenden Bereichen zum Einsatz (BMWi 2010b):

- Pneumatik,
- Aktivluft (Druckluft als Transportmedium),
- Prozessluft (z. B. Trocknungsprozesse) und
- Vakuumtechnik.

Der Energiekostenanteil für die Druckluftherzeugung liegt zwischen 20 und 80 % der Betriebskosten. Der Energiekostenanteil entlang des gesamten Lebenszyklus eines Druckluftsystems kann etwa 76 % erreichen (Dena 2006).

Die Druckluftkosten lassen sich mit Hilfe von Energieeffizienzmaßnahmen teilweise um bis zu 50 % reduzieren (BPA 2010). Einschätzungen der Industrie zeigt Bild 11.4.



**Bild 11.4** Energieeffizienzpotenziale in der Druckluft (Dena 2006)

Potenziale zur Verbrauchssenkung existieren die entlang der gesamten Prozesskette des Druckluftsystems (Dena 2012a):

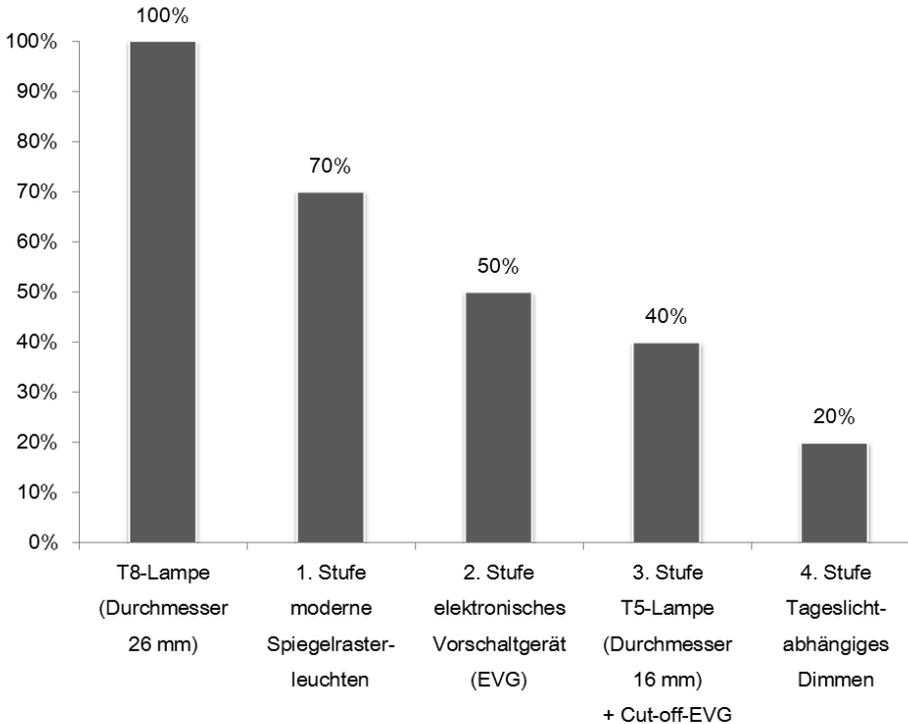
- **Erzeugung** – Optimierung durch effizientere Kompressoren und die Integration von Drehzahlreglern und somit optimale Anpassung an den tatsächlichen Verbrauch.
- **Verteilung** – Verbesserung der Leitungsgeometrie und Minimierung von Leckagen zur Vermeidung von Druckluftabfall und negativen Folgen auf Prozesszeiten und notwendige Luftmengen.
- **Regelung und Speicherung** – Druckluftspeicher stellen bei Bedarf kurzfristig Luftmengen zur Verfügung. Dadurch lassen sich Spitzen der Kompressorleistung reduzieren und die Drucklufterzeugungsanlage kleiner und kostengünstiger gestalten.
- **Wärmerückgewinnung** – der überwiegende Anteil der Energie zur Erzeugung von Druckluft wird in Wärme umgewandelt. Die Abwärme eines 18,5 kW Kompressors ersetzt bei einer Betriebszeit von 4000 Stunden pro Jahr ca. 74 000 kWh Erdgas für Heizenergie.

In Abhängigkeit der Branche kann der Anteil der Kosten für Beleuchtung an den Stromkosten zwischen 2 und mehr als 20% variieren. Der Energieverbrauch zur Beleuchtung kann mit unterschiedlichen Maßnahmen reduziert werden (Energieagentur NRW 2010):

- **Einsatz effizienter Leuchtmittel** – Beispiel: T5-Leuchtstoffröhren in Kombination mit elektronischen Vorschaltgeräten. Hiermit kann der Energieverbrauch um bis zu 90% im Vergleich zu herkömmlichen Glühbirnen gesenkt werden.
- **Lichtlenkung** – Durch eine verbesserte Lichtlenkung kann die Anzahl der eingesetzten Leuchtstoffröhren etwa um 30 bis 50% reduziert werden.
- **Leuchtenhöhe** – Durch die Verringerung der Leuchtenhöhe von 2,5 auf 2 m kann der Stromverbrauch um bis zu 20% gesenkt werden.

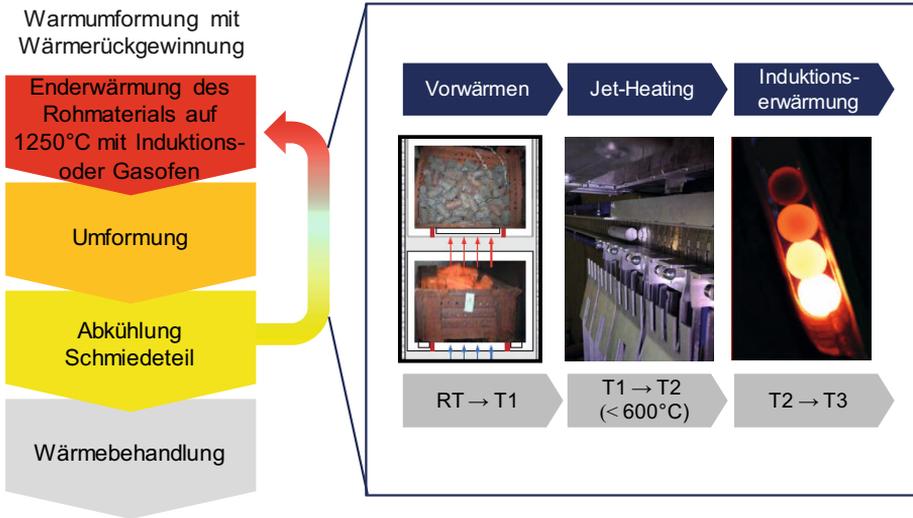
- **Lichtregelung und -steuerung** – z. B. durch Bewegungsmelder oder Helligkeitssensoren lassen sich noch bis zu 50 % der eingesetzten Energie einsparen.

Bild 11.5 verdeutlicht die erreichbaren Einsparquoten in Abhängigkeit des vorherrschenden Technologiestandes. Ausgehend von einer verhältnismäßig ineffizienten T8-Leuchtstoffröhre, die in der Industrie derzeit nur noch einen geringen Bestand aufweist, lässt sich der Energiebedarf um bis zu 80 % reduzieren.



**Bild 11.5** Energieeffizienzpotenziale in der Beleuchtung in der Industrie (*Energieagentur NRW 2010*)

Aufgrund des hohen Anteils an Wärmeanwendungen in der Industrie (Bild 11.3) stellt die **Abwärmerückgewinnung** einen wesentlichen Hebel zur Steigerung der Energieeffizienz dar. Vor einer Verstromung von Abwärme z. B. mittels ORC-Anlagen sollte überlegt werden, ob die in Produktionsprozessen entstehende Abwärme nicht innerhalb der Produktionsprozesse weiterverwendet oder in der Produktionsperipherie genutzt werden kann. Grundsätzlich ist auch bei der Nutzung von Abwärme eine Verschlechterung der Produktivität oder Qualität zu vermeiden. Als Beispiel dient ein Schmiedeprozess mit Wärmerückgewinnung (Bild 11.6)



**Bild 11.6** Prinzip der Nutzung von Abwärme aus Schmiedeteilen

Von den fertigen Schmiedeteilen erfolgt im dargestellten Beispiel eine Wärmeübertragung an die zu schmiedenden Rohlinge. Diese können hierbei von Raumtemperatur (RT) auf über 100 °C (T1) erwärmt werden. Anschließend können die Rohlinge mittels eines heißen Prallstrahls, einem sogenannten Jet-Heating, auf unter 600 °C (T2) erwärmt, um abschließend mittels Induktion auf Endtemperatur (T3) gebracht zu werden. Bei der Erhitzung vor der Induktionserwärmung sollten die Bauteile unter 600 °C verbleiben, um Verzunderung zu vermeiden. Ein solcher Aufbau kann zu einer Rückgewinnung von 0,42 PJ Abwärme pro Jahr im 2-Schicht-Betrieb bzw. zu einer Einsparung von 0,92 PJ Strom pro Jahr bei einem Wirkungsgrad des Induktionsofens von 45 % führen (Herbertz 2012).

# Sachwortverzeichnis

## Symbole

- 2D-CAD/CAM 364
- 3D-CAD/CAM 365
- 3D-Druck 53
  - Anwendung 57
  - Direct Croning 56
  - Fused Deposition Modelling 54
  - Layer Object Manufacturing 54
  - Poly Jet Verfahren 54
  - selektives Lasersintern 56
  - Stereolithographie 55
  - Verfahrensvergleich 59

## A

- Abbrennstumpfschweißen 241
- Abdichten 297
- Abdunstung 298
- Abrasiv-Wasserstrahlschneiden 218
- Abschneiden 126
- Abtragen 208
  - chemisches 208
  - elektrochemisches 208
  - mechanisches 208
  - thermisches 208
- Abwärmerückgewinnung 429
- Achse, gesteuerte 351
- additive Fertigungsverfahren 53
- aerodynamische Lager 318
- aerostatische Führung 313
- aerostatische Lager 318
- Airless-Spritzen 280
- Anfahrblock 28
- Anguss 33
- Antriebsleistung 445
- Antrieb (Werkzeugmaschine) 318
- arbeitsgebundene Maschine 340

- Arbeitsplan 20
- Arbeitsplatz 16
- Arbeitsspindel 175
- Arbeitszeitmodell 422
- arithmetische Stufung 332
- Asynchronmotor 319
- Attritor 46
- Aufbauschneide 158
- Aufbohren 177
- Ausbröckelung 158
- Ausklinken 126
- Ausschneiden 126
- Außendrehen 173
- Außenhonen 200
- Außenplanräumen 188
- Außenräumen 188
- Außenrundräumen 188
- Auswahl von Fertigungsverfahren 19
- Autogenschweißen 225
- Automat 377
- Automatisierung 377
  - flexible 347
- AV-Programmierung 366

## B

- Bahnsteuerung 354, 408
- Bandsägen 190
- Bandschleifen 195
- Bandschleifmaschine 198
- Bandspäne 143
- BDE 378
- Bearbeitungsstation 383
- Bearbeitungssystem 383
- Bearbeitungszentrum 337, 418
- bedienerarme Nachtschicht 423
- Beißschneiden 125

Belastungskenngrößen 399  
Beleuchtung 428  
Beschichten 18, 270  
Beschichtungsmaterial 275  
Beschneiden 126  
Beschriften 214  
Bettfräsmaschine 185  
Bettkonstruktion 304  
beweglicher Frässpindel 419  
Bewegungsachse 395  
Bezugssystem 355  
Biegen 104, 435  
Blechniederhalter 115  
Blechniederhalterkraft 106  
Blechschnneiden 441  
Blechumformen 104, 435  
Blindnieten 257  
Bohren 138, 176  
Bohrmaschine, stationäre 181  
Bördeln 262  
Breiten 81  
Buckelschweißen 240  
Bügelsäge 192  
bürstenloser Servomotor 324

**C**

CAD 377  
CAM 344, 378  
CAP 377  
CAQ 378  
CBN – Kubisch kristallines Bornitird 155  
Cermets 155  
C-Gestell 304  
Chemical Vapor Deposition 271, 274  
chemische Industrie 15  
chemisches Abtragen 208  
Chips 207  
CIM 378  
Clinchen 260  
CNC 344  
CNC-Maschine 323  
CNC-Stanzmaschine 420  
CNC-Steuerung 346  
Coil Coating 296  
Cold Box 28  
Computer Aided Manufacturing – CAM 344  
Computerized Numerical Control – CNC 344  
Croningverfahren 31  
CVD-Verfahren 271, 274  
Cyber-Physisches Produktionssystem 382

**D**

Decklackierung 298  
Diamant 155  
Diffusionslötten 242  
Digitalisieren 372  
Direct Croning 56  
Direct NC – DNC 344  
DNC 344  
Doppelgreifer 420  
Doppelgurt-Transportsystem 385  
Doppelstab-Käfigläufer 319  
Doppelungen 118  
Doppelwinkelhand 398  
Drahterodieren 211  
Drahtflammspritze 288  
Drahtziehen 99, 433  
Drallrichtung 179  
Drallwinkel 179  
3D-Druck 53  
Drehachse 355  
Drehen 138, 172  
Drehmaschine 335  
Drehmaschinenfutter 174  
Drehstrommotor 320  
– Asynchronmotor 320  
– Synchronmotor 324  
Drehstrom-Servoantrieb 324  
Drehstrom-Synchronmotor 324  
Drehtisch 405, 416  
Drehwerkzeug 153 f.  
Drehzahl 150, 446  
Drehzahlsteuerung 322  
Drehzelle 352  
Drücken 118, 122  
Druckfließbläppen 202  
Druckluft 427  
– schrauber 266  
– spritzen 280  
– systeme 427  
– zerstäuber 283  
Drückwalzen 87, 120  
Durchlaufofen 251  
Durchlaufzeit 420  
Durchsetzfügen 260

**E**

Eckenwinkel 138  
Editor-Programmierung 362  
Eindrücken 90  
Einfachwerkzeug 131

einhubiges Schneiden 128  
 Einlegegerät 392  
 Einrasten 268  
 Einscheibenlappen 202  
 Einschienenhängebahn 384  
 Einspindelschrauber 266  
 Einstechrundkneten 102  
 Einstellwinkel 138  
 Einzelmaschine 380  
 Eisenpulverkorn 46  
 Electro Chemical Machining (ECM) 208  
 elektrochemisches Abtragen 208  
 elektrochemisches Entgraten 206  
 elektrolytische Tauchabscheidung 272, 293  
 Elektroschrauber 266  
 elektrostatische Pulverbeschichten 294  
 elektrostatisches Pulverauftragen 286  
 elektrostatisches Spritzen 271  
 elektrostatisches Spritzverfahren 281  
 Elektrotauchen 77  
 Elektrotauchemaillieren 286  
 Elektrotauchlack 276  
 Elektrotauchlackieren (ETL) 278  
 Emaillieren 271, 285  
 Endenergie 424  
 Endenergieproduktivität 425  
 Energieeffizienz 424  
 Energiekosten 425  
 Engen 120  
 Engpassmaschine 411  
 Entgraten 205  
 – elektrochemisches 206  
 – thermisches 206  
 Entgratstrahlen 204  
 Erodieren 209, 213  
 Exzenter 326

## F

Fahrerloses Transportsystem 385  
 Falten 118  
 Falzen 118, 262  
 Farbmittel 275  
 Feinguss 31  
 Feinhonen 200  
 Feinschneiden 129  
 Feinschneidpresse 130, 341  
 Feinschnitt 131  
 Fertigung, industrielle 14  
 Fertigungsautomatisierung 374, 377ff.  
 Fertigungsdurchlaufzeit 421

Fertigungskosten 166  
 Fertigungsorganisation 422  
 Fertigungsstruktur 422  
 Fertigungssystem, flexibles 381  
 Fertigungstechnik 13  
 fertigungstechnische Industrie 15  
 Fertigungsverfahren 18f.  
 – additive 53  
 – Auswahl von 19  
 – spannendes 172  
 – trennendes 125  
 – umformendes 64  
 Fertigungszeit 166  
 Feuerverzinken 290  
 Filmbildner 275  
 Fixkosten 22, 410, 422  
 Flachführung 309  
 Flachsleifmaschine 198, 338  
 Flachwalzen 85  
 flexible Automatisierung 347, 377  
 flexibles Fertigungssystem 381  
 Fließpressen 92, 111, 433  
 Fließspan 141  
 Flügelzellenpumpe 319  
 Flugzeugbau 257  
 Flussmittel 243  
 Folgeverbundwerkzeug 131  
 Folgewerkzeug 131  
 Formänderung 431  
 Formänderungsarbeit 73, 432  
 Formänderungsfestigkeit 432  
 Formdrehen 173  
 Formenbau 352, 372  
 Formerei 41  
 Formfräsen 183  
 Formgebung 46  
 Formkasten 29  
 Formung, maschinelle 30  
 Formverfahren 29  
 Formwerkzeug 415  
 Fräsbearbeitung 153f.  
 Fräsen 182, 213  
 Fräsmaschine 337, 352, 419  
 Frässpindel, bewegliche 419  
 Fräswerkzeugköpfe 185  
 freies Innenhochdruckumformen 124  
 Freiflächenverschleiß 158  
 Freiformen 78  
 Freistauchen 76  
 Freiwinkel 137  
 FTS 385

Fügen 18, 221  
– durch Umformen 255  
Führung 308  
– aerostatische 313  
– hydrodynamische 311  
– von Werkzeugmaschinen 311  
Führungsfläche 310  
Füllerapplikation 298  
Füllstoff 275  
funkenerosives Schleifen 211  
funkenerosives Schneiden 211  
funkenerosives Senken 211  
Fused Deposition Modelling (3D-Druck) 54

## G

Galvanisieren 272, 291  
Gegenlaufräsen 138, 184  
Gegenschlaghammer 340 f.  
Genauschneiden 129  
geometrisch bestimmtes Schneiden 172  
geometrisch unbestimmtes Schneiden 193  
geometrische Stufung 332  
Gesamtwerkzeug 131  
Gesamtziehverhältnis 108, 437  
Gesenkbiegen 104  
Gesenkbiegepressen 105  
Gesenkformen 78  
Gesenkstauchen 76  
Gestell 302  
Gestellbaustoff 306  
Gestellgeometrie 304  
gesteuerte Achse 351  
gestreckte Länge 435  
Getriebe 326  
Gewindeformen 91  
Gewindefräser 184  
Gewindespindel 326  
Gewindewalzen 86  
Gießen 27  
– in Dauerformen 35  
– in verlorene Formen 28  
Gießkarussell 35  
Glasfaser 235  
Glattwalzen 86  
Gleichlauf-Fräsen 184  
Gleichstrommotor 319  
Gleitziehen 98, 100  
grafische Programmierung 363  
Granulat 26  
Greiferbauformen 402

Greifersystem 401  
Grundierung 297  
Grünkörper 46  
Grünling 46  
Gruppenarbeit 422  
Gussputzerei 28, 42

## H

Halbwarmstauchen 76  
Halbwarmumformen 70 f.  
Halbzeuge 27  
Hammer 340  
Handbohrmaschine 181  
Handformen 29  
Handhabungseinrichtung 383  
Handhabungsmaschine 392  
Handsäge 192  
Hartlöten 246, 249 ff.  
Hartmetall 154  
Hartstoff 155  
Hartzerspannung 170  
Hauptantrieb 319  
Hauptnutzungszeit 149 f., 410, 445  
Hauptspindel 355  
Heftschweißen 225  
heiß isostatisches Pressen (HIP) 47, 49 f.  
Hexapoden 305  
High-Solid-Lack 276  
Hilfsstoff 275  
Hochgeschwindigkeitsfräsen 183  
Hochgeschwindigkeitslagerung 317  
Hochgeschwindigkeitsschleifen 195 f.  
Hochgeschwindigkeitszerspannung 167  
Hochleistungsschnellstahl (HSS) 153  
Hochleistungszerspannung 170  
Hochprofil walzen 85  
höhere Programmiersprache 363  
Hohlfießpressen 94  
Hohlprägen 91  
Hohlpressen 93  
Honen 199  
Honwerkzeug 200  
Horizontalfräsmaschine 337  
Hot Box 28  
HPC – High Performance Cutting 170  
HSC – High Speed Cutting 167, 183  
Hubsägen 190  
Hydraulik-Motor 322  
Hydraulikzylinder 326  
hydraulische Presse 340

hydrodynamische Führung 311  
 hydrostatische Gleitlagerung 198  
 hydrostatisches Strangpressen 93

## I

Impulsschweißen 215  
 Industrie  
 – chemische 15  
 – fertigungstechnische 15  
 industrielle Fertigung 14  
 Industrieroboter 231, 393  
 Industrieroboterprogrammierung 408  
 Industrierobotersteuerung 405  
 Informationsflusssystem 383  
 Injektorbrenner 225  
 Innendrehen 173  
 Innenhochdruckumformen, freies 124  
 Innenhochdruck-Umformen (IHU) 123  
 Innenhochdruckumformen, werkzeuggebundenes 124  
 Innenhonen 200  
 Innenräumen 188

## K

Kalteinsenken 90  
 Kaltkammergießmaschine 37  
 Kaltstauchen 76  
 Kaltumformen 70  
 Kaltumformung 71  
 Kaltwalzen 85  
 Kammriss 158  
 Kantenbruch 158  
 Kapitalbindung 420  
 Kapitalrendite 19  
 Karusselldrehmaschine 335  
 katodische Tauchlackieren (KTL) 278  
 Kegelradgetriebe 330  
 Keilriemengetriebe 333  
 Keilwinkel 137  
 Kernbohren 177  
 Kernmacherei 41  
 Kettenradfertigung 131  
 Kettensägen 190  
 Kettentrieb 333  
 Kleben 252  
 Kleinstbohrer 180  
 Klemmhalter 153f.  
 Klipsen 268  
 Knickbiegen 105

Kniehebel 326  
 Kokille 26, 35  
 Kokillenguss 41  
 Kolkung 158  
 Komplettbearbeitung 421  
 Konsolfräsmaschine 185  
 Konstruktionszeichnung 356  
 kontinuierliches Schneiden 128  
 Koordinatensystem 351  
 Kopiersteuerung 371  
 Korndurchmesser 194  
 Korrekturfaktor 435, 437  
 Kosten  
 – fix 410  
 – variabel 410  
 kostenoptimale Schnittgeschwindigkeit 448  
 kostenoptimale Standzeit 165f., 448  
 kraftgebundene Maschine 340  
 Kraftsensor 390  
 Kreissägen 190  
 kubisch kristallines Bornitrid (CBN) 155  
 Kühlschmierstoff 156  
 Kühlschmierung 156  
 Kunststoffspritzguss 38  
 Kurbelpresse 339  
 Kurbeltrieb 326  
 Kurvenscheibe 326  
 Kurvensteuerung 370  
 Kurzhubhonen 200  
 Kurzschlussläufer 320

## L

Lackieren 275  
 Lacksystem 275f.  
 Lager  
 – aerodynamische 318  
 – aerostatische 318  
 Lagerung 309, 315  
 Langdrehmaschine 335  
 Länge, gestreckte 435  
 Langhubhonen 200  
 Längsdrehen 173  
 Längswalzen 85  
 Läppen 201  
 Läppgemisch 201f.  
 Läppkörner 201  
 Läppmittel 202  
 Läppwerkzeug 202  
 Laserauftragsschweißen 58  
 Laserbearbeitung 214

Laserbrennschneiden 216 f.  
Laserschneiden 215  
Laserschneidmaschinen 215  
Laserschweißen 235, 251  
Lasersintern 49, 56  
Laserstrahlschweißen 233, 249 f.  
Lauf 33  
Layer Object Manufacturing (3D-Druck) 54  
Leckagen 428  
Leistungsbedarf 148  
Leuchtenhöhe 428  
Leuchtmittel 428  
Lichtbogenbolzenschweißen 230  
Lichtbogenhandschweißen 228  
Lichtbogenschweißen 227  
Lichtbogenspritze 289  
Lichtlenkung 428  
Lichtregelung und -steuerung 429  
Linearachse 355  
Linearmotor 324  
Lochen 126  
Logiksteuerung 342, 368  
Lösemittel 275  
Losgröße 410 f.  
Lost-foam-Formverfahren 33  
Lost-foam-Verfahren 29, 33  
Lötbarkeit 243  
Löten 242  
Lötschwall 244  
Lötwellen 244 f.  
Lünetten 174

## M

MAG-Schweißen 230, 249 ff.  
Make or Buy 24  
Manipulator 392  
manuelle Programmierung 361  
Maschine  
– arbeitsgebundene 340  
– kraftgebundene 340  
– weggebundene 339  
maschinelle Formung 30  
Maschinenbelegungszeit 410  
Maschinenbett 175  
Maschinen-Nullpunkt 356  
Maschinenstundensatz 166  
Maskenformverfahren 31, 33  
Massivprägen 90  
Massivumformen 76, 431  
Materialflusssystem 383

Matrize 106, 131  
maximale Umformkraft 73  
Maximallast 400  
MDE 378  
mechanisches Abtragen 208  
Mehrfachwerkzeug 131  
Mehrschlittendrehmaschine 352  
Mehrspindeldrehmaschine 335  
Mehrspindelschrauber 266  
Messerschneiden 125  
Metall-Aktivgas-Schweißen MAG 230  
Metallbandsäge 192  
Metall-Inertgas-Schweißen MIG 230  
Metallkreissäge 192  
Metall-Schutzgas-Schweißen 230  
MIG-Schweißen 231, 249 ff.  
Minimalmengenschmierung 157  
MKD (Monokristalliner Diamant) 155  
Modell 29  
Modellbau 41  
Momentsensor 390  
Montage 222  
Motor  
– Asynchronmotor 320  
– Synchronmotor 324  
Motorspindel 319, 321  
Mutter 264

## N

nass-elektrostatisches Spritzen 286  
Nass-Spritzen 286  
NC-Programmierung 359  
NC-Satz 359  
Near-net-shape-Produktion 51  
Nebenantrieb 318, 323  
Nebennutzungszeit 410  
Neigungswinkel 138  
Nennlast 399  
Nibbelmaschine 128  
Nibbeln 128, 216 f.  
Niederdruckguss 36  
Niederdruck-Kokillenguss 37  
Niederhalter 106  
Niederhalterkraft 108, 437  
Nieten 256  
Nocke 326  
Normalschnitt 131  
Normzahl-Reihe 332  
Nullpunkt 355  
Nullpunkt eines CNC-Programms 356

Numerical Control 344  
 numerische Steuerung (NC) 344  
 Nutzenergie 424

## O

Oberflächenrauigkeit 162, 446  
 Oberflächenverbesserung 200  
 Oberflächenveredelungsstrahlen 204  
 Offen-Schneiden 128  
 Optimierung der Zerspanung 164  
 ORC-Anlage 429  
 Oxidieren 272, 293

## P

Passivkraft 144  
 PDM 377  
 Pendelbearbeitung 416  
 Peripheriegerät 395, 403  
 Physical Vapor Deposition 271, 273  
 Pick-and-Place 393  
 Pick-up-Drehmaschine 335  
 Pilgerschrittwalzwerk 100  
 PKD (Polykristalliner Diamant) 155  
 PKW-Lackieranlage 297  
 PKW-Serienlackierung 296  
 Plandrehen 173  
 Planen 348  
 Planetengetriebe 333  
 Planfräsen 182  
 Planhonen 200  
 Planläppen 202  
 Planschleifen 195  
 Plansenken 177  
 Plasmaschweißen 232  
 PLM 378  
 Pneumatik-Motor 323  
 Pneumatikzylinder 326  
 Poly Jet Verfahren (3D-Druck) 54  
 Polymerbeton 306  
 Portal-Gestell 305  
 Portalroboter 420  
 Positionierer 404  
 Power and Free Förderer 385  
 PPS 378  
 Presse 341  
 – hydraulische 340  
 Pressen 49f.  
 – heiß isostatisches 50  
 Primärenergie 424

Primer 254  
 Prismenführung 310  
 Produktivität 416  
 Profilbohren 177  
 Profildrehen 173  
 Profilfräsen 183  
 Profilschleifen 196  
 Profillumformen 104, 435  
 Profilwalzen 85  
 Programm 361  
 Programmerstellung 366  
 Programmieren  
 – direkt 408  
 – grafisch 363  
 – grafisch-interaktiv 409  
 – indirekt 409  
 – manuell 361  
 – Play-back 409  
 – Teach-in 408  
 – textuell 409  
 Programmierregel 360  
 Programmiersprache, höhere 363  
 Programmierverfahren 361  
 Programm-Nullpunkt 356  
 Programmsteuerung 342, 370  
 Prozessgas 234  
 Puffer 387  
 Pulver 26  
 Pulverauftragen, elektrostatisches 286  
 Pulverbeschichten 296  
 – elektrostatisches 294  
 Pulverflammspritze 288  
 Pulverherstellung 44  
 Pulvermetallurgie 46  
 Pulverschmieden 46, 49f.  
 Pulverspritzguss 49f.  
 Punktschweißen 238  
 Punktsteuerung 353, 406  
 PVD-Verfahren 271, 273

## Q

Qualität 21  
 Querfließpressen 94  
 Querkeilwalzen 88  
 Querschnittstechnologien 426  
 Querwalzen 85f.

**R**

Radialbohrmaschinen 181  
Rändeln 92  
Randzonenerwärmung 199  
Rapid Prototyping 33, 61  
Rapid Tooling 61  
Rationalisierung 376  
Räumen 187  
Reckwalzen 87  
Referenzpunkt 356  
Reflowlöten 245  
Regeln 348  
Reibahle 180  
Reiben 176  
Reibpaarung 317  
Reibradgetriebe 333  
Reibschweißen 241  
Reinigen 203  
Reinigungsstrahlen 204  
Reißspan 141  
Rohrbiegemaschinen 105  
Rollbiegen 105  
Rollen 118  
Rollnahtschweißen 239  
Rotationsgetriebe 329  
– schaltbare 332  
Rotationszerstäuber 282  
Rotor 319  
Rückfederung 104  
Rückfederungsfaktor 435  
Rückwärtsfließpressen 94  
Rückwärtsstrangpressen 93  
Rundbiegen 105  
Runddrehen 173  
Rundfräsen 182  
Rundführung 311  
Rundhonen 200  
Rundkneten 101  
Rundlappen 202  
Rundschleifmaschine 198, 338  
Rüstzeit 410

**S**

Sägen 190  
Sandaufbereitung 41  
Sandguss 28, 39  
Sandkerne 29  
Satzfräser 185  
Schafffräser 185  
schaltbare Rotationsgetriebe 332

Schaltbefehl 342  
Scheibenfräser 184  
Scherschneiden 125, 127, 129  
Scherspan 141  
Schichtzeitmodell 422  
Schlagschrauber 266  
Schleifen 195  
– funkenerosives 211  
Schleifmaschine 338  
Schleuderguss 39  
Schlichten 173  
Schlichterodieren 209  
Schlitten 308  
Schlittenbezugspunkt 356  
Schlüsselindustrie 302  
Schmelzbetrieb 41  
Schmelze 26  
Schmelzlöten 242  
Schnappverbindung 268  
Schneckengetriebe 330  
Schneiden 441  
– einhubiges 128  
– funkenerosives 211  
– geometrisch bestimmtes 172  
– geometrisch unbestimmtes 193  
– kontinuierliches 128  
Schneidengeometrie 140  
Schneidkeramik 155  
Schneidkörner 194  
Schneidplattenwerkzeug 153 f.  
Schneidspalte 129  
Schneidstoff 151, 194  
Schneidstoffgruppe 153  
Schneidstoffform 155  
Schneidvorgang 126  
Schneidwerkzeug 133, 138  
Schnittarbeit 441  
Schnittbewegung 136  
Schnittfläche 135  
Schnittgeschwindigkeit 135 f.  
– kostenoptimale 448  
– zeitoptimale 448  
Schnittkraft 127, 144, 146, 441, 444  
– bei drückendem Schnitt 127  
– bei ziehendem Schnitt 127  
Schnittkraftberechnung 444  
Schnittkraftmessung 147  
Schnittleistung 415, 445  
Schnittlinie 134  
Schnitttiefe 136  
Schnittwerkzeug 128

- Schrägwalzen 85*f.*  
 Schraubbohren 177  
 Schraubdrehen 173  
 Schrauben 264  
 Schraubverbindung 264  
 Schruppen 173  
 Schrupperodieren 209  
 Schutzgasschweißen 230  
 Schwalbenschwanzführung 310  
 Schweißaggregat 228  
 Schweißen 224  
 Schweißsteuerung 237  
 Schwenkbiegemaschinen 105  
 Schwenkbiegen 105  
 Schwerkraftgießen 34  
 Schwerkraftguss 33, 35  
 Schwerkraft-Kokillenguss 36  
 Schwingläppen 202  
 Seiltrommel 326  
 Seitenspanwinkel 179  
 Sekundärenergie 424  
 selektives Lasersintern (3D-Druck) 56  
 Senken 176  
 – funkenerosives 211  
 Senkerodieren 211  
 Senkerodiermaschine 211  
 Senkrechtdrehen 173  
 Sensor 388, 390  
 Servomotor, bürstenloser 324  
 Servosteuerung 369  
 Sicken 118  
 Sintern 43, 49*f.*  
 Sinterteile 46  
 Spachteln 271  
 Spanart 141  
 Spanbildung 139*f.*  
 spanendes Fertigungsverfahren 172  
 spanende Werkzeugmaschine 335  
 Spanen/Fügen 75  
 Spanform 143  
 spanloses Trennen 125  
 Spannpalette 416  
 Spannzange 175  
 Spannungsbreite 138  
 Spannungsdicke 138  
 Spannungsgröße 139  
 Spanwinkel 137  
 Speichermedien 343  
 speicherprogrammierbare Steuerung 368  
 Speiser 34  
 Spindel 315  
 Spindellager 315  
 Spindelpresse 340  
 Spiralbohrer 180  
 Spiralspäne 143  
 Spitzenlosschleifen 196  
 Spitzenwinkel 179  
 Spritzen  
 – elektrostatisches 271  
 – nass-elektrostatisches 286  
 – thermisches 287  
 Spritzlackieren 271, 279  
 Spritzverfahren, elektrostatisches 281  
 Sprühnebel 157  
 SPS 368  
 Stabelektrode 227  
 Stabkinematik 305  
 Stahlbrammen 28  
 Stahlschweißkonstruktion 306  
 Ständer 319  
 Standmenge 163  
 Standweg 163  
 Standzeit 162  
 – kostenoptimale 448  
 – zeitoptimale 448  
 Standzeitberechnung 447  
 Stanznieten 258  
 – mit Halbhohl Niet 259  
 stationäre Bohrmaschine 181  
 Stator 319  
 Stauchen 76, 81, 433  
 Steigen 81  
 Steigung der Standzeitgeraden 165  
 Stempel 131  
 Stempelangriffspunkt 441  
 Stereolithographie (3D-Druck) 55  
 Steuern von WZM 348  
 Steuerung  
 – numerische NC 344  
 – speicherprogrammierbare 368  
 – von Werkzeugmaschinen 342  
 Stirnfräsen 183*f.*  
 Stirnradgetriebe 333  
 Stirnschleifen 196  
 Stoffeigenschaften ändern 18  
 Stopfenwalzwerk 100  
 Strahlen 203  
 Strahlspanen 203  
 Stranggießen 27  
 Stranggussanlage 28  
 Strangpressen 92, 97*f.*, 341, 434  
 – hydrostatisches 93

Streckensteuerung 354  
Streckziehen 114  
Streifenlichtprojektion 372  
Stückkostendegression 22  
Stückzahl 22  
Stufensprung 332  
Stufung 332  
Superfinishen 200

## T

Tangentialstreckziehen 115  
Tauchabscheidung, elektrolytische 272, 293  
Tauchbad 244  
Tauchbadlöten 245  
Tauchen 290  
Tauchlackieren 271, 277f.  
Teach-in Programmierung 363, 408  
thermisches Abtragen 208  
thermisches Entgraten 206  
thermisches Spritzen 287  
Thermojet-Verfahren (3D-Druck) 54  
Tiefbohren 177  
Tieflochbohrer 180  
Tiefschleifen 196  
Tiefschweißeffekt 233  
Tiefziehen 106, 111, 122, 437  
– mit elastischen Werkzeugen 112  
– mit Wirkmedien 113  
Tiefziehpresse 341  
Tisch 308  
T-Nutenfräser 185  
Torque-Motor 320  
Translationsgetriebe 326  
Transportsystem 384  
Trennen 18  
– spanloses 125  
trennendes Fertigungsverfahren 125  
Trennschleifen 195  
Trennstrahlen 204  
Trockenbearbeitung 157  
Trockenzerspanung 170  
Trommelgleitspanen 206

## U

Überwachung 383  
Überwachungssensor 391  
U-Biegen 104  
Ultraschallreinigen 204  
Ultraschallschweißen 241

Umfangsräsen 183  
Umfangsschleifen 196  
Umformbetriebe 70  
Umformen 18, 66, 75  
umformendes Fertigungsverfahren 64  
Umformgrad 431  
Umformkraft 432  
– maximale 73  
Umformmaschinen 75  
Umformstufen 99  
Umformwerkzeug 131  
Umlaufvermögen 410f., 420  
Universalfräsmaschine 337  
unlösbare Verbindung 224  
Unrunddrehen 173  
Unterbodenschutz 297  
Unterpulverschweißen 228  
Urformen 18, 26

## V

Vakuumgießen 33  
V-Biegen 104  
Verbindung, unlösbare 224  
Verbundkonstruktion 307  
Verfahrenheiten 403  
Verfahren, abtragende 208  
Verfahrensvergleich 122, 216  
– 3D-Druck 59  
Verfahrgeschwindigkeit 401  
Verfestigungsstrahlen 204  
Verkettung 383, 386f.  
Verputzen 271  
Verschleißauswirkung 160  
Verschleißfaktor 165  
Verschleißform 158  
Verschleißmarkenbreite 162  
Verteilzeit 410  
Vertikaldrehmaschine 335  
Vertikalfräsmaschine 337  
Vibrationsgleitspanen 206  
Vielpunktsteuerung 407  
Vollfließpressen 94  
Vollkantig-Schneiden 128  
Vollnieten 256  
Vollprägen 90  
Vollstrangpressen 93  
Volumenkonstanz 72, 431  
Vorschubantrieb 323  
Vorschubbewegung 136  
Vorschubgeschwindigkeit 135f., 150, 446

Vorschubkraft 144  
 Vorschubrichtungswinkel 135  
 Vorschubrundkneten 101  
 Vorschubweg 151  
 Vorwärtsfließpressen 94  
 Vorwärtsstrangpressen 93

## W

Waagerechtdrehen 173  
 Wachsauerschmelzformen 33  
 Wachsauerschmelzverfahren 31  
 Walzbiegen 104  
 Walzen 84, 97f.  
 Walzenfräser 184  
 Walzenstirnfräser 184  
 Wälzfräsen 183  
 Wälzführung 310, 312  
 Wälzlager 317  
 Walzprofilieren 97f., 116  
 Walzrichten 117  
 Walzziehen 97f., 117  
 Wärmeanwendungen 426  
 Wärmerückgewinnung 428f.  
 Warmkammerdruckguss 37  
 Warmstauchen 76  
 Warmumformen 70, 72  
 Warmwalzen 85  
 Wartezeit 421  
 Wasserlack 276  
 Wasserstrahlschneiden 218  
 Wechselsysteme 402  
 Wegbefehl 342  
 weggebundene Maschine 339  
 Wegmesssystem 349  
 Wegmessung 351  
 Weichlöten 244  
 Weiten 119  
 Wendelspane 143  
 Werkstattprogrammierung 367  
 Werkstück-Nullpunkt 356  
 Werkstückoberfläche 160  
 Werkstückwechsel 418  
 Werkstückwechselzeit 416  
 Werkzeug  
 – mit Plattenführung 131  
 – mit Säulenführung 131f.  
 – ohne Führung 131  
 Werkzeugbau 41  
 Werkzeuge für Umform- und Schneidvorgänge  
 131

werkzeuggebundenes Innenhochdruckumformen  
 124  
 Werkzeugkorrekturspeicher 359  
 Werkzeugmaschine 300f.  
 – spanende 335  
 Werkzeugmaschinenführung 309  
 Werkzeugmaschinengestell 302  
 Werkzeugrevolver 175  
 Werkzeugschlitten 175  
 Werkzeugstahl (WS) 153  
 Werkzeugsystem 383  
 Werkzeugverschleiß 157  
 Werkzeugwechsel 419  
 Werkzeugwechselzeit 165  
 Wettbewerbsfähigkeit 302  
 Widerstandspressschweißen 236  
 Wiederholgenauigkeit 401  
 WIG-Schweißen 231  
 Winkelhand 398  
 Wirbelsintern 272, 293  
 Wirkbewegung 341  
 Wirkrichtungswinkel 135  
 Wirrspäne 143  
 Wirtschaftsingenieure 17  
 Wirtschaftlichkeit 22  
 Wolfram-Inertgas-Schweißen WIG 231

## Z

Zahnrad 326  
 Zahnradgetriebe 332f.  
 Zahnriemen 326, 330  
 Zahnstange 326  
 Zeit je Einheit 410  
 zeitoptimale Schnittgeschwindigkeit 448  
 zeitoptimale Standzeit 165, 448  
 Zelle 381  
 Zentralhand 397  
 Zentrierbohrer 180  
 Zentrierspitze 174  
 Zentrum 381  
 Zerspanbarkeit 167  
 Zerspanung mit Minimalmengenschmierung 171  
 Zerspanungsbedingung 167  
 Zerspanungsleistung 144  
 Zerspanungsparameter 139  
 Zerspanungstechnik 133, 443  
 Zerteilen 125  
 Zerteilwerkzeug 131  
 Ziehfehler 108  
 Ziehkraft 108, 437

Ziehring 106  
Ziehspalt 106  
Ziehstempel 106  
Ziehverhältnis 108, 437

Zugumformen 114  
Zweischeiben-Läppmaschine 202  
Zwischenspeicher 388  
Zylinderhonen 200