

Interreg



EUROPÄISCHE  
UNION

Österreich-Tschechische Republik

Europäischer Fonds für regionale Entwicklung



# MASCHINENBAU

## Materialien in der Maschinen- bauindustrie



UNIVERSITY  
OF APPLIED SCIENCES  
UPPER AUSTRIA



EUROPÄISCHE UNION

# INHALT

1. Industrielle Materialien in der aktuellen Praxis.....	4
1.1. Beschreibung der einzelnen Materialgruppen .....	6
2. Allgemeine Materialeigenschaften .....	8
2.1. Physikalische Eigenschaften von Materialien .....	8
2.2. Materialmechanische Eigenschaften .....	9
2.3. Technologische Eigenschaften von Materialien .....	10
2.4. Chemische Eigenschaften .....	11
3. Kriterien für die Materialauswahl .....	12
3.1. Materialauswahl im Produktentwicklungsprozess .....	15
3.2. Materialauswahlverfahren.....	17
3.3. Verhältnis von Material und Technologie.....	18
3.4. Materialauswahl in Bezug auf die Umwelt.....	21
4. Kennzeichnung von Materialien .....	24
4.1. Einteilung und Kennzeichnung von Stählen nach europäischen Normen.....	24
4.2. Unlegierte Stähle .....	25
4.2.1. Gängige Qualitätsstähle .....	25
4.3. Legierte Stähle .....	27
4.3.1. Legierte Qualitätsstähle.....	27
4.3.2. Legierte Edelstähle .....	27
4.3.3. Abkürzungen für das Stahlkennzeichnungssystem .....	28
5. Numerische Symbole aus Stahl .....	29
5.1. Armierung von Stahl in einigen EU-Ländern.....	29
5.2. Stahlkennzeichnung nach DIN-Norm.....	30
5.3. Weltstahlproduzenten.....	33
6. Bewertung der Materialoberfläche .....	36
6.1. Materialoberflächenbewertung - Hauptparameter .....	37
6.2. Parameter zur Beurteilung der 3D-Oberflächenrauheit .....	40
6.3. Vergleich von 2D und 3D.....	42
7. Messgeräte und Programme .....	46
7.1. Optosurf QS 500.....	46
7.2. Software SW 500 .....	47

7.3.	Taylor Hobson Talysurf CLI .....	48
7.4.	Talymap .....	49
7.5.	Modul Texturierte Oberflächen .....	50
7.6.	Talymap Bekleidung.....	50
7.7.	Programm zur Analyse der Stufenhöhe .....	51
7.8.	Twist-Programm .....	51
7.9.	Mitutoyo Surfptest SJ-400.....	52
7.10.	Software Surfpak SJ/SV/PRO .....	53
7.11.	Surfer 9 Programm .....	53
8.	Materialien in der laufenden Produktion von Automobilen I. ....	54
8.1.	Kohlenstoffarme Stahlbleche und -bänder zum Kaltziehen.....	56
8.2.	Physikalische und metallurgische Eigenschaften von Stahl für die Automobilindustrie.....	58
8.3.	Interstitielle freie Stähle (IF-Stähle).....	58
8.4.	Kalthärtender (BH)-Stahl .....	59
8.5.	HSLA-Stähle.....	60
9.	Materialien in der aktuellen Automobilindustrie II. ....	61
9.1.	Mehrphasenstähle (CP, TRIP-Stähle) .....	61
9.2.	Dualphasenstähle (DP-Stähle).....	61
9.3.	Maraging-Stähle .....	62
9.4.	Warmgewalzte Bleche .....	63
9.5.	Kaltgewalzte Bleche .....	64
9.6.	Verzinkte Bleche im Automobilbereich.....	67
9.6.1.	Feuerverzinkte Stahlbleche.....	67
9.6.2.	Elektrolytisch verzinkte Bleche .....	68
9.6.3.	Im alkalischen Bad .....	68
9.6.4.	Im Säurebad .....	69
10.	Rostfreie Materialien .....	70
10.1.	Klassifizierung von Stählen nach ihrer chemischen Zusammensetzung:.....	70
10.1.1.	Rostfreie Stähle.....	71
10.1.2.	Austenitische Stähle.....	72
10.1.3.	Martensitischer Stahl .....	72
10.1.4.	Ferritische Stähle .....	72
10.1.5.	Austenitisch - ferritische (Duplex) Stähle .....	72

10.2.	Allgemeine Eigenschaften von rostfreien Materialien .....	73
10.2.1.	Kaltgewalzte Edelstahlbleche .....	73
10.2.2.	Warmgewalzte Edelstahlbleche .....	73
10.2.3.	Dekorative Stahlbleche .....	73
10.2.4.	Flachgewalzte Bleche .....	74
10.2.5.	Bleche mit spezieller Oberflächenbehandlung.....	74
10.2.6.	Boden-(Aufreiß-)Platten.....	74
11.	SSAB (schwedische rostfreie) Stähle .....	75
11.1.	Art der SSEB-Stähle .....	76
11.2.	Die aktuelle Produktpalette der SSSEB-Stähle:.....	76
11.3.	Umwelt und Recycling .....	78
12.	Verbundwerkstoffe I. ....	80
12.1.	Verbundwerkstoffe auf Polymerbasis.....	80
12.2.	Verbundwerkstoffe mit Metallmatrix .....	83
12.3.	Faserverstärkte Verbundwerkstoffe .....	84
13.	Verbundwerkstoffe II. ....	86
13.1.	Gesinterte metallische keramische Materialien .....	86
13.2.	Verbundwerkstoffe mit keramischer Matrix .....	86
13.3.	Monolithische keramische Materialien .....	87
13.4.	Keramische Verbundwerkstoffe.....	87
13.5.	Kohlefaser-Verbundwerkstoffe .....	88

# I. INDUSTRIELLE MATERIALIEN IN DER AKTUELLEN PRAXIS

Im Allgemeinen werden industrielle Materialien in Baustoffe, d.h. die Materialien zur Herstellung technischer Konstruktionen (Maschinenelemente, Gebäudeteile, elektrische und technische Komponenten usw.) und Hilfsstoffe (Öle, Kraftstoffe, Formstoffe, chemische Reagenzien, Kühlmittel usw.) unterteilt. Es ist notwendig, die Qualitätseigenschaften von Industriematerialien zu systematisieren. Zu diesem Zweck werden Variablen verwendet, die die Grundlage für die Bewertung und Messung bilden. Dies sind atomare, mechanische, thermische, chemische, elektrische, magnetische, akustische und optische Größen. Im Produktionsprozess wird das Verhalten von Materialien anhand technologischer Eigenschaften bewertet, die die Möglichkeit ihrer Verarbeitung in eine gewünschte Form oder die Möglichkeit, die geforderten Eigenschaften wie Gießbarkeit, Härte usw. zu erreichen, bestimmen. Ebenso müssen die technologischen Eigenschaften mit Standardmessgeräten bewertet werden, die auf Standardmethoden und -einheiten basieren[10],[12],[14],[71].

Derzeit sind etwa 20 000 Legierungen von Industriemetallen bekannt, von denen 12 000 Eisenlegierungen mit Legierungselementen wie C, Mn, Si, Cr, Ni, Mo, V, Nb, Ta, Ti, Zr und Verunreinigungen O, S, P usw. sind. Es gibt etwa 2 000 Aluminiumlegierungen mit Zusatzmetallen, wie Cu, Mg, Si, Zn, Mn, Ni, Sn, Fe, Pb, Zr und O, H-Verunreinigungen. Es gibt etwa 5 000 Kupferlegierungen mit Zusatzmetallen wie Zn, Sn, Al, Mn, Ni, Fe, Pb, Zr und O, H-Verunreinigungen. Andere Metalllegierungen werden in verschiedenen Industriezweigen eingesetzt. Die Hauptgruppen der in der aktuellen Praxis verwendeten Materialien sind in Abbildung 1.1 dargestellt.



Abbildung 1.1 Hauptmaterialgruppen[71]

Legende: Ocel - Stahl, Liatina - Guss, Kovy - Metalle, Zliatiny Kovov - Metalllegierungen, Kera- mika - Keramik, Oxidová - Oxidkeramik, Neoxidová - Nichtoxidkeramik, Sklo - Glas, Elastome- re - Elastomere, kaučuk - Kautschuk, Guma - Gummi, Polyméry - Polymere, Plastoméry - Plastomere, Duroméry - Duroplaste, Hybridní materiály - Hybridmaterialien, Kompozitát - Composites

Eine weitere Unterteilung der Industriemetalle basiert auf den geforderten physikali- schen Eigenschaften, die praktische Anwendung und andere Perspektiven ihrer Ver- wendung sind in Abbildung 1.2 dargestellt.



Abbildung 1.2 Klassifizierung der Materialien[71]

Legende: Kovy - Metalle, železné kovy - Eisenmetall, neželezné kovy - Nichteisenmetalle, ocele - Stähle, liatiny - Gusseisen, těžké kovy - Schwermetalle, lehké kovy - Leichtmetalle, např. konstrukčné ocele, nástrojové ocele, ocele na odliatky - z.B. Baustahl, Werkzeugstahl, Guss- stahl, Liatina, Temperovaná Liatina - Guss, Temperguss, meď, Zink, Olovo - Kupfer, Zink, Blei, Hliník, horčík, Titan - Aluminium, Magnesium, Titan, nekovovové materiály - nichtmetallische Materialien, prírodné materiály - natürliche Materialien, syntetické materiály - synthetische Materialien, žula, Asbest, drevo - Granit, Asbest, Holz, Plastik, sklo, keramika - Kunststoffe, Glas, Keramik, kompozitné materiály - Verbundwerkstoffe, tvrdené plasty, karbidy - gehärtete Kunststoffe, Karbide

## I.1. Beschreibung der einzelnen Materialgruppen

Stahl - Tempergusslegierungen, die Eisen und eine geringe Menge an Kohlenstoff enthalten, deren Gehalt kleiner als 2,14 % ist, d.h. unterhalb der Grenze der Löslichkeit in Austenit liegt. Legierte Stähle enthalten auch Edelmetalle. Stahl ist der Hauptbaustoff für die Herstellung von Maschinen, Motoren, Konstruktionen, insbesondere für deren mechanisch beanspruchte Teile (Wellen, Zahnräder, Schrauben, Federn, Bolzen und Nockenwellen[11],[19],[26],[27]).

Gusseisen - Eisen- und Kohlenstofflegierungen (2,14 % - 6,67 % C), mit guter Gießbarkeit. Sie werden zum Gießen von Bauteilen mit komplexer Formgebung verwendet, z.B. Motorgehäuse oder deren Teile.

Schwermetalle - (Dichte  $\rho > 5 \text{ kg.dm}^{-3}$ ). Dazu gehören z.B. Kupfer, Zink, Chrom, Nickel, Silber, Zinn, Wolfram. Sie werden entweder in reiner Form (aufgrund ihrer spezifischen Eigenschaften) oder in Legierungen verwendet.

Leichtmetalle - (Dichte  $\rho < 5 \text{ kg.dm}^{-3}$ ). Dazu gehören Aluminium, Magnesium, Titan. Sie haben eine relativ hohe Festigkeit und eine gute Korrosionsbeständigkeit bei relativ geringer Dichte. Aluminium wird z.B. für die Herstellung von Motorkolben sowie leichten Auto- und Flugzeugteilen verwendet.

Natürliche Materialien - Granit, Glimmer, Diamanten, Holz, Elfenbein, Baumwolle, Wolle, Seide.

Im Maschinenbau wird z.B. Granit als Zeichenbrett verwendet. Es hat eine geringe Wärmeleitfähigkeit und im Vergleich zu Gusseisenplatten eine höhere Temperatur.

Synthetische Materialien - dazu gehört eine große Gruppe makromolekularer Polymere aus einfachen organischen Substanzen, genannt Kunststoffe, aber auch Glas und Keramik. Kunststoffe sind leicht, wasserabweisend, elektrisch nicht leitend, wärmeisolierend, chemikalienbeständig. Sie haben verschiedene mechanische Eigenschaften; einige Kunststoffe sind elastisch, während andere steif und spröde sind. Kunststoffe haben einen geringen thermischen Widerstand. Kunststoffe werden für eine Reihe von Zwecken verwendet, von der Herstellung von Reifen bis hin zu Getrieben. Aufgrund ihrer Härte und Abriebfestigkeit werden keramische Werkstoffe für Düsen, Schneidwerkzeuge und Dichtringe verwendet.

Verbundwerkstoffe - Materialien, die aus zwei oder mehreren Arten von Materialien bestehen. Glasfaser besteht aus Kunstharz und Glasfasergewebe. Sie sind zäh, leicht und stark. Sie werden zur Herstellung von Containern, Kajaks, Pools oder Leiterplatten eingesetzt. Eine weitere Art von Verbundwerkstoff ist Hartmetall. Sie kombinieren die große Härte von Hartmetall und die Zähigkeit von Bindemetallen. Sie werden zur Herstellung

von Schneidwerkzeugen für Werkzeugmaschinen verwendet.

Herstellung von Materialien - Materialien werden hauptsächlich aus natürlichen Rohstoffen verwendet. Rohstoffe befinden sich in den Ablagerungen der Earth´s Kruste. Metalle werden aus Metallerzen gewonnen, Kunststoffe werden meist aus Öl und Erdgas hergestellt. Materialien aus Rohstoffen werden hauptsächlich durch thermische und chemische Prozesse gewonnen. Materialien kommen in Form von Halbfabrikaten, z.B. Profile, Bleche oder Drähte, in die technische Produktion. Naturmaterialien werden direkt aus natürlichen Vorkommen gewonnen (z.B. Granit aus Steinbrüchen).

Hilfsstoffe und Energie - bei der Herstellung und Montage von Maschinenteilen sind Hilfsstoffe und Energie für den Antrieb von Maschinen und für thermische Prozesse notwendig. Z.B. beim Drehen der Komponenten ist Bearbeitungsfluid zum Kühlen und Schmieren der Werkzeugkante, Schmierung zum Schmieren von Drehlagern und elektrische Energie für den Antrieb von Motoren und der Steuerung erforderlich.

## 2. ALLGEMEINE MATERIALEIGENSCHAFTEN

### 2.1. Physikalische Eigenschaften von Materialien

#### Dichte

Die Materialdichte ist ein Verhältnis ihrer Masse  $m$  zu ihrem Volumen  $V$ . Bei Gasen wird die Dichte bei normalem Luftdruck angegeben[8],[10],[11].

#### Schmelztemperatur

Die Schmelztemperatur ist die Temperatur, bei der das Material zu schmelzen beginnt (unter Normaldruck). Die höchste Schmelztemperatur gilt für Verbundkarbid (bestehend aus vier Teilen TaC und einem Teil Zirkonkarbid) - 4000 °C, Diamanten (3 816 °C) und Graphit (3 530 °C). Reine Metalle haben eine präzise Schmelztemperatur. Legierungen, z.B. Stähle, haben nur eine Schmelztemperatur bei einer bestimmten Zusammensetzung (am eutektischen Punkt). In anderen Fällen gehen sie bei einem bestimmten Temperaturbereich (zwischen Solidus- und Liquiduskurve im Gleichgewichtsdiagramm) vom festen in den flüssigen Zustand über.

#### Elektrische Leitfähigkeit

Elektrische Leitfähigkeit ist die Fähigkeit, elektrischen Strom zu leiten. Sie entspricht dem Strom bei der Gerätespannung. Gute Leiter sind z.B. Silber, Kupfer und Aluminium. Sie werden als Materialien für die Herstellung von Leitern verwendet. Materialien, die keinen elektrischen Strom leiten, werden als Isolatoren bezeichnet. Dazu gehören Kunststoffe, Glas und Keramik.

(Längs-)thermische Ausdehnung

Der thermische Ausdehnungskoeffizient in Längsrichtung  $\alpha$  zeigt die Ausdehnung in Längsrichtung  $\Delta l$  eines Körpers von 1 m Länge bei der Temperaturänderung von  $\Delta t = 1$  °C an. Die Wärmeausdehnung  $\Delta l$  ist z.B. bei Messwerkzeugen, Einbauteilen oder Gussteilen zu berücksichtigen. Der thermische Schwund muss durch Zugaben kompensiert werden.

## Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit ist der Grad der Fähigkeit eines Materials, Wärmeenergie zu leiten. Materialien mit hoher Wärmeleitfähigkeit sind Metalle, insbesondere Kupfer, Aluminium und Eisen oder Stahl. Materialien mit geringer Wärmeleitfähigkeit sind Kunststoffe, Glas und Luft. Diese werden zur Wärmedämmung eingesetzt.

## 2.2. Materialmechanische Eigenschaften

Durch die auf das Material (Festkörper) einwirkenden Kräfte verformt sich das Material oder das Festkörper schlecht. Abhängig von der inneren Struktur des Materials ist die resultierende Verformung entweder dauerhaft (plastisch) oder temporär (elastisch). Eine Säge aus gehärtetem Werkzeugstahl kann mit zunehmender Kraft gebogen und dann mit abnehmender Kraft wieder in ihre ursprüngliche Form gebracht werden, da sie elastisch ist. Seine Struktur wird durch Verformung nicht verändert, nur die Abstände der Atome im Kristallgitter ändern sich. Innerhalb eines bestimmten Verformungsbereichs verhalten sich einige Materialien für einen bestimmten Zeitraum so elastisch (da jedes Material durch periodisch wiederholte Beanspruchung abgenutzt wird). Diese Eigenschaft wird als Plastizität (Verformbarkeit, Duktilität) bezeichnet. Zu den formbaren oder duktilen Materialien gehören z.B. geschmiedeter Stahl oder reines Eisen[13],[14],[15].

### Elastische und plastische Verformung

Ein Stab aus unlegiertem Baustahl zeigt beim Biegen sowohl plastische als auch elastische Verformung. Bei großen Verformungen kehrt der Stab nur teilweise in seine Ausgangsform zurück, und es bleibt eine dauerhafte Verformung bestehen. Zu den Werkstoffen mit elastischem und plastischem Verformungsverhalten gehören z.B. ungehärteter Stahl, Kupfer- und Aluminiumlegierungen. Verschiedene Materialien können ein elastisches, plastisches und elastisches sowie plastisches Verformungsverhalten aufweisen.

### Zähigkeit, Sprödigkeit, Härte, Härte

Zähes Material ist ein Material, das elastisch und plastisch verformt werden könnte, aber die Verformung ist mit großer Materialbeständigkeit. Zu den sehr zähen Materialien gehören Baustahl und Edelstahl. Spröde Materialien können mit großer Kraft nur geringfügig verformt werden, da eine Veränderung der Materialkristallstruktur nicht möglich ist. Bei größeren Verformungen bricht das Material oder bricht in mehrere Stücke. Spröde Materialien sind z.B. harte Materialien wie Edelsteine, Glas, Keramik und in gewisser Weise auch gehärteter Kohlenstoffstahl (mit einem hohen Anteil an Martensit in seiner Struktur). Die Materialhärte bezieht sich auf den Widerstand eines Materials gegen das Eindringen eines Fremdkörpers in ihn, und sie wird anhand der Größe der

im Prüfkörper bei einem bestimmten Druck oder einer bestimmten Schlagenergie vorgenommenen Verformung beurteilt. Der härteste Werkstoff ist Borcarbid B<sub>4</sub>C und Diamant. Zu den harten Werkstoffen gehören gesinterte Karbide, Edelsteine und Werkstoffe auf Basis von Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Korund), Karbide (Karborund SiC, TiC), Glas, Keramik und gehärteter Stahl (mit Martensit in seiner Struktur). Zu den weichen Materialien gehören Aluminium und Kupfer. Erforderlich ist die Härte z.B. bei Werkzeugen, Reibungs- und Gleitflächen.

## 2.3. Technologische Eigenschaften von Materialien

Technologische Eigenschaften sind Merkmale der Materialbearbeitung durch verschiedene technologische Verfahren[16],[18],[19].

**Gießbarkeit** - ist die Fähigkeit des Materials, eine dünne Schmelze herzustellen, die die Form vollständig ausfüllt und beim Verfestigen keine Hohlräume bildet. Die gut gießbaren Werkstoffe sind z.B. verschiedene Gusseisenarten, Aluminiumlegierungen für Gussteile, Kupfer- und Zinklegierungen sowie Zinklegierungen.

**Verformbarkeit** - ist die Fähigkeit eines Materials, eine plastische Verformung durch Kraft zu bewirken. Die Warmformverfahren sind z.B. Warmwalzen und Schmieden. Die Kaltformgebung umfasst z.B. Kaltwalzen, Biegen, Bremsenbiegen und Tiefziehen. Gut verformbare Materialien sind z.B. kohlenstoffarmer Stahl, Aluminiumlegierungen, Kupferlegierungen für den Guss. Gusseisen kann nicht geformt werden.

**Zerspanbarkeit** - Zerspanbare Materialien sind für den Schneidbetrieb geeignet. In gibt an, ob und unter welchen Bedingungen das Material geschnitten werden kann, z.B. gedreht, gefräst oder geschliffen. Die Bewertungskriterien für die Bearbeitbarkeit sind z.B. die Qualität der bearbeiteten Oberfläche, die Bedingungen (Schwierigkeitsgrad) des Schneidvorgangs und die Lebensdauer des Werkzeugs.

Metalle sind in der Regel gut zerspanbar, insbesondere unlegierte und niedrig legierte Stähle und Gusseisen, Kupferlegierungen und Aluminiumlegierungen. Materialien mit schlechterer Zerspanbarkeit sind z.B. elastische und zähe Materialien, wie z.B. reines Kupfer, Reinaluminium, Edelstahl, Titan und harte Materialien, z.B. gehärteter Stahl.

**Schweißbarkeit** - gibt an, ob das Material zum Schweißen oder Spitzenschweißen geeignet ist. Gut schweißbare Werkstoffe sind unlegierte und niedrig legierte Stähle mit niedrigem Kohlenstoffgehalt. Durch spezielle Verfahren ist es möglich, hochlegierte Stähle, Legierungen und Kupferlegierungen zu schweißen.

Härtbarkeit und Veredelung - es ist die Fähigkeit des Materials, die Härte oder Festigkeit eines Materials durch geeignete Wärmebehandlung zu erhöhen. Die meisten Stähle können gehärtet werden, eine Veredelung ist nur bei einigen Arten von Legierungen und Aluminiumlegierungen möglich.

## 2.4. Chemische Eigenschaften

Die chemischen Eigenschaften von Werkstoffen sind wichtig für die Beständigkeit gegen Umwelteinflüsse, aggressive Stoffe und hohe Temperaturen (zur Unterstützung der chemischen Auswirkungen der Umgebung) auf das Material.

Korrosionsverhalten - beschreibt das Materialverhalten in feuchter Luft, Industriemosphäre, Wasser oder in anderen aggressiven Stoffen. Die von der Oberfläche ausgehende Störung der Materialstruktur durch chemische und elektrochemische Prozesse wird als Korrosion bezeichnet. Korrosionsbeständige Materialien sind Edelstahl und die meisten Kupfer- und Aluminiummaterialien. Zu den Werkstoffen, die nicht korrosionsbeständig sind, die durch feuchte Luft oder Industriemosphäre verursacht werden, gehören unlegierte und niedrig legierte Stähle und Gusseisen, und diese Werkstoffe korrodieren. Die Oberflächenbehandlung mit einer Schutzschicht oder einer anderen Schutzschicht trägt dazu bei, Korrosion über einen längeren Zeitraum zu verhindern[21],[22],[23]. Eine weitere chemische Eigenschaft ist die Widerstandsfähigkeit gegen Krätzbildung. Es beschreibt das Verhalten des Materials bei hohen Temperaturen der Luft. Bei einigen Werkstoffen, z.B. Kunststoffen, ist auch die Brennbarkeit zu beachten und bei der Verwendung der Werkstoffe sind Festigkeitsverluste sowie die Zündtemperatur zu berücksichtigen. Kunststoffe verändern ihre Eigenschaften auch unter Sonneneinstrahlung, insbesondere durch ihre UV-Strahlung.

Michael F. Ashby[2] hat in seiner Arbeit Materials Selection in Mechanical Design eine Reihe von Materialkarten erstellt. Sie stellen die Abhängigkeiten der wichtigsten Materialeigenschaften für die Grundgruppen der Materialien dar: Metalle, Keramik, Glas, Polymere, Elastomere und Hybridmaterialien (Verbundwerkstoffe, Schaumstoffe, Naturmaterialien). In der Reihe der Materialchart-Karten bestimmte er die folgenden Abhängigkeiten: Young's Modul - Materialdichte, Young's Modul - Zugfestigkeit, spezifisch Young's Modul - spezifische Zugfestigkeit, Verlustfaktor - Young's Modul, Wärmeleitfähigkeit - elektrischer Widerstand, Wärmeleitfähigkeit - Wärmeleitfähigkeit - Varianz Wärme, thermischer Ausdehnungskoeffizient - Young's Modul, Festigkeit - maximale Betriebstemperatur, Trockenreibungskoeffizient zu Stahl und Young's Modul - relative Kosten pro Volumeneinheit.

# 3. KRITERIEN FÜR DIE MATERIALAUSWAHL

Die primäre Anforderung bei der Auswahl eines geeigneten Materials ist fast immer seine Festigkeit. Es ist wichtig, die Materialeigenschaften (Festigkeit, Zähigkeit, Beständigkeit gegen zyklische Belastung, Verschleiß, Temperatur, Korrosion usw.) mit den geforderten Gebrauchseigenschaften einer zukünftigen Systemkomponente optimal zu kombinieren [71].

Neben den Materialeigenschaften sind bei der Auswahl eines geeigneten Materials weitere Kriterien zu berücksichtigen:

Produktionstechnologie - neben der Tragfähigkeit einer Technologie für ein bestimmtes Produkt basiert die Materialauswahl auf den Erkenntnissen über die Auswirkungen auf die Zusammensetzung, die Struktur und die mechanischen Eigenschaften. Wenn möglich, werden nach anderen Kriterien vorrangig abfallfreie Technologien, z.B. Pulvermetallurgie, Präzisionsguss, eingesetzt, die es ermöglichen, die Nutzung des Materials zu maximieren und die Bearbeitung zu minimieren (eine Technologie, die mit den höchsten Kosten verbunden ist).

Material- und Produktionskosten - die Wirtschaftlichkeit der Wahl ist ein komplexes Problem, das den Preis des ausgewählten Materials sowie dessen Verarbeitungstechnologien umfasst. So kann beispielsweise der Ersatz von Stahl durch eine Aluminiumlegierung oder ein Polymer als weniger kostengünstig erscheinen. Die Berechnung muss jedoch auch niedrigere Kosten für Transport, Oberflächenbehandlung und Bearbeitung beinhalten.

Wirtschaftlichkeit des gewählten Materialeinsatzes - it's auch ein komplexes Problem. Die Auswirkungen des ausgewählten Materials auf die Umwelt (direkt oder indirekt) haben viele Aspekte und sind schwer zu quantifizieren. Darüber hinaus ist es auch notwendig, die Möglichkeit des Recyclings des ausgewählten Materials zu berücksichtigen.

Weitere Kriterien - dazu gehören z.B. die Notwendigkeit, das Spektrum der Halbfabrikate und verfügbaren Materialien, begrenzt verfügbare Produktionsmittel, die Zuverlässigkeit der Eingangsdaten (d.h. das Ausmaß, in dem die Prüfung Materialeigenschaften definiert, das Ausmaß, in dem die Probe einer realen Komponente entspricht, das Wissen über Belastung und Umgebung, etc.)

Die Wahl eines Materials ist ein komplexer Prozess, und die große Menge an verfügbaren Materialien macht es noch komplizierter. Dies ist jedoch nicht die Hauptursache für seine Komplexität. Bei der Auswahl eines Materials ist es notwendig, eine Vielzahl verschiedener Aspekte und deren gegenseitige Beziehungen und Einflüsse zu berücksichtigen. Zum Beispiel die Beziehung eines Materials (seine technologischen, mechanischen,

physikalischen und chemischen Eigenschaften, sein Preis, sein Sortiment usw.), Technologien (insbesondere rationelle Produktion) und Struktur (Form und Funktion eines Produkts, Anforderungen an es). Darüber hinaus ist es notwendig, auch Material- und Produktionskosten, Energie- und Rohstoffbedarf, mögliche Umweltauswirkungen einschließlich z.B. Materialrecycling[28],[32],[42] zu berücksichtigen.

Die Wahl eines Materials für ein bestimmtes Produkt kann nicht unabhängig von der Technologie sein, die zur Herstellung des betreffenden Produkts verwendet werden muss (seine Form, Oberfläche usw.). Die Produktfunktion, ihre Struktur, ihr Material und ihre Technologie interagieren miteinander (Abbildung 3.1). Die Produktfunktion (z.B. Übertragung von Last, Wärme, Energiespeicherung usw.) bestimmt die Wahl des Materials, das die erforderlichen Kriterien erfüllen kann. Die Technologie wird durch die Eigenschaften des verwendeten Materials beeinflusst (Verformbarkeit, Bearbeitbarkeit, Schweißbarkeit, Gießbarkeit, Wärmebehandlung usw.). Die verwendete Technologie beeinflusst die Möglichkeit, die gewünschte Form, die Genauigkeit der Form, die Oberflächenqualität und den Preis zu erreichen.

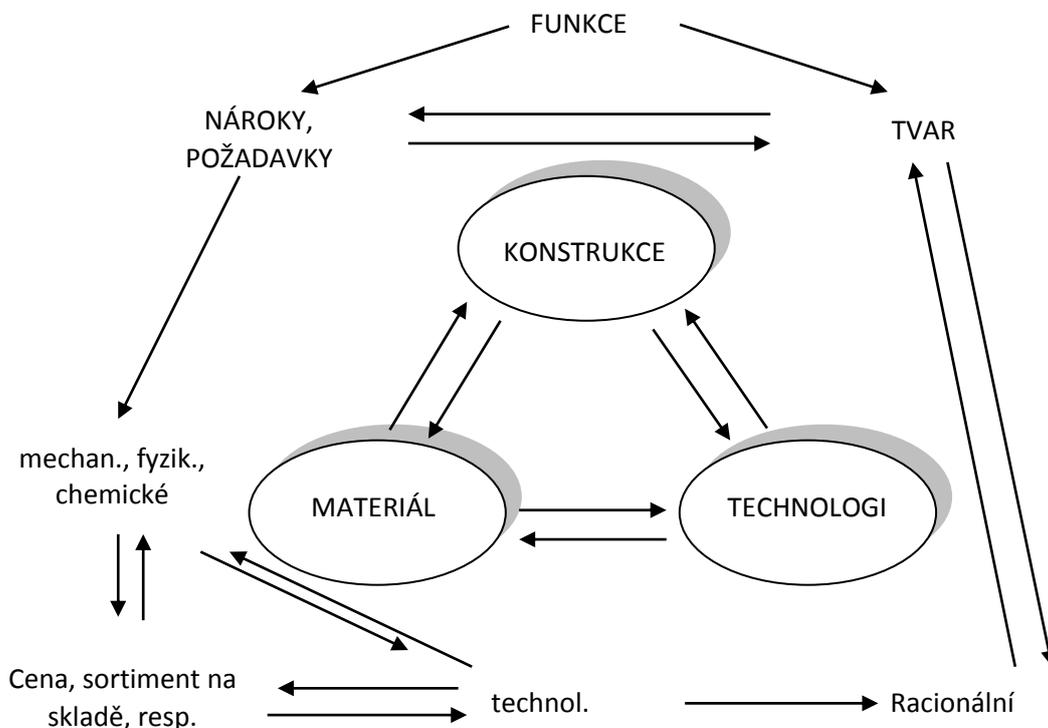


Abbildung 3.1 Zusammenhang zwischen Produkteigenschaften (Form, Funktion), Material und Technologie[28].

Das Produktdesign (seine Form) begrenzt die Wahl des Materials und der Technologie. Je komplizierter das Design ist, desto schmäler ist die Spezifikation und desto höher die Interaktion.

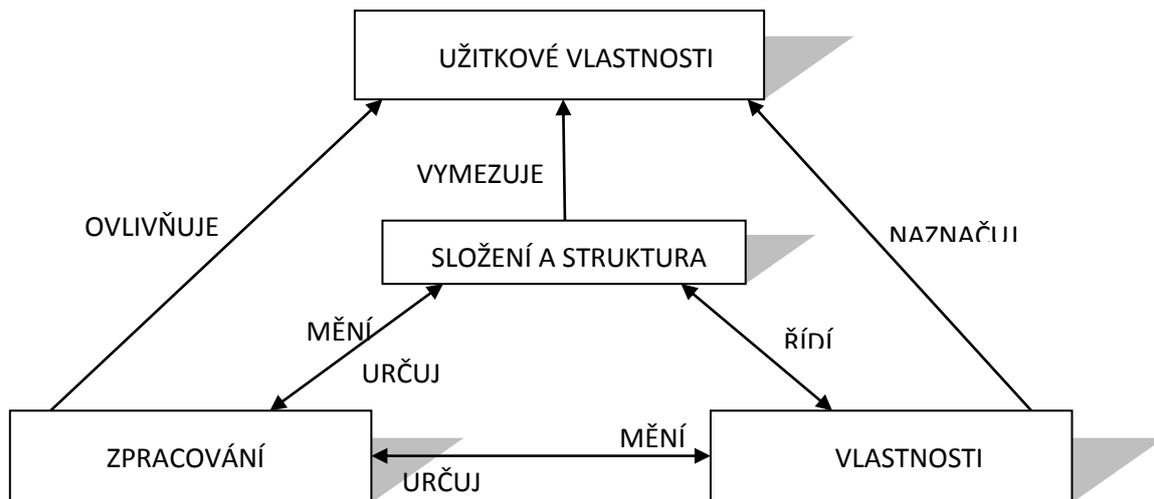


Abbildung 3.2 Zusammenhang zwischen Materialzusammensetzung und Struktur, Verarbeitung, Eigenschaften und Gebrauchseigenschaften des Produkts[28].

Es ergibt sich aus Figur 3.2, die Materialeigenschaften werden durch ihre Zusammensetzung und Struktur bestimmt, die durch die verwendete Technologie (z.B. Verstärkung beim Kaltumformen) beeinflusst (verändert) werden und umgekehrt wird die Verwendung einer bestimmten Technologie bestimmt. Die Zusammensetzung und Struktur der Materialien wird durch Primär- und Sekundärtechnologien bestimmt und ist begrenzt, um die erforderlichen Gebrauchseigenschaften eines Produkts zu erreichen. Neben der Struktur und Zusammensetzung eines Materials werden die Gebrauchseigenschaften des Produkts durch die Eigenschaften des verwendeten Materials und seiner Verarbeitungstechnologie beeinflusst. Das gesamte System der gegenseitigen Wechselwirkungen (Gebrauchseigenschaften - Technologien - Zusammensetzung, Struktur und Eigenschaften des Materials) wird auch durch wirtschaftliche Parameter, d.h. Kosten des verwendeten Materials und der verwendeten Technologie, sowie durch die Wirkung aller reaktiven Elemente beeinflusst.

## 3.1. Materialauswahl im Produktentwicklungsprozess

Das Entwerfen eines neuen Produkts ist ein interaktiver Prozess, der mit einer Idee beginnt und mit einem Produkt endet, das der ursprünglichen Idee oder Marktanforderung entspricht (Abbildung 3.3). Zwischen Beginn und Ende dieses Prozesses gibt es drei Stufen der Gestaltung: Konzept, Verkörperung und Ausführungsplanung[33],[34],[35].

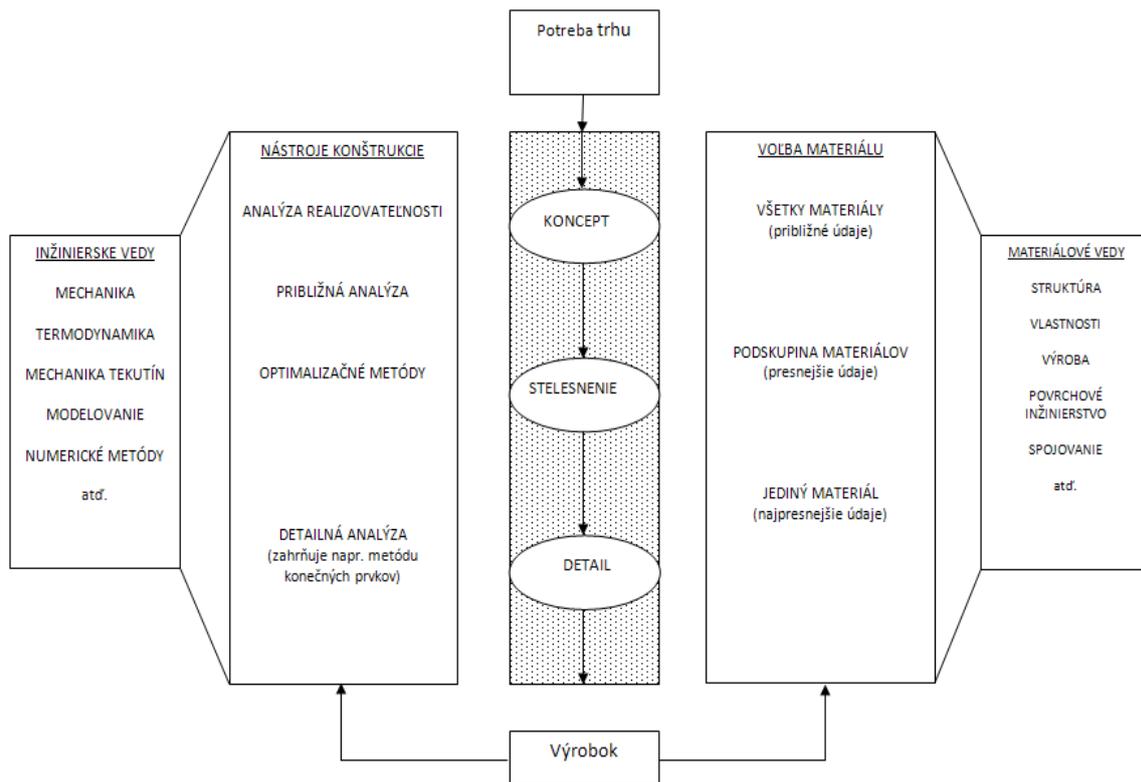


Abbildung 3.3 Design eines neuen Produkts - Flussdiagramm[28]

*Legende: potreba trhu - Marktnachfrage, Konzept - Konzept - Konzept, stelesnenie - Verkörperung, výrobok - Produkt, nástroje konštrukcie - Bauwerkzeuge, analýza realizovateľnosti - Machbarkeitsanalyse, optimalizačné metódy - Optimierungsmethoden, detailná analýza (zahrňuje napr. Metódu konečných prvkov) - detaillierte Analyse (beinhaltet e.g. Finite-Elemente-Methode, inžinierske vedy - Ingenieurwissenschaften, Mechanik - Mechanik, Termodynamik - Thermodynamik, Mechanik tekutín - Strömungsmechanik, Modelovanie - Modellierung, numerické metódy - numerische Methoden, volba Material - Materialauswahl, všetky materiály (približne údaje) - alle Materialien (ca. Details), podskupina materiálov (presnejšie údaje) - Untergruppe Materialien (detailliertere Daten), jediný Material (najpresnejšie údaje) - ein Material (die genauesten Daten), materiálové vedy - Materialwissenschaft, štruktúra - Struktur, vlastnosti - Eigenschaften, výroba - Produktion, povrchové inžinierstvo - Oberflächentechnik, spojovanie - Fügen*

In der ersten Phase der Konzeption berücksichtigt der Designer zunächst alle alternativen Arbeitsprozesse oder Funktionsschemata, die das System sicherstellen wird. In der Verkörperungsphase untersucht der Konstrukteur die funktionale Struktur und analysiert die einzelnen Aktivitäten, einschließlich der Gestaltung der einzelnen Teileabmessungen. Diese Phase endet mit einem Projekt (Zeichnung des Systems) als Grundlage für eine detaillierte Planung. Der linke Teil der Abbildung zeigt die Werkzeuge und Technologien, die dem Designer zur Verfügung stehen oder die er einsetzt. Die Abbildung zeigt, dass die Auswahl des Materials mit einem Design in drei Stufen übereinstimmt, mit dem Ziel, das Material auszuwählen, das die Gebrauchseigenschaften des Produkts optimal gewährleistet. In der ersten Phase (Konzeptentwurf) wird eine breite Palette von Materialien betrachtet, die die grundlegenden Bedingungen erfüllen könnten, z.B. Betriebstemperatur, Korrosionsbeständigkeit in der gegebenen Umgebung, etc. Anhand der geforderten Eigenschaften wird entschieden, ob das Bauteil aus Metall, Kunststoff, Keramik oder Verbundwerkstoff besteht. Gleichzeitig wird auch bestimmt, ob eine Metallkomponente im Guss- oder Umformbetrieb verwendet wird.

In der zweiten Stufe wird eine spezifischere Gruppe von Materialien verwendet, die den Anforderungen besser gerecht werden, z.B. die kostengünstigste Schweißtechnik, eine geeignete Oberflächenbehandlung, etc. Im Rahmen der Detailkonstruktion wird die Materialliste auf ein (in Ausnahmefällen auf wenige) Materialien reduziert, das/die am besten geeignete(n) und auch eine geeignete Technologie verwendet. Jede der Stufen entspricht unterschiedlichen Anforderungen an die Ebene der Materialdaten. In der Phase der Konzeption benötigt der Konstrukteur bei der Betrachtung verschiedener Konzeptvarianten nur ungefähre Daten. In der zweiten Stufe arbeitet der Konstrukteur mit genaueren Daten aus Materialdatenbanken.

In der Phase der Detailplanung benötigt der Konstrukteur möglichst genaue Daten über ein oder mehrere Materialien. In einigen Fällen sind die Daten aus Normen oder von Herstellern nicht ausreichend und es werden mehr Daten, z.B. aus Laboruntersuchungen, benötigt. Es kann jedoch vorkommen, dass das Produkt nicht funktioniert (entweder in Bezug auf Funktion oder unzureichendes Material) und der gesamte Konstruktionsprozess (mit den Informationen über den Fehler) in einem oder mehreren Phasen wiederholt wird.

## 3.2. Materialauswahlverfahren

**Die Materialauswahl wird hauptsächlich aus zwei Gründen durchgeführt:**

- Auswahl von Material und Technologien für ein neues Produkt (Originaldesign)
- Berücksichtigung alternativer Materialien und Produktionsverfahren für ein bestehendes Produkt

Ein neues Produkt bringt in der Regel neue Arbeitsprinzipien mit sich; daher ist es notwendig, bei der Auswahl des optimalen Materials und der optimalen Technologie eine möglichst breite Palette von Materialien zu berücksichtigen[44],[45],[46]. Im zweiten Fall (alternatives Material) ist die Situation anders. Es gibt in der Regel eine Vielzahl von Gründen für die Änderung oder Innovation des derzeit verwendeten Materials oder der Technologie, einschließlich:

- Notwendigkeit der Anpassung an die erforderlichen Funktionen von parametrischen Änderungen des Produkts in Bezug auf das alternative Design
- Bemühungen um eine Senkung des Materialpreises
- Reduzierung der Produktionskosten
- Nutzung der Vorteile eines neuen Materials oder einer neuen Technologie
- Lösung von Problemen im Zusammenhang mit der Materialbearbeitungstechnologie
- Anwendung der Empfehlungen aus einer fraktographischen Analyse der beschädigten Produkte

**Bei der Auswahl eines Materials für ein neues Produkt ist wie folgt vorzugehen:**

- Um die Funktion zu definieren, muss das Produkt über eine Funktion verfügen und diese in die erforderlichen Materialeigenschaften (Festigkeit, Korrosionsbeständigkeit usw.) umsetzen und andere Faktoren wie Preis oder Verfügbarkeit des Materials berücksichtigen.
- Definition von Anforderungen (Größe und Form des Bauteils, erforderliche Toleranz, Oberflächenqualität, Anzahl der Bauteile, etc.)
- Vergleich der geforderten Eigenschaften mit den Parametern und Eigenschaften einer möglichst großen Anzahl von Materialien; Auswahl mehrerer Materialien, die den Anforderungen entsprechen könnten. Es ist auch sinnvoll, Mindest- und Höchstwerte festzulegen, die der Werkstoff in Bezug auf diese Eigenschaften aufweisen muss.
- Detailliertere Beurteilung ausgewählter Materialien (z.B. deren Verfügbarkeit in den angegebenen Halbzeugdimensionen, Preis, Betriebsverhalten, etc.)
- Die Auswahl eines Materials auf der Grundlage der Ergebnisse einer detaillierten Materialanalyse und die Ermittlung der Daten und Besonderheiten für die Konstruktion.

**Bei der Auswahl eines alternativen Materials für ein bestehendes Produkt ist das folgende Verfahren anzuwenden:**

- Charakterisierung der Gebrauchseigenschaften, der Produktionsanforderungen und des Preises des aktuell verwendeten Materials.
- Auswahl von Merkmalen, die verbessert werden sollen
- Um alternative Materialien und (oder) eine Technologie zu finden.
- Das Verfahren ist vergleichbar mit dem vorherigen Fall - Punkte 1-3) und vergleicht seine / ihre Parameter im Detail mit den aktuell verwendeten.

### 3.3. Verhältnis von Material und Technologie

Es ist eine sehr enge und gleichzeitig recht komplizierte Beziehung, da es in den meisten Fällen mehrere oder eine große Anzahl von Produktionsprozessen gibt, um ein bestimmtes Bauteil herzustellen. Die Grundlage ist die Wahl eines Materials und einer Technologie, um die maximale Qualität des zu produzierenden Bauteils zu einem möglichst niedrigen Preis zu erreichen. Die Wahl der optimalen Technologie ist aufgrund einer Reihe von Faktoren kompliziert, die berücksichtigt werden müssen, wie z.B. die Menge der hergestellten Komponenten, Form, Anforderungen an Oberflächenrauheit und Präzision, Verfügbarkeit von Produktionsanlagen, Auswirkungen der eingesetzten Technologien auf die Umwelt, Kosten usw. [40], [41], [42], [43].

Die Materialwahl bestimmt die Technologien, die für die Herstellung des jeweiligen Bauteils eingesetzt werden können. Die Übersicht über die am häufigsten verwendeten Technologien zur Verarbeitung einer bestimmten Werkstoffgruppe ist in Tabelle 3.1 nach[80] dargestellt. Bei der Auswahl eines Materials ist es auch notwendig, andere Aspekte zu berücksichtigen, wie z.B. die Größe des Bauteils, seine Form, Komplexität, Toleranz, Oberflächenqualität und Produktionskosten. Aus dieser Sicht sind die Schlüsselfaktoren für die Beurteilung der Eignung der einzelnen Technologien vor allem die Zykluslänge (Zeit, die für die Herstellung eines Teils erforderlich ist), die Qualität (erforderliche Toleranz, Oberflächenrauheit, Rissfreiheit, Poren, Krätze usw.), die Flexibilität (die Fähigkeit, die jeweilige Technologie an die Herstellung eines anderen Produkts oder seiner Variante anzupassen), die Verwendbarkeit des Materials und die Produktionskosten.

Tabelle 3.1 Auslastung der Produktionsprozesse für ausgewählte Materialgruppen[80].

Technologie	Gusseisen	Kohlenstoffstahl	Legierter Stahl	Rostfreier Stahl	Al und sein Legierungen	Cu und sein Legierungen	Zn und sein Legierungen	Mg und sein Legierungen	Ti und sein Legierungen	Ni und sein Legierungen	Hochschmelzende Metalle	Plastomere	Duromere
<b>Gießen / Formen</b>													
Sandguss	•	•	•	•	•	•	-	•	-	•	-	X	X
Keramischer Formguss	-	•	•	•	•	•	-	-	-	•	-	X	X
Metallformguss	X	X	X	X	•	-	•	•	X	X	X	X	X
Druckguss	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	•	-
Feinguss	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	•	X
Blasformen	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	•	X
Schleuderguss	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	•	X
<b>Schmieden/Schüttgutmformung</b>													
Rückwärtsextrusion	X	•	•	-	•	•	•	-	X	X	X	X	X
Kaltstauchen	X	•	•	•	•	•		-	X	-	X	X	X
Druckschmieden	X	•	•	•	•	•	X	•	•	-	-	X	X

Pressen und Sintern (PM)	X	•	•	•	•	•	X	•	-	•	•	X	X
Heißextrusion	X	•	-	-	•	•	X	•	-	-	-	X	X
Rundkneten	X	•	•	•	•	-	-	•	X	•	•	X	X
<b>Bearbeitung</b>													
Bearbeitung von Halbfabrikaten	•	•	•	•	•	•	•	•	-	-	-	-	-
Elektrochemische Bearbeitung	•	•	•	•	-	-	-	-	•	•	-	X	X
Funkenerosionsarbeiten	X	•	•	•	•	•	-	-	-	•	-	X	X
Drahtschneiden	X	•	•	•	•	•	-	-	-	•	-	•	X
<b>Pressen</b>													
Blechbearbeitung	X	•	•	•	•	•	-	-	-	-	X	X	X
Formgebung der erwärmten Folie	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	•	X
Metalldrücken	X	•	-	•	•	•	•	-	-	-	-	X	X

## 3.4. Materialauswahl in Bezug auf die Umwelt

Die Auswirkungen des ausgewählten Materials auf die Umwelt haben viele Aspekte und sind schwer zu quantifizieren. Die direkten Auswirkungen (z.B. Toxizität) müssen ausgeschlossen werden. Eine Reihe von organischen und anorganischen Elementen haben toxische Eigenschaften. Die toxischen Wirkungen verschiedener Stoffe können grundsätzlich in unmittelbar und folgerichtiger eingeteilt werden, im späteren Verlauf erfolgt die Einteilung in mutagen, krebserregend und fortpflanzungsgefährdend. Die detaillierte Untersuchung der Auswirkungen von Metallen auf den menschlichen Körper erhöht die Menge der gesundheitsschädlichen Metalle. Neben den kürzlich identifizierten toxischen Metallen (Hg, Be, As und Pb) gelten weitere zwölf Metalle als schädlich. Zu den Metallen mit nachweislich schädlicher Wirkung gehören As, Cd, Hg, Se und Th, während die Toxizität anderer Metalle (Co, Ni, Pb, V, Zn) von der Größe und Anzahl der Dosen abhängt. In letzter Zeit gab es Diskussionen über den möglichen Einfluss von Aluminium auf die Altersdemenz. Im Gegensatz zu einigen extrem giftigen, aber abbaubaren Verbindungen (z.B. Cyaniden) beschränkt sich die Möglichkeit der Metallentsorgung auf die Metallgewinnung oder die Bindung von Metallen an schwerlösliche Formen. Dem Thema der toxischen Elemente in Metallen wird große Aufmerksamkeit geschenkt, und aus den Ergebnissen[63],[64],[65] werden unmittelbar Konsequenzen gezogen.

### Zu den wichtigsten indirekten Effekten gehören:

- Rohstoffe, Bergbau, Verarbeitung von Rohstoffen
- Energieintensität
- Sicherheit und langfristige Zuverlässigkeit
- Möglichkeit des Recyclings.

In der Toxikologie von Polymeren sind die Auswirkungen von Restmonomeren, Additiven und Substanzen, die bei der Entsorgung von Polymeren anfallen, erheblich. Von den vielen schädlichen Monomeren (z.B. Vinylchlorid, Acrylnitril, Methylmethacrylat usw.) sind die zuerst genannten krebserregenden Monomere am wichtigsten, deren Gehalt an Polyvinylchlorid auf 1 mg/kg begrenzt ist.

Metallurgie, Chemie und andere Industrien belasten die Umwelt in Form von Abfällen, die in der Basistechnologie nicht recycelt werden können. Die meisten metallurgischen Prozesse erzeugen alle Arten von Abfällen - gasförmige (Kohlenoxide, Stickoxide, Schwefeloxide), flüssige (Abwasser, Schlamm) und feste (Schlacke, Staub). Einer der Umweltparameter für die Beurteilung der industriellen Gasemissionen ist der spezifische Primärenergieverbrauch in Bezug auf eine bestimmte Produktreihe.

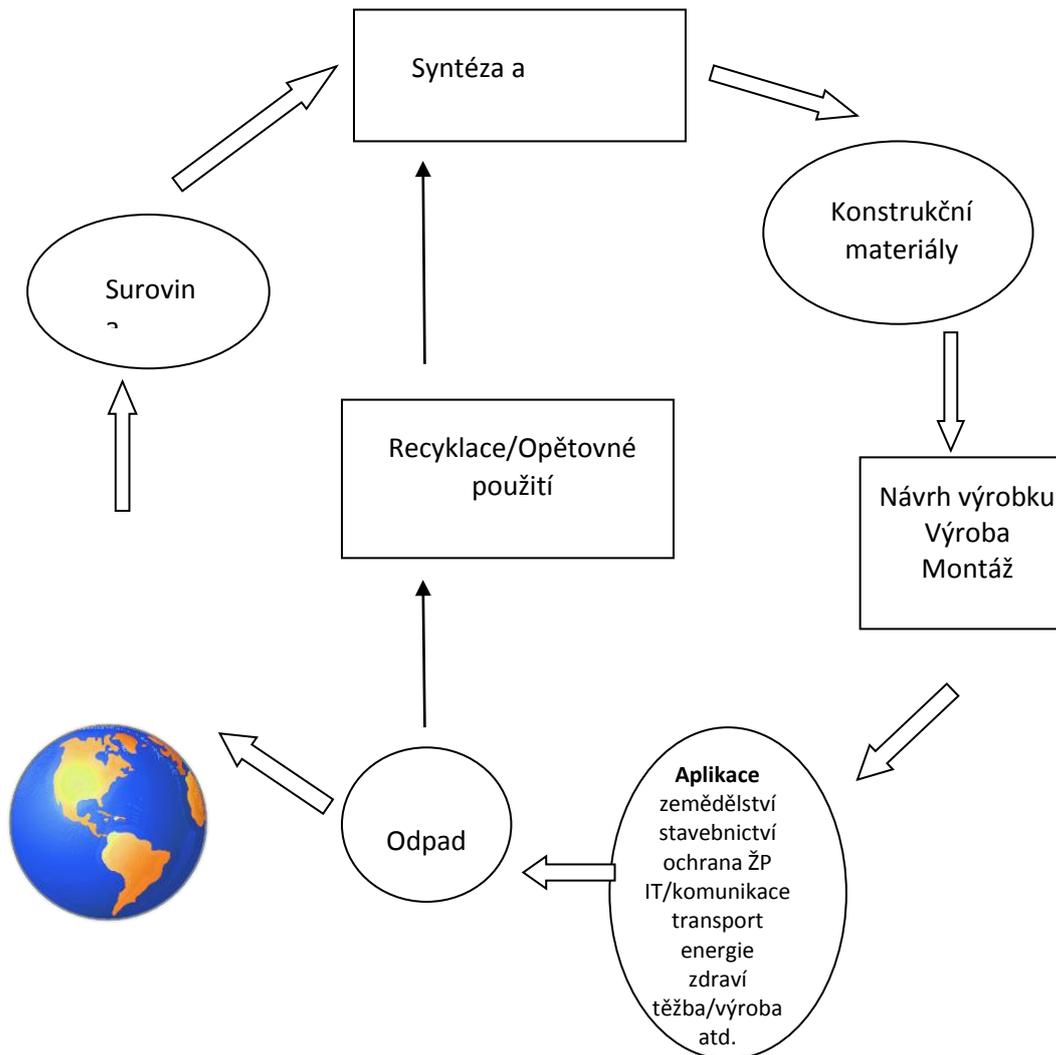
Von den einzelnen Materialgruppen ist Stahl nahezu vollständig recycelbar. Dies ist jedoch mit einer Reihe von Problemen und erhöhten Kosten im Zusammenhang mit der Sortierung und Behandlung von Abfällen aus der Spänebearbeitung oder der Sortierung von Mehrwegabfällen verbunden. Ein bekanntes Problem der wiederverwertbaren

Stahlabfälle ist der steigende Gehalt an Kupfer und Tensiden. Nichteisenmetalle sind zu ca. 90% recycelbar, sie enthalten keine Füllstoffe (Kreide, Talk, Glas, etc.), die zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften zugesetzt werden. Duroplaste können nicht recycelt werden. Elastomere (Naturkautschuk, Gummi) können nicht recycelt werden, aber es werden zusätzliche Anwendungsmöglichkeiten für sie gesucht. Für die nahe Zukunft sind Produkte, die das Recycling erleichtern, vielversprechend. Ihre Produktion muss mehreren **Grundregeln folgen**:

- Verwendung von Materialien, die recycelbar sind oder für einen anderen Zweck verwendet werden können,
- Minimierung der Anzahl der für die Herstellung eines Produkts verwendeten Materialien oder Verwendung von Materialien, die sich im Hinblick auf das Recycling gut kombinieren lassen,
- Nicht kombinationsfähige Materialien auf demontierbare Weise zu verbinden,
- Markiere Kunststoffe

Ein neuer Entwicklungstrend ist abbaubar, insbesondere organische Materialien, d.h. Kunststoffe, die in den natürlichen Stoffkreislauf eingebunden werden können. Im Abbauprozess werden hydrolytische, oxidative und photoabbauende Mechanismen eingesetzt, die dazu führen, dass die Molekülketten in kürzere Strukturen zerlegt werden, die leicht dem biologischen Abbau durch Mikroorganismen unterliegen. Abbaubare Kunststoffe können sich überall in der Natur zersetzen, vorzugsweise auf Deponien oder auf Meereshöhe. Der biologische Abbau ist bei der Kompostierung von abbaubaren Kunststoffen sehr effektiv, was zur Bildung von Humus führt. Kompostdünger kann verwendet werden, um einige landwirtschaftliche Nutzpflanzen anzubauen, die ein Grundrohstoff für die Herstellung von abbaubaren Kunststoffen sind, die auf der Kombination von pflanzlichen und synthetischen Rohstoffen basieren. Auf diese Weise wird ein geeignetes Polymermaterial in einen geschlossenen natürlichen Kreislauf eingebunden, ohne die Umwelt zu belasten. Einige Einschränkungen dieses Trends können sich aus seiner Kontraktion mit der Forderung nach einer langen Haltbarkeit eines Produkts ergeben.

Abbildung 3.4 zeigt einen typischen Materialzyklus. Ziel ist es, so wenig nicht verwertbare Abfälle wie möglich zu verwenden.



Das Recycling von Materialien (Produkten) hat eine Reihe von praktischen Formen, die von Rückgewinnungsverfahren reichen, die eine wiederholte Verwendung und Abnutzung eines Bauteils ermöglichen (z.B. Aufschweißen anderer Schichten auf Verschleißteile), über die Verwendung des Verschleißteils als Rohstoff für die Herstellung eines neuen Bauteils bis hin zur Energierückgewinnung (z.B. Verbrennung von Kunststoffen).

Ein klassischer Materialkreislauf mit unterschiedlichen Recyclingschritten im Produktionskreislauf (Verarbeitung von Primärabfällen im Primärkreislauf) oder im Produktgebrauch (Sekundärkreislauf - Regenerationsprozesse), Nutzung des Produkts nach dessen Ende (Tertiärkreislauf) zur Umwandlung des Produkts in ein anderes Material oder eine andere Energie.

## 4. KENNZEICHNUNG VON MATERIALIEN

Verschiedene Arten von Materialien werden häufig mit Markierungen bezeichnet, die entweder aus Buchstaben oder Zahlen oder einer Kombination aus beidem bestehen. In jedem Land, in dem es hergestellt wird, wird Stahl nach nationalen technischen Normen sowie nach Namen (Marken) einzelner Hersteller gekennzeichnet. Marken werden auf Stahl gesetzt, der in einem bestimmten Land noch nicht standardisiert ist, oder auf Stahl, der normalisiert wurde, um einen manufacturer's Ursprung zu erkennen. Die Kennzeichnungssysteme sind in jedem Land sehr unterschiedlich. In letzter Zeit haben jedoch einzelne EU-Länder zunehmend ein Kennzeichnungssystem nach europäischen Normen (EN) eingeführt, das den Prozess schrittweise vereinheitlicht. Dennoch enthalten technische Dokumentationen aus den oben genannten Ländern sehr oft Kennzeichnungen nach den nationalen technischen Normen[51],[52],[53],[71].

### 4.1. Einteilung und Kennzeichnung von Stählen nach europäischen Normen

Die Einteilung und Kennzeichnung von Stählen in Europa wird auf der Grundlage europäischer Normen (EN) vereinheitlicht. Alle CEN-Mitglieder sind verpflichtet, die Normen einzuhalten, wobei die Mitglieder nationale Normungsorganisationen aus 18 europäischen Ländern sind, nämlich Belgien, Dänemark, Finnland, Frankreich, Irland, Island, Italien, Luxemburg, Deutschland, Niederlande, Norwegen, Portugal, Österreich, Griechenland, Spanien, Schweden, Schweiz, Großbritannien und damit praktisch alle westeuropäischen Länder. Aber auch andere europäische Länder, darunter die Tschechische Republik und die Slowakei, übernehmen schrittweise die Normen. In der Tschechischen Republik werden sie als CSN EN ausgestellt und ersetzen die bestehenden CSN-Normen. Dadurch wird die EN zu europaweiten Normen, und es ist daher notwendig, dass man sich mit ihnen vertraut macht.

**Die Einteilung der Stähle wird durch die europäische Norm EN 10020-88 (ČSN EN 10020-94) festgelegt, die definiert:**

- der Begriff Formstahl,
- Stahlsorten nach chemischer Zusammensetzung und deren Aufteilung in unlegiert und legiert,
- Hauptqualitätsklassen von Stählen aufgrund ihrer Eigenschaften und ihres Verwendungszwecks.

Abkürzungen für Stahlkennzeichnungssysteme sind in der folgenden Norm aufgeführt: EN 10027-1-92 und deren Ergänzung IC 10-93 (Informationsrundschriften),

aufgenommen in ČSN als ČSN ECISS IC 10-95. Numerische Kennzeichnungssysteme sind in der EN 10027-2-92 (ČSN EN 10 027-2-95) angegeben.

Was die Umformstähle betrifft, so handelt es sich um Werkstoffe, deren Eisengehalt nach Gewicht größer ist als jedes andere Element, die weniger als 2 % C enthalten und andere Elemente beinhalten. Obwohl einige Chromstähle mehr als 2% C enthalten, wird die 2%-Marke allgemein als Grenzlinie zur Unterscheidung zwischen Stahl und Gusseisen angesehen.

Die Einteilung der Stähle nach ihrer chemischen Zusammensetzung in unlegiert und legiert basiert auf dem Mindestgehalt an Elementen (wie in der obigen Norm angegeben) oder den Lieferbedingungen. Wenn für die Elemente nur der Maximalwert des Gehalts in der Schmelze vorgeschrieben ist, sind 70 % des Wertes (außer Mn) für die Aufteilung der Stähle in unlegierte und legierte Stähle entscheidend. Was Mangan betrifft, so beträgt der Grenzwert 1,80 %, während die chemische Zusammensetzung des Ausgangsmaterials für mehrschichtige und plattierte Produkte entscheidend ist.

Unlegierte Stähle sind solche, deren bestimmende Gehalte an einzelnen Elementen in keiner Weise die in der Tabelle der Grenzwerte von Legierungselementen für die Einteilung von Stählen in unlegierte und legierte Stähle angegebenen Grenzwerte erreichen.

Legierte Stähle sind solche, deren Gehalt an Einzelementen mindestens in einem Fall die in der Tabelle der Grenzwerte von Legierungselementen für die Einteilung von Stählen in unlegierte und legierte Stähle angegebenen Grenzwerte erreichen oder überschreiten.

## 4.2. Unlegierte Stähle

### 4.2.1. Gängige Qualitätsstähle

Gängige Qualitätsstähle sind Stähle mit Qualitätsanforderungen, die keine besonderen Vorsichtsmaßnahmen in der Produktion erfordern. Sie müssen jedoch weiterhin folgende Bedingungen erfüllen: Sie sind nicht für die Wärmebehandlung bestimmt (wobei nach EN 10020 keine Art des Glühens, z.B. Normalglühen, als Wärmebehandlung angesehen wird); die Anforderungen, die für den unbearbeiteten oder normalisierten Glühzustand zu erfüllen sind, entsprechen den Werten der Tabelle der Grenzwerte für gängige Qualitätsstähle. Mit Ausnahme des Si- und Mn-Gehalts sind keine weiteren Gehalte an Legierungselementen vorgeschrieben,[12],[71].

## Unlegierte Qualitätsstähle

Sie sind alle unlegierte Stähle, die nicht in den Qualitäten von konventionellen Qualitätsstählen und Edelstählen enthalten sind. Solche Stähle weisen keine vorgeschriebene gleichmäßige Wärmebehandlungsreaktion oder einen erforderlichen Reinheitsgrad in Bezug auf nichtmetallische Einschlüsse auf. Im Vergleich zu konventionellen Qualitätsstählen werden an sie höhere oder zusätzliche Anforderungen gestellt (z.B. Sprödbuchanfälligkeit, Korngröße, Umformbarkeit). Ihre Produktion erfordert daher besondere Sorgfalt.

## Unlegierte Edelstähle

Im Gegensatz zu den vorgenannten Stahlsorten weisen unlegierte Edelstähle einen höheren Reinheitsgrad auf. Sie sind meist zur Verfeinerung oder Oberflächenhärtung bestimmt und zeichnen sich dadurch aus, dass sie auf eine solche Behandlung gleichmäßiger reagieren. Die gewünschten Eigenschaften werden durch die genaue Bestimmung der chemischen Zusammensetzung sowie der Produktions- und Prüfbedingungen - oft in Kombination und innerhalb enger Grenzen (hohe oder eng definierte Festigkeit oder Härtebarkeit in Verbindung mit hohen Anforderungen an Umformbarkeit, Schweißbarkeit, Zähigkeit usw.) - erreicht.

### Zu den unlegierten Edelstählen gehören:

- Stähle mit Schlaganforderungen in einem verfeinerten Zustand;
- Stähle mit Anforderungen an eine getrübbte Schichttiefe oder Oberflächenhärte im getrübbten oder getrübbten oder freigegebenen Zustand;
- Stähle mit sehr niedrigen Anforderungen an den nichtmetallischen Gehalt (einschließlich Stähle, für die der Gehalt vereinbart werden kann);
- Stähle mit einem vorgeschriebenen Höchstgehalt von P und S = 0,020% in der Schmelze und 0,025% im Endprodukt (z.B. Drähte für hochbeanspruchte Federn);
- Stähle mit minimalen Schlagkräften von KV > 27 J an Längsproben bei -50 °C;
- Stähle für Kernreaktoren mit Cu = 0,10 %, Co = 0,05 %, V = 0,05 % für eine Fertigproduktanalyse;
- Stähle mit einer vorgeschriebenen minimalen elektrischen Leitfähigkeit von > 9 S m/mm<sup>2</sup>;
- ferritisch-perlitische Stähle mit einem vorgeschriebenen Mindestgehalt von C = 0,25 %, die wie bei unlegierten Stählen und zum Härten noch zulässige Gehalte an einem oder mehreren Mikrolegierungselementen, z.B. V, Nb, enthalten;
- Stähle für Spannbetonbewehrung.

## 4.3. Legierte Stähle

### 4.3.1. Legierte Qualitätsstähle

Diese Gruppe umfasst Stähle, die für ähnliche Zwecke wie unlegierte Qualitätsstähle bestimmt sind, aber um besondere Bedingungen für ihre Verwendung zu erfüllen, enthalten sie Legierungselemente in bestimmten Gehalten, die sie zu legierten Stählen machen. Diese Stähle sind im Allgemeinen nicht zum Verfeinern oder Oberflächenhärten bestimmt und umfassen:

- schweißbare Feinkornbaustähle für Stahlkonstruktionen, einschließlich Druckbehälter und Rohrleitungen, die die folgenden Anforderungen erfüllen:
  - für  $t = 16 \text{ mm}$  ist die Streckgrenze von  $Re < 380 \text{ MPa}$  vorgeschrieben,
  - Der Gehalt an Legierungselementen muss unter den Grenzwerten liegen, die in der Tabelle der Grenzwerte für die Aufteilung der legierten schweißbaren Feinkornbaustähle in legierte Qualitätsstähle und Edelstähle angegeben sind,
  - ein minimaler Stoßwert des KV-Anteils liegt bei  $-50 \text{ °C} = 27 \text{ J}$ ,
- Stähle, die nur mit Si oder Si und Al legiert sind, mit besonderen Anforderungen an die magnetischen und elektrischen Eigenschaften;
- Stähle, die für die Herstellung von Schienen, Bürsten und Grubenstützen bestimmt sind;
- Stähle für warmgewalzte oder kaltgewalzte Flacherzeugnisse, die für eine fortgeschrittenere Kaltumformung bestimmt sind und einzeln oder in Kombination mit B, Nb, Ti, V oder Zr legiert sind (ähnlich wie Biphasenstähle);
- Stähle, die nur mit Cu legiert sind.

### 4.3.2. Legierte Edelstähle

Es handelt sich um Stähle, bei denen die geforderten Eigenschaften - oft in Kombination und innerhalb enger Grenzen - durch die Bestimmung präziser chemischer Zusammensetzungen sowie spezieller Produktions- und Prüfbedingungen erreicht werden. Dazu gehören insbesondere Edelstähle, hochwarmfeste und feuerfeste Stähle, Stähle für Wälzlager, Werkzeugstähle, Stähle für Stahlbau und Maschinenbau, Stähle mit besonderen physikalischen Eigenschaften usw.,[71].

### 4.3.3. Abkürzungen für das Stahlkennzeichnungssystem

Tabelle 4.4 zeigt ein spezifisches Stahlkennzeichnungssystem.

Registerkarte 4.4 Stahlkennzeichnungssystem nach EN 10027-1, EN 10 027-2 und IC-10[71].

Kennzeichnung von Stahlnormen						
Grundsymbole (EN 10027-1)			Zusätzliche Symbole			
Buchstabe	Eigenschaften		Stähle		+	Stahlprodukte
	Kohlenstoffanteil	Legierungselemente	Gruppe 1	Gruppe 2		
Kennzeichnung nach EN 10 027-1, Numerische Kennzeichnung nach EN 10 027-2						

**Gruppe 1** - Kennzeichnungen, die auf der Grundlage ihrer Verwendung und der mechanischen und physikalischen Eigenschaften von Stählen entwickelt wurden.

**Gruppe 2** - Kennzeichnungen, die auf der Grundlage der chemischen Zusammensetzung von Stählen entwickelt wurden.

A - Beispiele für Symbole für besondere Anforderungen

B - Beispiele für Symbole für Beschichtungsarten

C - Beispiele für Symbole für Verarbeitungsstatus

# 5. NUMERISCHE SYMBOLE AUS STAHL

Für alle Stähle, die in den europäischen Normen enthalten sind, wird die Nummer gemäß dem System in EN 10027-2 vergeben. Diese Nummern sind zusätzlich zur Stahlkennzeichnung nach EN 10027-1. Die für die Nummernvergabe zuständige Behörde ist das Europäische Registeramt in Düsseldorf. Ein Antrag auf Zuteilung einer Nummer für Stahl, der nach den nationalen Normen hergestellt wird, ist über eine zuständige Behörde einzureichen. Die Vorgehensweise bei der Erstellung numerischer Symbole ist in Tabelle 5.1 beschrieben.

Tabelle 5.1 Erstellen der numerischen Kennzeichnung[71]

X.	XX	XX(XX)
Nummer der Hauptwarengruppe 1 - Stahl 2 - 9 – kann anderen Materialien zugeordnet werden	Anzahl der Stahlklassen - gekennzeichnet gemäß der Tabelle der Stahlzahlen Seriennummer.	Die Seriennummer besteht derzeit aus zwei Ziffern, die restlichen Ziffern (in Klammern) sind für den zukünftigen Gebrauch bestimmt.

## 5.1. Armierung von Stahl in einigen EU-Ländern

Obwohl die EU-Mitgliedsländer allmählich ein einheitliches System der Stahlkennzeichnung nach den europäischen Normen verwenden, ist es immer noch möglich, auf Stahl zu treffen, der nach den Normen anderer Länder gekennzeichnet ist. Stahl wird in allen Ländern, die ihn produzieren, nach technischen Standards und auch von den einzelnen Produzenten gekennzeichnet. Der folgende Teil beschäftigt sich mit dem Kennzeichnungssystem nach den technischen Normen in Deutschland, Frankreich, Großbritannien, Italien, Spanien und Belgien. Es gibt auch bisher verwendete Symbole, die in der technischen Dokumentation noch zu finden sind.

Einzelne Stahlsorten sind durch Symbole aus Buchstaben, Ziffern oder Buchstaben und Ziffern gekennzeichnet. Für die Erstellung eines Kennzeichnungssystems werden verschiedene Kriterien ausgewählt. Die häufigste ist die chemische Zusammensetzung. In einigen anderen Systemen ist es z.B. die Zugfestigkeit und manchmal nur eine Seriennummer mit einem Symbol für Stahl, das entsprechend dem Verwendungszweck verwendet wird, etc. Die bei der Kennzeichnung von legiertem Stahl verwendeten Buchstaben bedeuten in der Regel hauptsächlich Legierungselemente. Wie aus Tabelle 5.3

ersichtlich, wurden in den einzelnen Ländern für die einzelnen Elemente unterschiedliche Buchstaben verwendet. Diese ist derzeit in den EU-Ländern vereinheitlicht.

*Tabelle 5.3 Kennzeichnung von Stahl in ausgewählten EU-Ländern[71].*

Element	Symbol	Deutschland	Frankreich	Italien	Spanien
Aluminium	Al	Al	A	A	Al
Boron	B	B	B	-	B
Carbon	C	-	-	-	-
cobalt	Co	Co	K	K	Co
Chromium	Cr	Cr	C	C	Cr
Copper	Cu	Cu	U	-	Cu
Manganese	Mn	Mn	M	M	Mn
Molybdenum	Mo	Mo	D	D	Mo
Nitrogen	N	N	Az	Az	N
Niobium	Nb	Nb	Nb	-	Nb
Nickel	Ni	Ni	N	N	Ni
Phosphorus	P	P	P	-	P
Lead	Pb	Pb	-	-	Pb
Silicon	Si	Si	S	S	Si
Titanium	Ti	Ti	T	T	Ti
Vanadium	V	V	V	-	V
Tungsten	W	W	W	-	W
Zirconium	Zr	Zr	Zr	-	Zr

*Hinweis: Bei französischen und italienischen Stählen wurden die Symbole in der Tabelle bis Mitte der 80er Jahre verwendet. Derzeit entsprechen die verwendeten Symbole den deutschen.*

## 5.2. Stahlkennzeichnung nach DIN-Norm

In Deutschland werden Stähle auf zwei Arten gekennzeichnet:

- Durch das numerische Symbol - dieses bestimmt die Werkstoffnummer,
- Durch Kombination von Zahlen und Buchstaben.

Bei letzterem Verfahren werden Stähle in mehrere Gruppen eingeteilt (siehe Tabelle 5.4).

Registerkarte 5.4 Klassifizierung von Stählen[71]

Nicht legierter (Kohlenstoff-)Stahl		Legierte Stähle	
Nicht wärmebehandelt, außer beim Normalglühen.	Für die Wärmebehandlung vorgesehen		Niedriglegierte Stähle - Gehalt an Legierungselementen bis zu 5 %.
Gewöhnlicher Stahl (einschließlich niedrig legierter Stähle)	Qualitätsstahl	Edelstahl	Superlegierte Stähle - Gehalt an Legierungselementen über 5 %.

#### Kennzeichnung unlegierter, unveredelter Stähle

##### 1. Symbol - Großbuchstabe zur Kennzeichnung des Gießverfahrens

- U - Stahl mit Rand
- R - getöteter oder halbtoter Stahl
- RR - vollständig abgetöteter Stahl

##### 2. Symbol - Buchstaben St

1. Symbol - eine zweistellige Zahl, die die niedrigste Zugfestigkeit in kp/mm<sup>2</sup> angibt.
2. Symbol - Nummer der Gütegruppe; Stähle werden nach dem Gehalt an P oder S (oder C) in Gruppen eingeteilt, - die Qualitätsgruppennummer durch eine horizontale Linie von der Zahl mit der niedrigsten Festigkeit getrennt ist.

Die vier Symbole bilden die Grundmarkierung des Stahls. Dies kann durch zusätzliche Symbole ergänzt werden:

#### Vor dem 1. Symbol

- E - Stahl, hergestellt im Elektroofen
- M - Stahl hergestellt im offenen Herdofen
- Y - Stahl hergestellt im Konverter

#### Zwischen dem 1. und 2. Symbol

- Q - geeignet zum Schneiden
- Z - geeignet zum Ziehen von Stangen
- P - geeignet für Gesenkschmieden oder Schmieden mit Schmiedeanlagen

- Ro - bestimmt für die Herstellung von Rohren (nach dem letzten Symbol)
- U - geliefert nach dem Walzen
- N - geliefert im normal geglühten Zustand.

### Kennzeichnung von unlegierten Qualitätsstählen

- Die Kennzeichnung dieser Stähle gibt den mittleren Kohlenstoffgehalt an.
  1. Symbol - Buchstabe C
  2. Symbol - Zahl, die den 100-fachen höheren Kohlenstoffgehalt angibt.

- Kennzeichnung von unlegierten Edelstählen
  1. Symbol - Buchstaben Ck
  2. Symbol - Zahl, die den 100-fachen höheren mittleren Kohlenstoffgehalt angibt.

- Kennzeichnung von niedrig legierten Edelstählen
  1. Symbol - Zahl, die einen 100fach höheren mittleren Kohlenstoffgehalt angibt.
  2. Symbol - chemische Symbole von Legierungselementen, die in aufeinanderfolgender Reihenfolge entsprechend ihrem mittleren Gehalt an Stahl angeordnet sind. Es werden nur die Elemente angegeben, die für die Kennzeichnung von Stahl oder für die Unterscheidung zwischen den einzelnen Stahlsorten wichtig sind.

3. Symbol - mittlerer Gehalt an Legierungselementen, ausgedrückt durch ein Vielfaches des tatsächlichen mittleren Gehalts gemäß Tabelle 5.5.

*Tabelle 5.5 Gehalt an Legierungselementen, ausgedrückt durch ein Vielfaches des tatsächlichen mittleren Gehalts[71].*

Legierungselemente	Koeffizient
Cr, Co, Mn, Ni, Si, W	4
Al, Cu, Mo, Ti, V	10
P, S, N	100

### Kennzeichnung von superlegierten Stählen

Für diese Stähle wird der tatsächliche Gehalt der wichtigsten Legierungselemente angegeben. Im Gegensatz zu den niedrig legierten Stählen ist das erste Symbol der Buchstabe X.

1. Symbol - Buchstabe X
2. Symbol - Zahl, die einen 100-mal höheren mittleren Kohlenstoffgehalt angibt.
3. Symbol - chemische Symbole wichtiger Legierungselemente.
4. Symbol - Zahl, die den ungefähren mittleren Gehalt der Hauptlegierungselemente angibt.

## 5.3. Weltstahlproduzenten

In den letzten Jahren hat China 567,8 Millionen Tonnen Stahl produziert und damit fast die Hälfte der Produktion von world´s produziert. Der zweitgrößte Produzent ist Japan, gefolgt von Russland, hat die Vereinigten Staaten übertroffen. Die Stahlproduktion in Nordamerika sank um fast 34 % (23 % in Europa). Weitere Einzelheiten finden Sie in Tabelle 5.8 und Abbildung 5.12. [60]

Die Stahlindustrie beginnt sich mit einer allmählichen Erholung der Wirtschaft von world´s von der Krise zu erholen. Die Stahlproduktion stieg gegenüber dem Vorjahr um 30 % (auf 106,4 Mio. t). Im Vergleich zu den 117 Millionen Tonnen Stahl, die in der letzten Periode produziert wurden, ist die Produktion laut Reuters jedoch zurückgegangen. Laut Accenture-Analyst John Lichtenstein sollten die Weltproduktion und die Nachfrage nach Stahl wieder um ca. 10 % steigen und die Produktion damit auf das Niveau der Jahre 2008 - 2010 steigen. [71]

### Mitglieder von WorldAutoSteel:

- Arcelor Mittal - Luxemburg
- Baoshan Iron & Steel Co. Ltd. - China
- China Steel Corporation - China - China
- Hyundai-Steel Company - Südkorea
- JFE Steel Corporation - Japan
- Kobe Steel, Ltd. - Japan
- Nippon Steel Corporation - Japan
- Nucor Corporation - USA
- POSCO - Südkorea
- SeverStal - Russland / USA
- Sumitomo Metal Industries, Ltd. - Japan
- Tata Steel & Corus - Indien, Großbritannien, Niederlande
- ThyssenKrupp Stahl AG - Deutschland
- USIMINAS - Brasilien
- United States Steel Corporation - USA
- Voestalpine Stahl GmbH - Österreich

*Registerkarte 5,8 80 größte Stahlproduzenten der Welt im Jahr 2008, mmt - Produktion in Millionen Tonnen[60]*

2008		2007			2008		2007		
Rank	mmt	Rank	mmt	Company	Rank	mmt	Rank	mmt	Company
1	103.3	1	116.4	ArcelorMittal	41	6.9	40	7.4	Jiuquan Steel
2	37.5	2	35.7	Nippon Steel <sup>1</sup>	42	6.9	41	7.3	Salzgitter <sup>5</sup>
3	35.4	5	28.6	Baosteel Group	43	6.8	43	6.9	voestalpine
4	34.7	4	31.1	POSCO	44	6.5	39	7.8	Jianlong Group
5	33.3	NA	31.1	Hebei Steel Group	45	6.5	44	6.8	BlueScope
6	33.0	3	34.0	JFE	46	6.4	46	6.4	Metallinvest
7	27.7	11	20.2	Wuhan Steel Group	47	6.4	47	6.4	Beitei Steel
8	24.4	6	26.5	Tata Steel <sup>2</sup>	48	6.1	60	5.2	Guofeng Steel
9	23.3	8	22.9	Jiangsu Shagang Group	49	6.1	51	6.1	SSAB
10	23.2	10	21.5	U.S. Steel	50	6.0	56	5.4	Erdemir
11	21.8	8	23.8	Shandong Steel Group	51	5.9	54	5.9	AK Steel
12	20.4	12	20.0	Nucor	52	5.9	52	6.1	Mechel
13	20.4	13	18.6	Gerdau	53	5.7	53	6.0	Nanjing Steel
14	19.2	15	17.3	Severstal	54	5.6	42	7.0	Ilyich
15	17.7	17	16.2	Evrz	55	5.4	61	5.0	Tonghua Steel
16	16.9	14	17.9	Riva	56	5.3	56	5.6	Xinyu Steel
17	16.0	NA	16.2	Anshan Steel	57	5.2	57	5.5	HKM <sup>6</sup>
18	15.9	16	17.0	ThyssenKrupp <sup>3</sup>	58	5.1	NA	4.5	Sanming Steel
19	15.0	18	14.2	Maanshan Steel	59	5.0	59	5.3	CSN
20	14.1	20	13.8	Sumitomo Metal Ind	60	4.7	63	4.6	HADEED
21	13.7	19	13.9	SAIL	61	4.5	68	4.4	Tianjin Tiantie Group
22	12.2	23	12.9	Shougang Group	62	4.4	72	4.0	Hebei Jinxi Group
23	12.0	21	13.3	Magnitogorsk	63	4.3	62	5.0	Steel Dynamics
24	11.3	30	9.7	Novolipetsk	64	4.3	69	4.1	Pingxiang Steel
25	11.3	26	11.1	Hunan Valin Group	65	4.3	65	4.5	Ezz Group
26	11.0	27	10.9	China Steel Corporation	66	4.0	71	4.1	Nisshin
27	10.4	22	13.1	Techint <sup>4</sup>	67	4.0	70	4.1	Tianjin Steel
28	10.0	28	10.1	IMDRO	68	3.9	64	4.6	Zaporizhstahl
29	9.9	NA	11.6	Industrial Union of Donbass	69	3.8	NA	3.0	JSW Steel
30	9.9	29	10.0	Hyundai Steel	70	3.7	73	4.0	Lion Group
31	9.8	34	8.8	Baotou Steel	71	3.7	75	3.5	AHMSA
32	9.2	31	9.3	Taiyuan Steel	72	3.7	NA	3.0	ICDAS
33	9.0	33	9.0	Anyang Steel	73	3.6	NA	4.3	SIDOR <sup>6</sup>
34	8.2	32	9.1	Metinvest	74	3.6	78	3.5	Hangzhou Steel
35	8.2	37	8.1	Celsa	75	3.5	NA	2.7	Hebei Jingye Steel
36	8.1	38	8.1	Kobe Steel	76	3.5	77	3.5	Chongqing Steel
37	8.0	35	8.7	Usiminas	77	3.4	NA	2.7	Commercial Metals
38	7.5	45	6.6	Panzhuhua Steel	78	3.4	74	3.6	Essar Steel
39	7.5	50	6.2	Rizhao Steel	79	3.4	79	3.5	Tokyo Steel
40	7.4	NA	7.6	Benxi Steel	80	3.1	NA	3.2	Vizag Steel

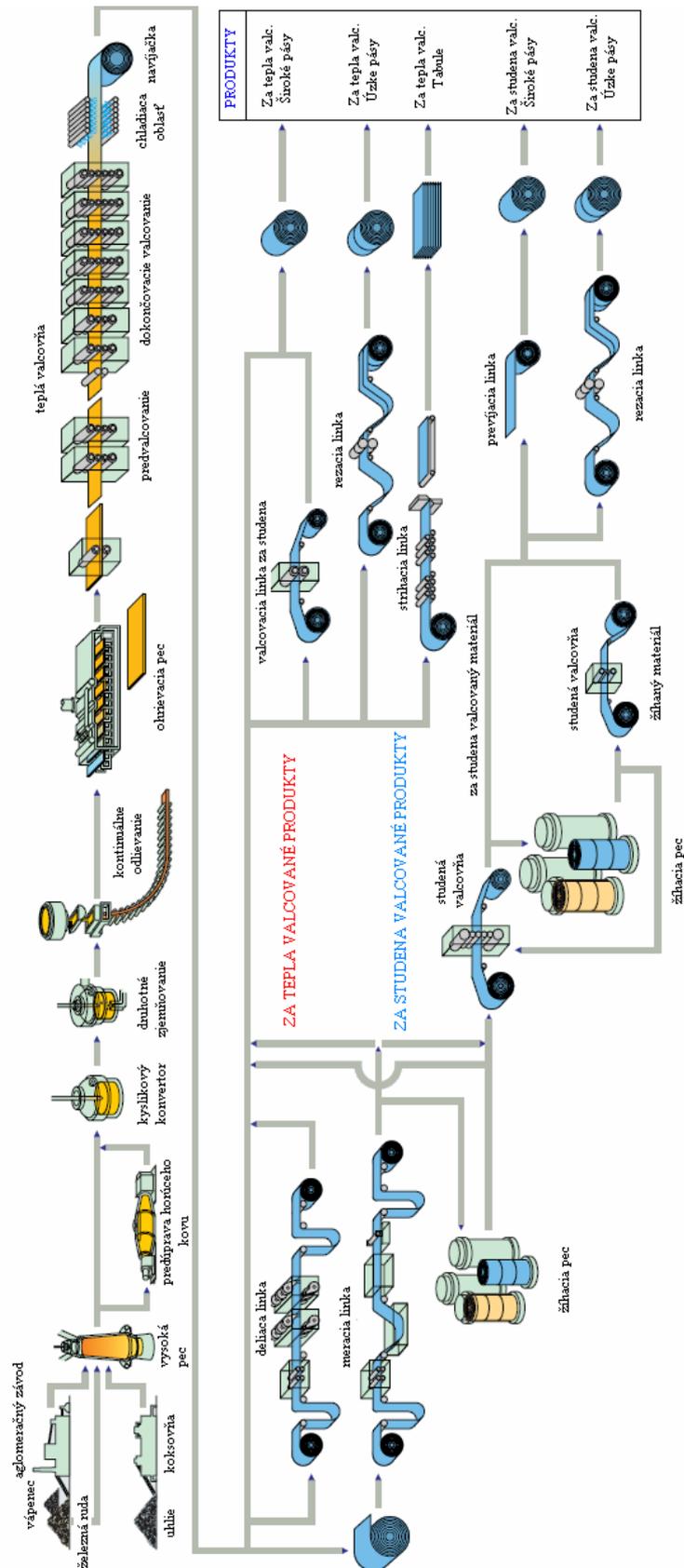


Abbildung 5.12 Produktionsprozesse von Stahlblechen[71]

# 6.BEWERTUNG DER MATERIALOBER- FLÄCHE

Die Oberfläche von Industrieteilen und Komponenten oder Werkstücken kann als physikalische Grenze zwischen einem Werkstück und der Umgebung beschrieben werden. Die tatsächliche Oberfläche des Werkstücks wird durch internationale Normen (ISO) als eine Reihe von charakteristischen Eigenschaften definiert, die physikalisch existieren und das Werkstück von der Umgebung unterscheiden. Es wird davon ausgegangen, dass die Werkstückoberfläche einen rein mechanischen Charakter hat. Tatsächlich hat die Oberfläche auch einen elektromagnetischen Charakter. [92]

## Es gibt weitere Definitionen nach der ISO:

- Die reale mechanische Oberfläche ist eine Grenzfläche, die durch den Kugelkontakt mit dem Radius  $r$  bestimmt wird; die geometrische Lage der Zentren des idealen Kugelkontaktes, auch mit dem Radius  $r$ , rollt von der realen Oberfläche des Werkstücks ab.
- Die reale elektromagnetische Oberfläche ist ein geometrischer Ort der effektiven Reflexion der Punkte der realen Werkstückoberfläche, elektromagnetische Strahlung der angegebenen Wellenlänge.

Die Norm ISO 4287 ist derzeit die wichtigste gültige internationale Norm, die die Begriffe, Definitionen und Parameter in Bezug auf die Oberfläche festlegt. Diese Parameter entsprechen verschiedenen Teilen eines Signals, das durch die Berührung erzeugt wird. Die Parameter sind durch verschiedene Buchstaben gekennzeichnet:

- P** - Primärprofil,
- R** - Rauheitsprofil,
- W** - Welligkeitsprofil.

## 6.1. Materialoberflächenbewertung - Hauptparameter

Höhe des Profils  $Z(x)$  - ist der Wert der Koordinate  $Z(x)$  an beliebiger Stelle  $x$ . [92].  
Lokale Steigung  $dZ/dx$  - es ist eine Steigung des Profils am Punkt  $x$ , Bild 6.1.

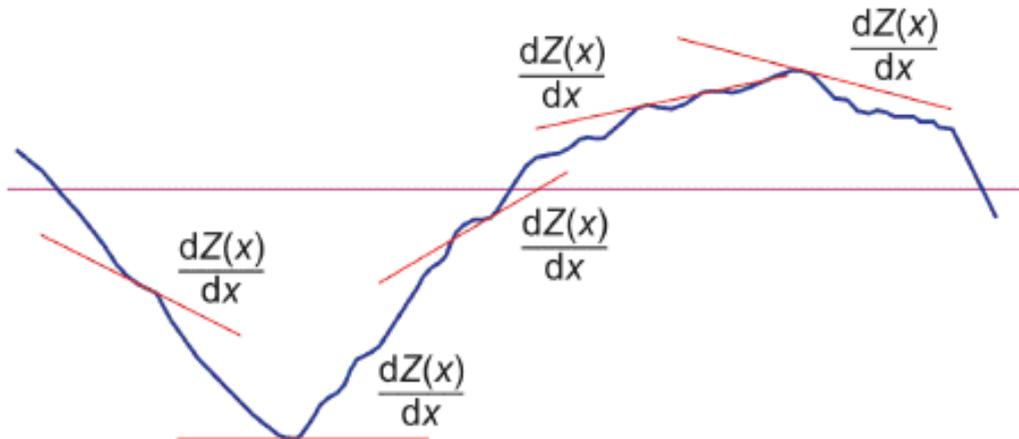


Abbildung 6.1 Lokale Neigung [92]

**Profilspitze** - sie ist ein Teil des Profils, der seine benachbarten Zwischensegmente mit der Mittellinie des Profils nach außen verbindet.

**Profital** - es ist ein Teil des Profils, das seine beiden benachbarten Zwischensegmente mit der Mittellinie des Profils nach innen verbindet.

**Profilelement** - es ist eine Spitze des Profils und des verbundenen Profitalts, Bild 6.2.

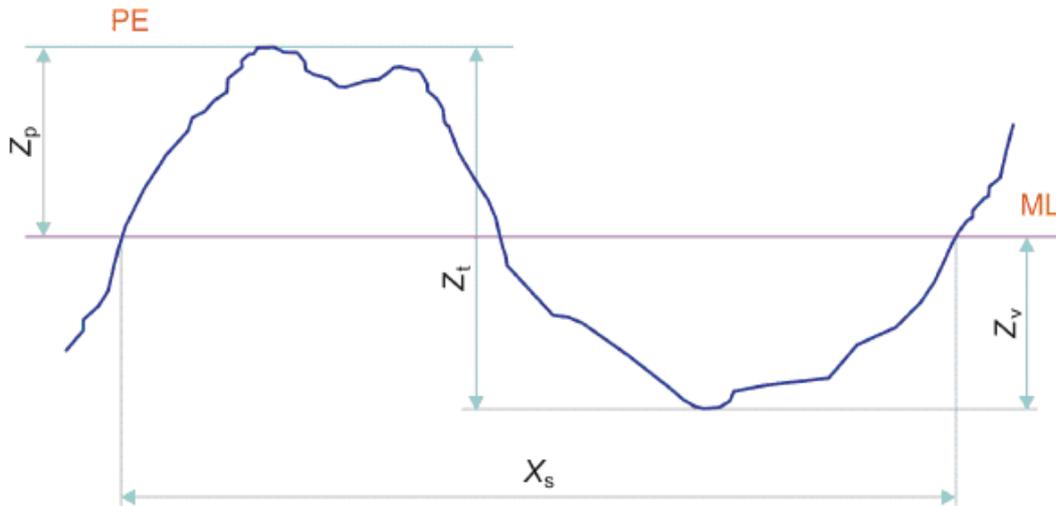


Abbildung 6.2 Profilelement[92].  
PE - Profilelement, ML - Mittellinie

Höhe der Profilspitze  $Z_p$  - ist ein Abstand zwischen der Mittellinie des Profils und dem höchsten Punkt des Profils, Bild 6.2.

Die Tiefe des Profiltals  $Z_v$  - ist ein Abstand zwischen der Mittellinie des Profils und dem tiefsten Punkt des Profiltals, Bild 6.2.

Höhe des Profilelements  $Z_t$  - es ist die Summe aus Peakhöhe und Taltiefe, Bild 6.2.

Profilelementabstand  $X_s$  - es ist die Länge des Segments der Profilmittellinie, die das Profilelement enthält, Bild 6.2.

Materiallänge des Profils, Ebene  $c$   $MI(c)$  - es ist die Summe der Längen der Segmente, die durch einen Schnitt parallel zur Mittellinie des Profils auf der Ebene  $c$  durch Trennen der Profilspitzen in der Abtastlänge erzeugt werden, Bild 6.3,[92].

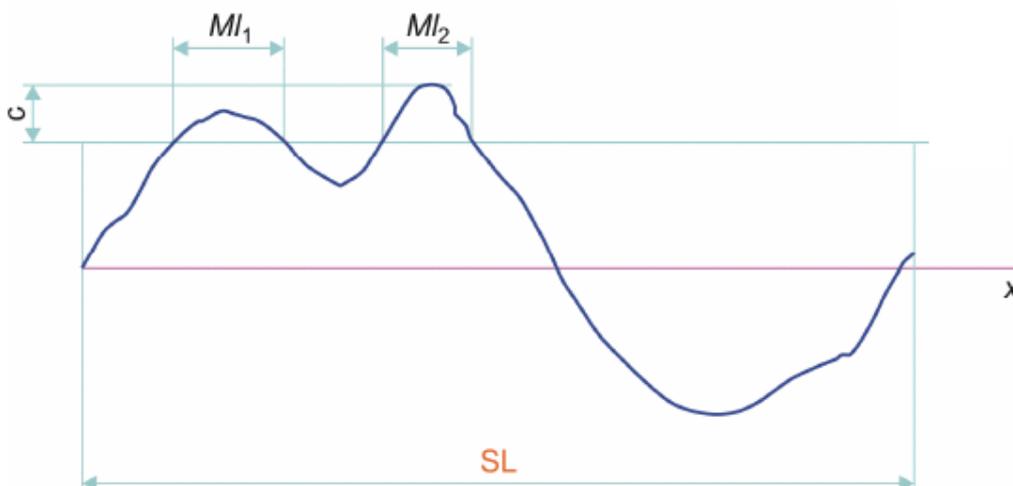


Abbildung 6.3 Materiallänge [92]  
 $MI(c) = MI1 + MI2, SL - \text{Abtastlänge}$

Die Spitze des höchsten Profilpeaks  $P_p, R_p, W_p$  - es ist die höchste Höhe des Profilpeaks  $Z_p$  in der Abtastlänge, Abbildung 6.4. [92]

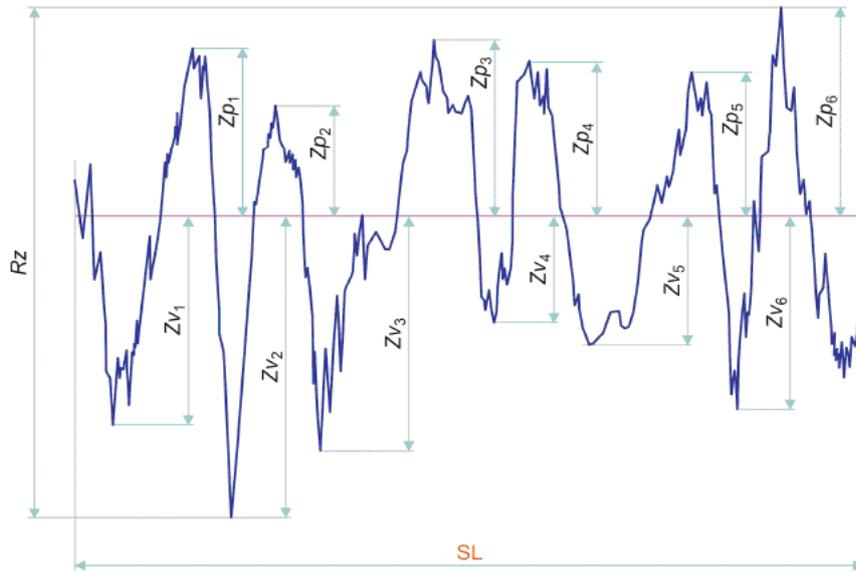


Bild 6.4 Abtastlänge (Beispiel eines Rauheitsprofils)[92]

Die Tiefe des tiefsten Tals in den Profilen  $P_v, R_v, W_v$  - das tiefste Tal des Profils  $Z_v$  in der Abtastlänge.

Das höchste Profil  $P_z, R_z, W_z$  - es ist die Summe aus dem Gipfel des Gipfels  $Z_p$  und dem tiefsten Tal des Profils  $Z_v$  in der Abtastlänge.

Mittlere Höhe des Profilelements  $P_c, R_c, W_c$  - es ist der mittlere Wert der Höhen der Profilelemente  $Z_t$  in der Abtastlänge.

$$P_c, R_c, W_c = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Z_{t_i} \quad (6.1)$$

Die Gesamthöhe des Profils  $P_t, R_t, W_t$  - es ist die Summe aus der Höhe der höchsten Profilspitze  $Z_p$  und der Tiefe des Profiltals  $Z_v$  in der bewerteten Länge. [92].

Die mittlere arithmetische Abweichung des Profils  $P_a, R_a, W_a$  - es ist der mittlere arithmetische Wert der absoluten Profilabweichungen  $Z(x)$  in der Abtastlänge.

$$P_a, R_a, W_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx \quad (6.2)$$

## 6.2. Parameter zur Beurteilung der 3D-Oberflächenrauheit

**Amplitudenparameter, die bei der 3D-Auswertung verwendet werden, abgeleitet aus 2D-Parametern nach ISO 4287:**

- Sa - mittlere arithmetische Abweichung der Oberfläche
- Sq - mittlere quadratische Abweichung der Oberfläche
- St - Gesamthöhe des Profils
- Sp - maximale Peakhöhe
- Sv - maximale Talsohle
- Sz - zehn Punkte Oberflächenhöhe
- Ssk - Schiefe der Höhenverteilungskurve
- Sku - Schärfe der Oberflächenhöhen

**Flächen- und Volumenparameter:**

- Smr - Verhältnis in einer bestimmten Tiefe (flächenhaftes Materialverhältnis) - es wird mit einem Grenzwert und Referenzdaten angegeben.
- Sdc - Höhendifferenz der Flächenschnitte - bestimmt durch zwei Grenzwerte (in %). [9]
- Smvr - der Mittelwert des Leerraumradius - das Volumen des Oberflächenmaterials, erhalten durch Messung des Raumes zwischen der imaginären horizontalen Ebene, die in der größten Tiefe des Oberflächenprofils und den Oberflächenpunkten gefaltet ist.
- Smmr - Mittelwert des Materialvolumenanteils - das Gesamtvolumen der Materialoberfläche, erhalten durch Messung des Raumes zwischen der imaginären horizontalen Ebene, die in der größten Tiefe des Oberflächenprofils gefaltet ist, und den Oberflächenpunkten,[12],[92].

**Räumliche Parameter:**

- SPc - Anzahl der Peaks auf der Oberfläche - Dichte der Peaks zwischen zwei Niveaus c1 und c2, wobei c1 und c2 Begrenzungsebenen sind, die in Bezug auf die Mittelebene 0 definiert sind. c1 muss niedriger als c2 sein. Der Peak wird nur berücksichtigt, wenn er c2 überschreitet und unter c1 übergeben wird. Der Parameter wird ausgedrückt durch die Anzahl der Peaks pro . [9]
- Sds - Gipfeldichte - Anzahl der Gipfel pro mm. Die Gipfel werden aus Spitzen abgeleitet. Ein Gipfel ist ein Gipfel, der höher als 8 nächstgelegene Punkte ist.

- Sal - Autokorrelationslänge - Länge entsprechend der schnellsten Abnahme der Autokorrelationsfunktion. Sie gibt die Anzahl der Wellenlängen des Oberflächenprofils an. Hohe Werte deuten auf hohe Wellenlängen hin.
- Str - Textur-Seitenverhältnis - Verhältnis des kürzesten Tropfens zur größten Länge. Wenn sich der Wert 1 nähert, ist die Oberfläche isotrop, wenn sie nahe 0 ist, ist die Oberfläche anisotrop.
- Std - Texturrichtung - bestimmt die Hauptwinkelrichtung der Oberflächenstruktur. Es ist sinnvoll, wenn der Wert kleiner als 0,5 ist. Die Winkelrichtung wird in Grad zwischen  $-90^\circ$  und  $90^\circ$  ausgedrückt.
- Sfd - fraktale Dimension der Oberfläche - es zeigt die Formkomplexität des Oberflächenprofils unter Verwendung der Theorie der fraktalen Geometrie an. Die Oberflächenabmessung variiert zwischen zwei Werten für eine planare Oberfläche und drei Werten für eine komplexe Form einer Ebene. Für einige Oberflächenformen kann die fraktale Dimension nicht bestimmt werden,[92].

#### **Hybride Parameter - kombinieren sowohl Amplituden- als auch räumliche Parameter:**

- Sdq - quadratische Neigung der Oberfläche
- Ssc - arithmetisches Mittel der Gipfelkrümmung
- Sdr - entwickeltes Grenzflächenverhältnis

#### **Funktionsparameter - charakterisieren funktionale Aspekte der Oberfläche:**

- Sk - Kernrauigkeitstiefe - erweiterter 2D-Parameter Rk
- Spk - reduzierte Peakhöhe - erweiterter 2D-Parameter Rpk
- Svk - reduzierte Taltiefe - erweiterter 2D-Parameter Rvk
- Sr1 - oberes Materialverhältnis
- Sr2 - niedrigeres Materialverhältnis
- Sa1 - oberer Bereich (eines Dreiecks, entsprechend den Spitzen)
- Ss2 - unterer Bereich (eines Dreiecks, entspricht den Tälern)

#### **Parameter Rk**

- Sbi - Oberflächenlagerindex
- Sci - Kernflüssigkeitsrückhalteindex
- Svi - Talwasserrückhalteindex

#### **Parameter SURFSTAND**

- Vm(h) - Materialvolumen in einer bestimmten Tiefe
- Vv(h) - Hohlraumvolumen in einer bestimmten Tiefe

- $V_{mp}$  - maximales Materialvolumen
- $V_{mc}$  - Volumen des Materials des Kerns
- $V_{vc}$  - Kernhohlraumvolumen
- $V_{vv}$  - Talhohlraumvolumen

Ebenheitsparameter für die nach dem Verfahren der kleinsten Quadrate geglättete Oberfläche, die durch einen Tiefpassfilter gefiltert wird:

- $FL_{Tt}$  - Ebenheitsabweichung von Spitze zu Tal
- $FL_{Tp}$  - Spitzenwert zu Referenzplanheitsabweichung
- $FL_{Tv}$  - Bezug auf die Abweichung der Talebenheit
- $FL_{Tq}$  - Effektive Abweichung der quadratischen Planheit[12],[92].

### 6.3. Vergleich von 2D und 3D

Derzeit wurden 2D- und 3D-Methoden zur Oberflächenbewertung entwickelt und verbessert. In Bezug auf die 2D-Auswertung sind die Parameter  $R_a$  und  $R_z$  wegen der einfachen Messung der mittleren Rauheitswerte, internationaler Normen oder wegen ihrer Übersichtlichkeit und der Tatsache, dass die Messtechnik von Anfang an auf diesen Parametern basiert, nach wie vor weit verbreitet. Für die Rauheitsmessung sind die Parameter  $R_a$ ,  $R_z$  nach wie vor sehr wichtig, aber bei der Bewertung der funktionellen Eigenschaften praktisch nicht anwendbar.

Der Grund dafür ist, dass verschiedene Oberflächen den gleichen Rauheitswert haben können, aber die Voraussetzungen für die Ausführung der Funktion unterschiedlich sind, z.B. kann das obere Profil (Bild 6.16) die Gleitlagerfunktion besser erfüllen als das untere Profil. [10]

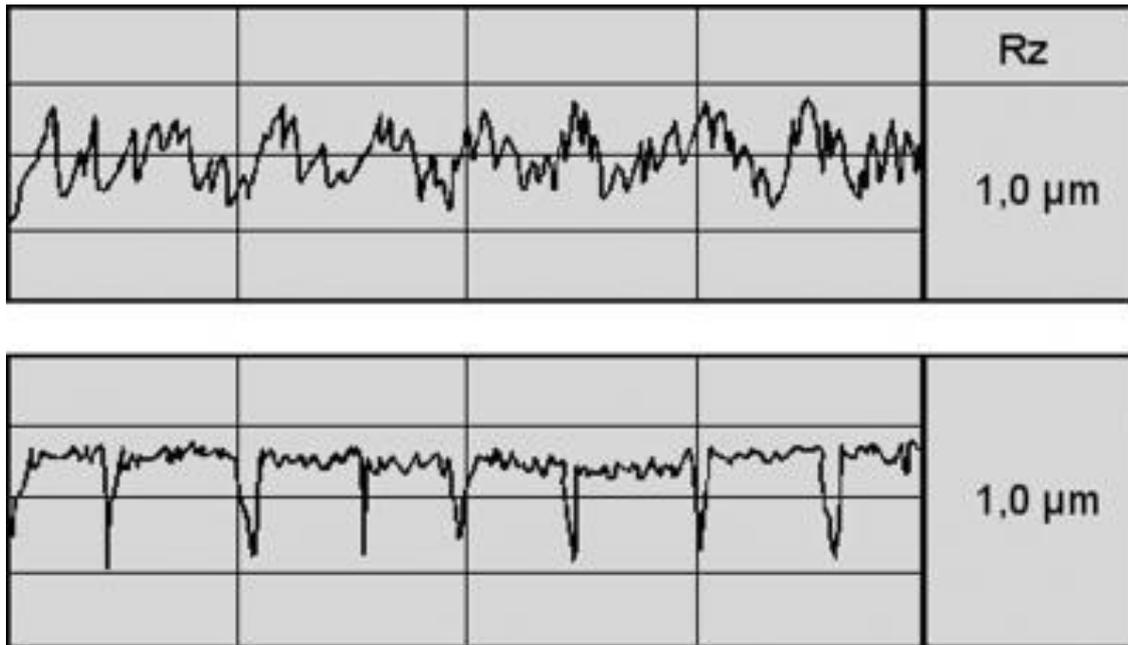


Bild 6.16 Messen mit Kontaktprofilometer - Rz-Werte mit verschiedenen Funktionen[7].

2D-Parameter können keine Auskunft über die Verschleißrate der einzelnen Oberflächentexturen, über die Fähigkeit, Schmiermittel zurückzuhalten oder über die Anfälligkeit für Rissbildung durch die Bearbeitung geben. Für eine vollständige Anwendung benötigen einige Parameter andere Informationen als nur den numerischen Wert, wie z.B. die Richtung der Bearbeitungsmarkierungen. Der Parameter, der diese Richtung beschreibt, ist mehr ein Vektor als ein Skalar. Für zwei Oberflächen mit Spitzen gleicher Höhe, von denen eine Oberflächenspitze nach rechts und die andere nach links zeigt, sind die Parameter  $R_a$ ,  $R_q$  gleich. Die Richtung der Relativbewegung ist jedoch aufgrund der belasteten Kanten unterschiedlich. Wenn diese Oberflächen in eine falsche Richtung montiert werden, kann dies zu Fehlfunktionen führen. Es ist wichtig, nicht nur auf eine Oberfläche zu achten, sondern auf das gesamte System, das aus mehreren Oberflächen besteht. Die Bewertung der Oberflächenfunktion kann daher nicht vom Gesamtsystem getrennt werden. [10]

Der Hauptnachteil der 2D-Auswertung ist die Tatsache, dass die Ergebnisse begrenzt sind und von der Position des Regelabschnitts abhängen. Die Messung zeigt oft eine Position mit stärkeren Höhenabweichungen der Oberfläche. Es ist jedoch nicht möglich, den Charakter und das Ausmaß größerer Abweichungen, die Mängel oder Oberflächenschäden darstellen, anhand nur eines Profils zu bewerten. Die 3D-Messung liefert viel mehr Daten, was die Objektivität der Oberflächenbewertung erhöht. Die axonometrische Auswertung ermöglicht es, das Ausmaß der stärkeren Abweichungen zu spezifizieren.

In der Praxis empfiehlt es sich, bei der Analyse eines größeren Oberflächenfehlers eine 2D- und 3D-Auswertung zu kombinieren. Im Falle einer 3D-Analyse eines tiefen Risses,

Tiefe nicht genau gemessen werden kann, empfiehlt es sich, ein Profil aufzuzeichnen, das es ermöglicht, die Rissmaße zu bewerten und seine Form detailliert aufzuzeichnen, was es ermöglicht, detailliertere Informationen zur Identifizierung des Risseffekts auf die Oberflächenfunktion Abbildung 6.17 zu erhalten.

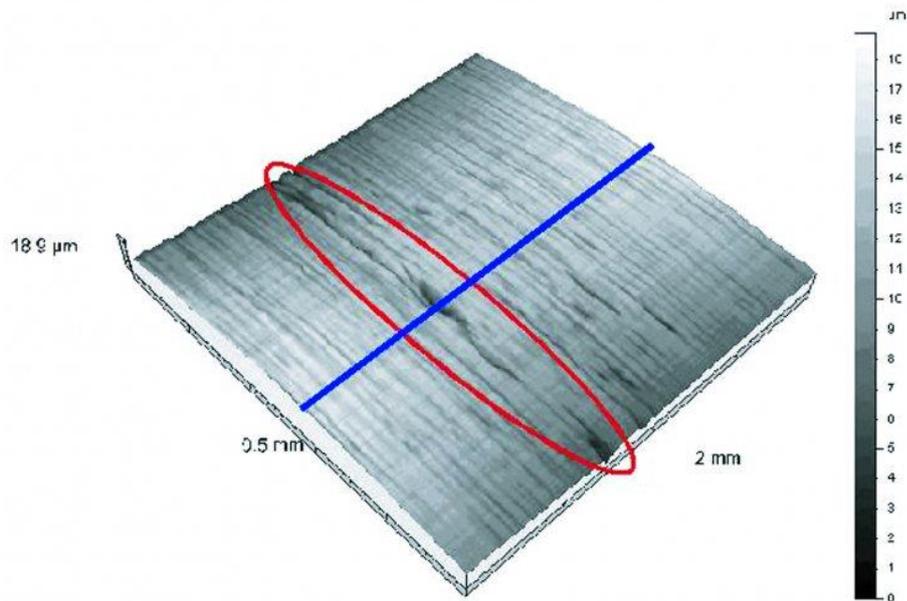


Abbildung 6.17 3D-Darstellung der Oberfläche mit Rissbildung mit markiertem nachfolgenden 2D-Abschnitt[10].

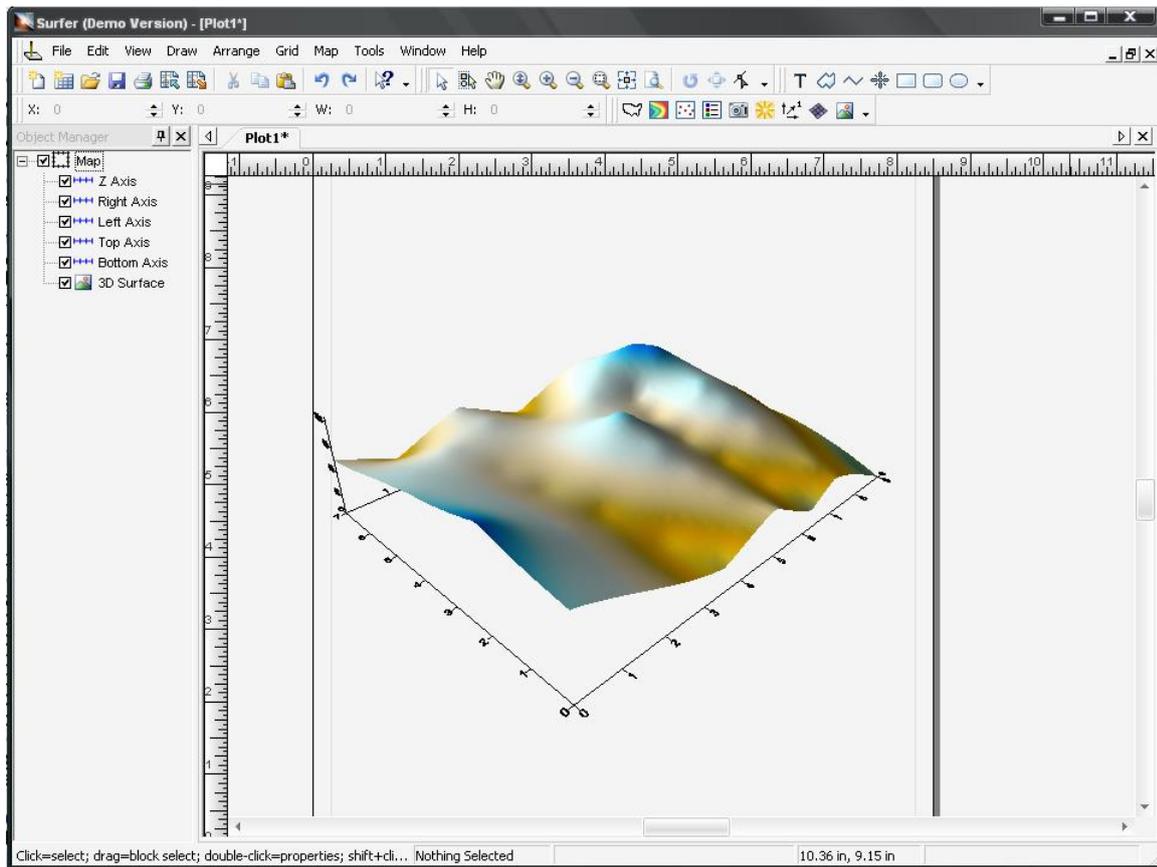


Abbildung 6.27 Beispiel einer 3D-Ansicht der Oberfläche im Programm Surfer 9[92].

# 7.MESSGERÄTE UND PROGRAMME

Bei der Entwicklung neuer Produkte legen die Hersteller von Messgeräten großen Wert auf die Verarbeitung der Messdaten. Die Messgeräte werden daher mit modernen Spezial-Computerprogrammen geliefert. Diese Programme sind oft nur mit einem konkreten Messgerät kompatibel und umgekehrt. Solche Lösungen sind charakteristisch für die Systeme, in denen die Software nicht nur die gemessenen Daten auswertet, sondern auch Steuerungs- und Überwachungsfunktionen übernimmt.

## 7.1. Optosurf QS 500

Optosurf QS 500 (siehe Abbildung 6.18) verwendet Lichtstreuungsmethoden. Das Prinzip dieses Verfahrens besteht darin, die Oberfläche mit einem Lichtfleck mit einem Radius von 0,9 mm zu beleuchten. Reflektiertes Streulicht wird von einem Sensor erfasst. Die Streuung wird statistisch ausgewertet und durch Berechnung wird der optische Parameter der Rauheit  $S_0$  erhalten, der in etwa dem Parameter  $R_a$  entspricht. Die Messung ist unabhängig von der Oberflächenreflexion, d.h. dunkle Oberflächen haben den gleichen Rauheitswert wie helle Oberflächen. Es ist möglich, alle Oberflächen von Funktionsteilen zu messen. Der Sensor ist in der Lage, auch unter ungünstigen Betriebsbedingungen zuverlässig zu messen und auch Vibrationen zu verarbeiten.



Abbildung 6.18 Messen mit dem Sensor QS 500 [7]

Diese Messung wird als zusätzliche Messung zu herkömmlichen Kontaktmessverfahren verwendet, aber ihre Messgeschwindigkeit ist viel höher - über 1000 Messungen pro Sekunde. Die Messgeschwindigkeit ist jedoch nicht der Hauptparameter, der die

Lichtstreuungsmethode vor den Kontaktmethoden setzt. In der Praxis ist es oft notwendig, die Richtung der Markierungen nach der Bearbeitung zu kennen oder das Bearbeitungsverfahren zu erkennen. Ein Beispiel kann z.B. das Schleifen und Finish von Kurbelwellen im Motorenbau sein. Das Ergebnis des Schleifens ist die Struktur von Gravuren mit Profilspitzen. Während der Endbearbeitung werden die Spitzen teilweise entfernt, was die Funktionseigenschaften deutlich verbessert, Reibung und Verschleiß reduziert. Das Lichtstreuungsverfahren ermöglicht die Unterscheidung von geschliffenen und fertigen Oberflächen, während es bei Kontaktverfahren zu einer Überlappung kommt, bei der diese Oberflächen nicht voneinander unterschieden werden können. [7]

## 7.2. Software SW 500

Der Sensor QS 500 wird mit der Software SW 500 (Bild 6.19) verwendet, die zur Erfassung der gemessenen Daten bestimmt ist, er betreibt den Sensor und speichert die Daten in einer SQL-Datenbank.

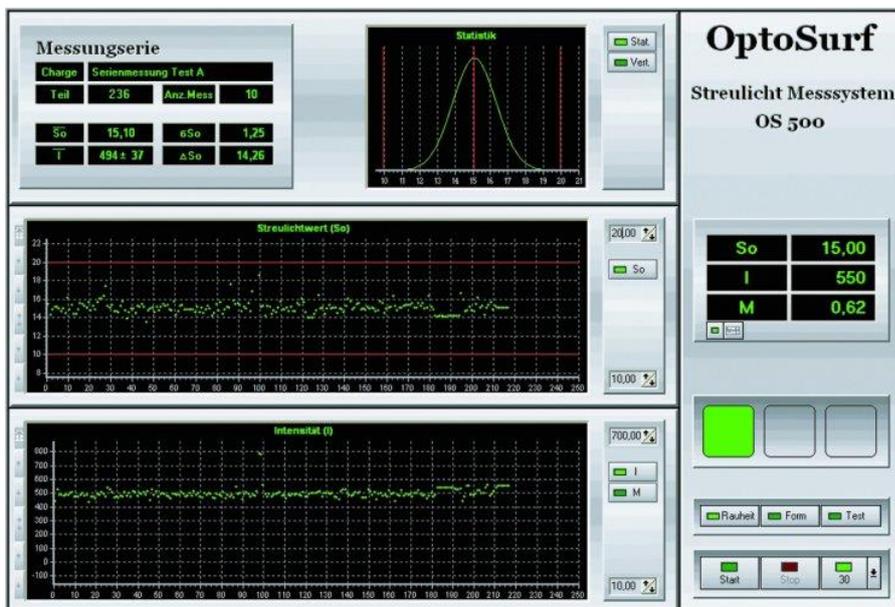


Abbildung 6.19 SQL-Datenbank zur Speicherung der Messergebnisse[7].

Die Festlegung von Grenzwerten ermöglicht eine vollautomatische Produktion, bei der die die Grenzwerte überschreitenden Komponenten automatisch entsorgt werden. Einfache Statistikfunktionen berechnen aus den gemessenen Werten die mittlere Abweichung, die Standardabweichung und die maximale Abweichung. Auch die Statistik aller in der Produktion eingesetzten Werkzeuge wird geführt, so dass der Produktionsprozess dokumentiert werden kann. Der Streulichtsensor steuert den Produktionsprozess und informiert kontinuierlich über den Maschinenstatus.

Dies ermöglicht die Erkennung von Problemen wie Kühlungsfehler, Lagerschäden, Verschleiß des Produktionswerkzeugs usw.

### 7.3. Taylor Hobson Talysurf CLI

Messsystem zur schnellen räumlichen Messung und Auswertung der Oberfläche mit hoher Auflösung. Es ermöglicht die Messung in drei Achsen durch berührungsloses und berührungsloses Verfahren und die anschließende Analyse der Daten aus einem Profilschnitt und einem Oberflächenschnitt. Bei der Kontaktmethode wird ein induktiver Berührungssensor verwendet, während es bei der kontaktlosen Methode ein Laserdreieckstaster und ein konfokaler CLA-Sensor ist. Diese Verfahren bieten nahezu unbegrenzte Möglichkeiten zur Messung der Oberflächenstruktur in Bezug auf Qualität, Genauigkeit und Materialart. Das Gerät ist mit einem automatischen Vorschub in allen Achsen mit einer Geschwindigkeit von nicht mehr als 30 mm/s ausgestattet. Im Falle eines kontaktbehafteten Induktionsmessgerätes beträgt es 3 mm / s. Für die Messung ist es möglich, vier verschiedene Messköpfe zu verwenden. Obwohl dieses Gerät speziell für die 3D-Messung konzipiert ist, enthält es auch mechanische und analytische Werkzeuge für eine komplexe 2D-Messung. Dadurch kann ein Gerät zur Überwachung von Forschung und Entwicklung, zur Durchführung von Studienanalysen, Routineinspektionen oder zur Verwaltung von Produktionsprozessen verwendet werden (Bild 6.20). [9]



Abbildung 6.20 Talysurf CLI 2000[92].

## 7.4. Talymap

Die Talymap wurde entwickelt, um räumliche Merkmale aus den Daten der berührungslosen und berührungslosen Messung zu verarbeiten. Es ermöglicht, die überwachte Oberfläche auf mehrfache Weise zu betrachten, z.B. in axonometrischer Projektion mit einem optionalen Winkel, Farbauflösung und einstellbarer Vergrößerung eines Teils oder der gesamten Oberfläche. Es ist möglich, in drei Achsen zu messen, die Umkehrung des Anzeigeprofiles oder die Simulation des Oberflächenverschleißes. Einer der größten Vorteile dieses Programms ist seine Vielseitigkeit bei der Verarbeitung der Daten verschiedener Messgeräte (Bild 6.21).

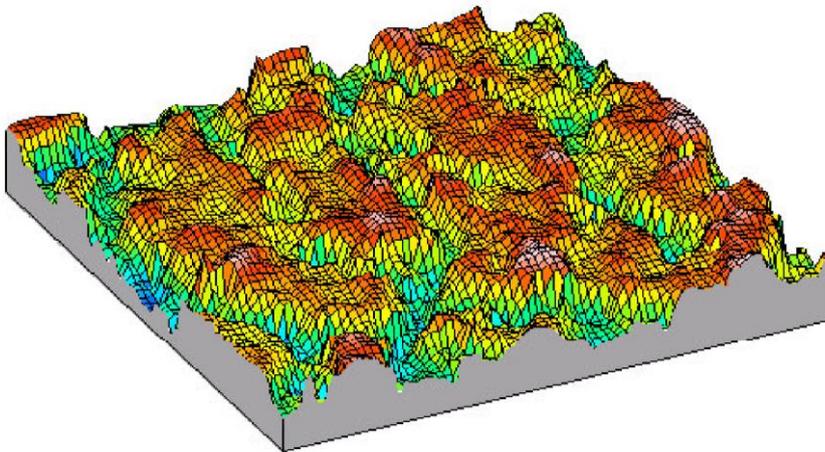


Abbildung 6.21 Oberfläche im Programm Talymap[92].

Zur räumlichen Auswertung von Oberflächen, Amplitudenparametern, Parametern, die die Materialoberfläche beschreiben, Parametern, die sich auf Unebenheiten beziehen, und Volumenparametern. Insgesamt ist es möglich, 120 Parameter in der 2D-Ansicht und 40 Parameter in der 3D-Ansicht zu verwenden. Im 3D-Profil ist es möglich, ein Profil auszuwählen, das mit 2D-Funktionen ausgewertet werden kann.

Es gibt auch eine Reihe von fortschrittlichen spezialisierten Modulen, die zur Auswertung von Oberflächenparametern und Eigenschaften bestimmt sind, die für eine bestimmte Funktion wichtig sind, wie z.B. Verschleiß, Beschädigung, Oberflächenerosion.

## 7.5. Modul Texturierte Oberflächen

Dieses Modul ist für die 3D-Auswertung einer komplexen Materialoberfläche vorgesehen. Es berechnet Flächen und Volumen, maximale und minimale Spitzenhöhen und Tälertiefen in Abhängigkeit von der vom Benutzer festgelegten Höhenbegrenzung. Die Daten sind wichtig für die Bestimmung der Fähigkeit der Oberfläche, die Schmierung aufrechtzuerhalten, oder für die Vorhersage der Haltbarkeit der Funktionsoberfläche bei Verschleiß. [9]

Zur grafischen Darstellung der Ergebnisse wird die Funktion "Coloured Binary Image" verwendet, die mit 256 Farben eine Höhenskala oder mit 2 Farben eine Fläche in die Bereiche über und unter der gewählten Höhenbegrenzung unterteilt.

## 7.6. Talympap Bekleidung

Es wird für die 3D-Analyse von Oberflächenverschleiß verwendet. Es ermöglicht die 3D-Datenfilterung vor der Analyse mit der Gaußschen Methode, der Spline-Methode, der Dreipunktmethode oder der Methode der kleinsten Quadrate. Die Filtration besteht in der Entfernung kurzer Wellenlängen, was die Stabilität und Wiederholbarkeit verbessert. Der Oberflächenverschleiß wird durch einen Vergleich der Oberfläche vor dem Verschleiß und nach dem Verschleiß bewertet (Bild 6.22).

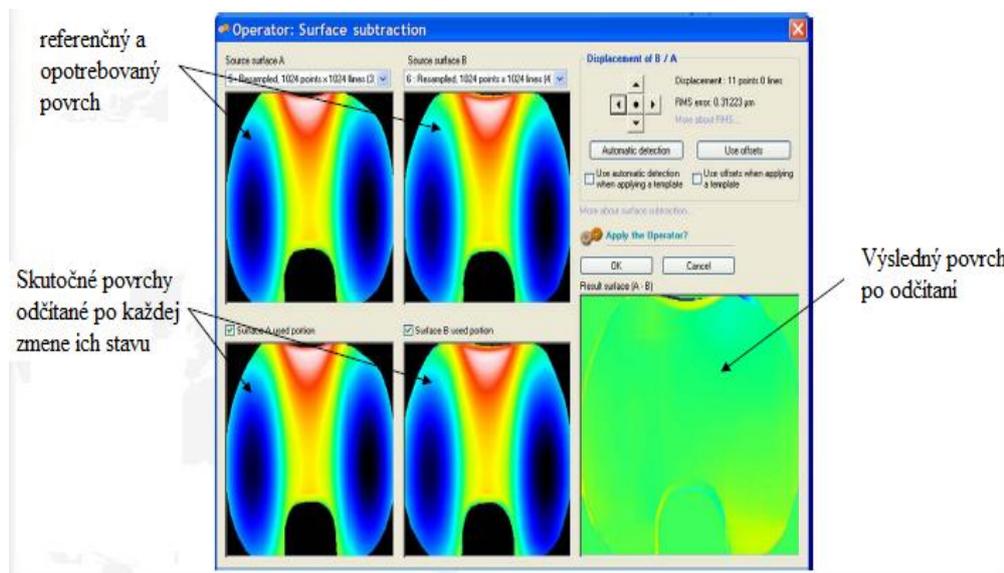


Abbildung 6.22 Analyse des Oberflächenverschleißes mit Talympap Wear[92].

*Legende: referenčný a opotrebovaný povrch - Referenz und abgenutzte Oberfläche, skutočné povrchy odčítané po každej zmene ich stavu - tatsächliche Oberflächen nach jeder Zustandsänderung entfernt, výsledný povrch po odčítaní - endgültige Oberfläche*

## 7.7. Programm zur Analyse der Stufenhöhe

Sie dient zur Bestimmung und Bewertung der vertikalen Abmessungen, z.B. Dicke dünner Schichten, Elevation oder geringe Tiefe. Diese Analyse ist wichtig für die Anwendung oder Entfernung von Material mit mechanischen, chemischen oder anderen Methoden. Das Programm kann die durchschnittliche Höhe eines ausgewählten Bereichs oder die Differenz zwischen den Höhen mehrerer Bereiche berechnen. Bei der Auswahl von zwei Punkten einer Fläche bestimmt er deren horizontale Entfernung, gegenseitige Höhe und Neigung. Für die Berechnung können mehrere Methoden verwendet werden, einschließlich der interaktiven manuellen Methode.

## 7.8. Twist-Programm

Es ist ein Programm zur Analyse der räumlichen Oberflächenstruktur, das zur Beurteilung von Rauheit und Rundheit verwendet wird. Nach Erhalt einer ausreichenden Datenmenge wird eine räumliche Oberflächenkarte erstellt. Die Texturanalyse selbst gliedert sich in Filtration und Bestimmung der Parameter. Durch die Analyse der dominanten Wellenlänge werden der Filtertyp und die Größe der Grenzwellenlänge bestimmt. Wenn keine dominante Wellenlänge gefunden wird, wird ein Gaußscher Filter verwendet und der Anwender wählt seine eigene Grenzwellenlänge. Nach der Auswertung der dominanten Wellenlänge werden die Daten mit dem ZBP-Filter (Zero Band-Pass) verarbeitet. Der Wert der Grenzwellenlänge ist gleich der dominanten Wellenlänge (Bild 6.23). [92]

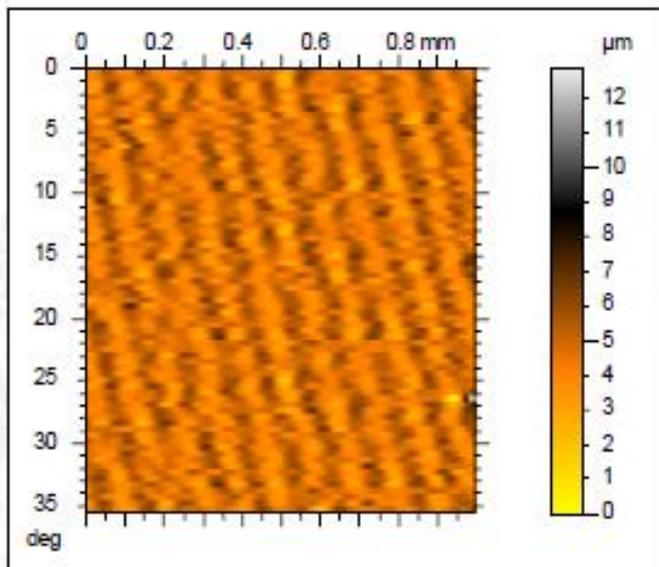


Abbildung 6.23 Beispiel einer gefilterten Oberfläche[92].

Die Oberflächenprofilaten werden dann durch die Fourier-Transformation verarbeitet, die folgende Grundparameter auswertet: Wellenlänge der Oberflächenbahnen in axialer Richtung, Frequenz und Richtung der Spuren in Umfangsrichtung, durchschnittliche Amplitude. Aus den Basisparametern werden weitere Parameter abgeleitet: der Mittelwert aus Querschnitt, Steigung und Winkel. Die analysierte Oberfläche kann in der Axonometrie betrachtet werden (Bild 6.24).



Abbildung 6.24 Axonometrisches kontinuierliches Bild der bearbeiteten Oberfläche[92].

## 7.9. Mitutoyo Surftest SJ-400

In diesem Fall ist es ein manuelles Werkzeug zur Messung von Rauheit, Welligkeit und Primärprofil. Es verfügt über ein eigenes Display zur Anzeige der ausgewählten Parameter. Es ermöglicht auch die automatische Kalibrierung, die Einstellung der Neigung, die Umkehrmessung und die Einstellung der Messbedingungen. Es enthält integrierte Statistikfunktionen zur Auswertung, aber es besteht auch die Möglichkeit einer Anbindung an Surfpak-SJ (Auswertesoftware - Bild 6.25).



Abbildung 6.25 Surftest SJ-400[92].

## 7.10. Software Surfpak SJ/SV/PRO

Surftest wird mit der Software Surfpak SJ/SV/PRO geliefert, die die Steuerung des Gerätes, die Auswertung der Messwerte und die Verarbeitung der Dokumentation gewährleistet. Dieses Programm ist in der Lage, eine Vielzahl von Rauheitsparametern zu verarbeiten, die in den Normen DIN, ISO, JIS, Motif, etc. enthalten sind. Es ermöglicht verschiedene Arten von grafischen Analysen, SD-Topographie, Darstellung eines Profilquerschnitts, etc. (Abbildung 6.26).

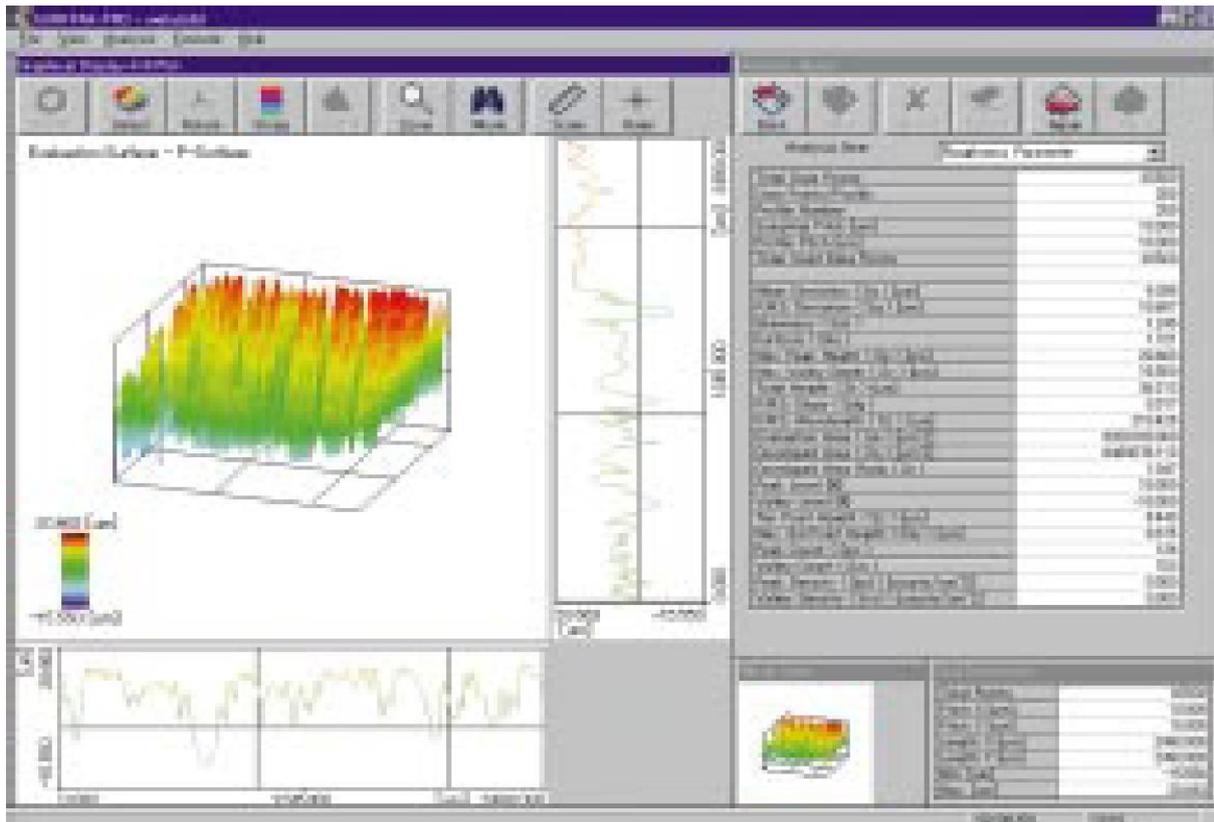


Abbildung 6.26 Beispiel für die Auswertung der Messung durch Surfpak-PRO[92].

## 7.11. Surfer 9 Programm

Im Gegensatz zu den bisherigen Programmen ist der Surfer 9 weder mit einem Messgerät verbunden noch ist er in erster Linie für die Auswertung der Rauheits- oder Welligkeitsparameter konzipiert. Es kann XYZ-Datum in Übersichtskarten, 3D-Oberflächenkarten, 3D-Wireframes, Gelände, Postkarten, Vektorkarten oder Grundkarten umwandeln. Es ist auch in der Lage, verschiedene Abschnitte, Flächen oder Volumen zu berechnen. Eingabedaten können aus einer Vielzahl von verschiedenen Arten von Mengen importiert werden, Bild 6.27.

# 8. MATERIALIEN IN DER LAUFENDEN PRODUKTION VON AUTOMOBILEN I.

Neue Trends in der Entwicklung des Automobils bestehen in folgenden Prinzipien: Erhöhung der Sicherheit der Besatzung, Senkung des Kraftstoffverbrauchs, Erhöhung des Komforts und der Bequemlichkeit. Bei der Entwicklung der Mittelklassewagen geht der Trend der Wirtschaftsstudien dahin, den Kraftstoffverbrauch von 2,6 l/100 km im Jahr 2020 zu erreichen. Die Erfüllung solcher widersprüchlichen Anforderungen ist nur durch eine Reduzierung des Fahrzeuggewichts möglich. Während das Gewicht eines Mittelklassewagens 1960 etwa 2400 kg betrug, waren es im Jahr 2000 etwa 1450 kg. Dieser Wert soll bis 2020 870 kg betragen, was gegenüber 2000 einer Verringerung um 40 % entspricht.

Die Analyse des aktuellen Mittelklassewagengewichts ergab folgende proportionale Gewichtsverteilung der Grundgruppen und Ausstattungen: Karosserie - 26 %, Fahrwerk 23 %, Motor 21 %, flüssige Medien 5 %, elektrische Ausrüstung 8 % und andere 17 %.

Das Durchschnittsgewicht eines europäischen Autos betrug im Jahr 2000 1100 kg mit folgender Materialzusammensetzung: Stahl und Gusseisen (62 %), Nichteisenmetalle (Al, Mg) und deren Legierungen (8 %), Kunststoffe (10 %), Gummi (5 %), Glas (3 %), Textil- und Schallschutz (4 %), Flüssigkeiten und andere Materialien (8 %).

Aus den Analysen geht hervor, dass 62 % des Gesamtgewichts auf Stahl oder Gusseisen entfallen und 30 % der Produktionskosten eines PKWs Materialkosten sind. Daher konzentriert sich die Aufmerksamkeit der Automobilkonstrukteure vor allem auf die Reduzierung des am weitesten verbreiteten Materials - Stahl, das die Grundlage für die Strukturteile (Karosserie, Fahrwerk, Motor usw.) bildet. Chrysler hat die Absicht, in Zukunft das Gewicht seiner Autos zu reduzieren: Karosserie (-50 %), Fahrwerk (-50 %), Motor (-10 %), Kraftstoffsystem (-55 %).

Die Metallurgie reagierte auf die Herausforderungen der Wirtschaftsstudien sowie auf die Anforderungen der Automobilkonstrukteure und -fertiger durch Forschung und Entwicklung von Materialien und Technologien in zwei grundlegende Richtungen: die Entwicklung von Materialien und Technologien zur Herstellung von leichten Karosserien auf Aluminium-/Stahlbasis (Ultralehký). Da der globale Trend hinsichtlich des notwendigen Energieverbrauchs für primärmetallurgische Produktionstechnologien zugunsten der Forschung und Entwicklung von Stahlwerkstoffen geht, wird sich der folgende Teil auf diesen Trend konzentrieren.

Die Entwicklung von Automotive, Automatisierung von Produktionsprozessen konzentriert sich auf die Reduzierung des Gewichts, die Erhöhung der Sicherheit und Korrosionsbeständigkeit von Karosserien bei gleichzeitiger Erhöhung der Produktionseffizienz und Senkung der Produktionskosten. In Bezug auf die Konstruktions- und

Gebrauchseigenschaften des resultierenden Produkts besteht das Ziel darin, die Dicke des Blechs zu reduzieren, d.h. seine Festigkeit und dynamische Belastbarkeit zu erhöhen. Derzeit können die produzierten Stahlbleche und -bänder aus verschiedenen Blickwinkeln betrachtet werden:

- **nach dem Verfahren der Stahlerzeugung:**
  - Guss,
  - Strangguss,
  - Vakuumgießen
- **nach dem Walzverfahren:**
  - Warmwalzen,
  - Kaltwalzen,
- **durch Oberflächenschutz:**
  - nicht oberflächenbehandelt,
  - oberflächenbehandelt,
- **durch Nutzung:**
  - strukturell,
  - geeignet für die Umformung,
  - für die Verpackung
  - für die Maschinenbauindustrie
- **durch Festigkeit und plastische Eigenschaften, chemische und strukturelle Zusammensetzung:**
  - texturierte, kohlenstoffarme, zinkgekühlte Stähle (LC, ULC, SULC),
  - interstitielle freie Stähle (IF-Stähle),
  - brennhärtbare Stähle (BH-Stähle),
  - Dualphasenstähle (DP-Stähle),
  - komplexe Phasenstähle (CP-Stähle)
  - hochfeste niedriglegierte Stähle (HSLA)
  - Umwandlungsinduzierte Plastizitätsstähle (TRIP-Stähle)
  - martensitische Stähle (M-Stähle)[71]

Stahlbaustoffe für die Automobilindustrie werden ständig weiterentwickelt. In den 80er Jahren wurden die klassischen hochfesten kaltgeformten Stähle (ZStE) durch phosphorlegierte Stähle ZStE-P und Dualphasenstähle (DP) ergänzt. Mitte der 80er Jahre wurden IF-Stähle (interstitiell frei) und BH-Stähle (bake hardening) entwickelt. Seit den 90er Jahren werden auch CP-Stähle (komplexe Phase) entwickelt, sowie RA-Stähle (Restaustenit) mit TRIP-Effekt, SULC-Stähle (Super Ultra Low Carbon) und MS-Stähle (Martensit). [71], [82].

- **Die Anforderungen an Stahlbleche für die Automobilindustrie können in den folgenden Punkten zusammengefasst werden:**
  - Festigkeit und plastische Eigenschaften
  - Technologische Verformbarkeit
  - Schweißbarkeit
  - Korrosionsbeständig
  - Geeignete Oberfläche für die Oberflächenbehandlung
  - Geringes Gewicht

## 8.1. Kohlenstoffarme Stahlbleche und -bänder zum Kaltziehen

Stahlbleche werden sowohl durch Warm- als auch durch Kaltwalzen hergestellt. In Bezug auf die verarbeitete Menge dominieren kaltgewalzte Stahlbleche. Sie sind in Form von Coils und Blechen mit einer Dicke von 0,20-2,00 mm erhältlich. Je nach Grad der Umformbarkeit werden kaltgewalzte Bleche in fünf Gruppen eingeteilt[76]:

- MT - handelsüblicher Qualitätsstahl (CQ)
- ST - Ziehen von Qualitätsstahl (DQ)
- HT - Ziehen von Qualitätsstahl (DQ)
- VT - Tiefziehqualitätsstahl (DDQ)
- ZT - extra tiefgezogener Qualitätsstahl (EDDQ)

Eine neue Klassifizierung von kohlenstoffarmen Stahlblechen für die Automobilindustrie SAE J2329 ist in Tabelle 1 dargestellt. Die Stahlbleche in der Tabelle sind nach dem Herstellungsverfahren klassifiziert: warmgewalzter Stahl und kaltgewalzter Stahl, zusammen mit den minimal erforderlichen Eigenschaften, die die Streckgrenze und den Mindestwert des Kaltverfestigungsexponenten  $n$  darstellen.

*Tabelle 1 Klassifizierung von kohlenstoffarmen Stahlblechen für die Automobilindustrie[71]*

Old AISI Description		New SAE Classification		Property
<b>Hot Rolled Steels</b>				
CQ	Commercial Quality	SAE J2329	Grade 1	N/A
DQ	Drawing Quality	SAE J2329	Grade 2	Yield: 180-290 MPa n value: 0.16 min.
DDQ	Deep Drawing Quality	SAE J2339	Grade 3	Yield: 180-240 MPa n value: 0.18 min.
<b>Cold Rolled Steels</b>				
CQ	Commercial Quality	SAE J2329	Grade 1	N/A
DQ	Drawing Quality	SAE J2329	Grade 2	Yield: 140-260 MPa n value: 0.16 min.
DQ	Drawing Quality	SAE J-2329	Grade 3	Yield: 140-205 MPa n value: 0.18 min.
DDQ	Deep Drawing Quality	SAE J-2329	Grade 4	Yield: 140-185 MPa n value 0.20 min.
EDDQ	Extra Deep Drawing Quality	SAE J2329	Grade 5	Yield: 110-170 MPa n value 0.22 min

Eine neue Klassifizierung anderer Stahlbleche für die Automobilindustrie nach SAE J2340 ist in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2 Klassifizierung anderer Stahlbleche für die Automobilindustrie[71]

Old AISI Description	New SAE Classification
<b>Cold Rolled Steels</b>	
Dent Resistant (DR)	SAE J2340 Grades 180A, 210A, 250A, 280A Dent Resistant Non Bake Hardenable
Bake Hardenable (BH)	SAE J2340 Grades 180B, 210B, 250B, 280B Dent Resistant Bake Hardenable
High Strength Solution Strengthened	SAE J2340 Grades 300S, 340S High Strength Solution Strengthened
High Strength Low Alloy (HSLA)	SAE J2340 Grades 300X,Y; 340X,Y;380X,Y High strength low alloy 20X,Y;490X,Y;550X,Y
High Strength Recovery Annealed	SAE J2340 Grades 490R, 550R, 700R, 830R High Strength Recovery Annealed
Dual Phase (DP) (HSS)	SAE J2340 Grades DH/DL 500-1000 MPa Tensile Ultra High Strength Dual Phase
Martensitic Grade M, HSS	SAE J2340 Grade M 800-1500 MPa Tensile Ultra High Strength Low Carbon Martensite

## 8.2. Physikalische und metallurgische Eigenschaften von Stahl für die Automobilindustrie

Die Eigenschaften von dünnen kohlenstoffarmen Stahlblechen und -bändern hängen von ihrer chemischen Zusammensetzung, dem Verfahren zur Stahl- und Blechherstellung ab. Nicht nur die mechanischen Eigenschaften, sondern auch die Dickentoleranz und die Oberflächengüte der Stahlbleche werden hohen Anforderungen gerecht. Diese Faktoren beeinflussen die strukturellen, mechanischen und technologischen Eigenschaften von duktilen dünnen Stahlblechen.

Duktile dünne Stahlbleche werden aus kohlenstoffarmen Stählen (bis zu 0,1 %) hergestellt. Neben Kohlenstoff enthalten die Stähle weitere Elemente, die aufgrund eines unvollkommenen metallurgischen Prozesses in den Stahl eindringen oder dem Stahl gezielt zugesetzt werden, um die Blecheigenschaften zu verbessern (Mn, Si, P, S, Cu, Ni, Cr, Mo, O, N, Ti, etc.)[90],[91].

Die Struktur von duktilem kohlenstoffarmem Stahl besteht aus Ferrit und Zementit. Ferrit im Binärsystem Fe - C ist durch eine feste Kohlenstofflösung in Eisen  $\delta$  gebunden. Ferrit in Stählen löst jedoch auch andere Elemente auf und erzeugt so eine Substitutionslösung (Si, Mn, Cr, Ni, Mo, W) oder eine feste Additionslösung (N, H, O). Ferrit ist eine weiche Gefügestufe; daher sind kohlenstoffarme Stähle (ferritisch) weich, mit niedriger Streckgrenze, niedriger Festigkeit und hohen Dehn- und Kontraktionswerten. Dies sind Stähle mit hoher Bruchfestigkeit und guten plastischen Eigenschaften. Die plastischen Eigenschaften dieser Stähle hängen von der Größe und Form des ferritischen Kornes, der Menge und Verteilung der Verunreinigungen ab. Bei Stahlblechen ist die ferritische Korngröße ein Kompromiss zwischen der Plastizität und Glätte der Produktoberfläche.

## 8.3. Interstitielle freie Stähle (IF-Stähle)

IF-Stähle werden zum Tiefziehen und für Bauteile mit komplexer Form verwendet. Sie zeichnen sich durch hohe plastische Eigenschaften aus und sind daher für das Tiefziehen geeignet. Eine hohe Duktilität wird durch den geringen Gehalt an Zwischengitteratomen, die Größe des ferritischen Kornes und die beim Rekristallisationsglühen erzeugte Struktur erreicht (Abbildung 1)[71].

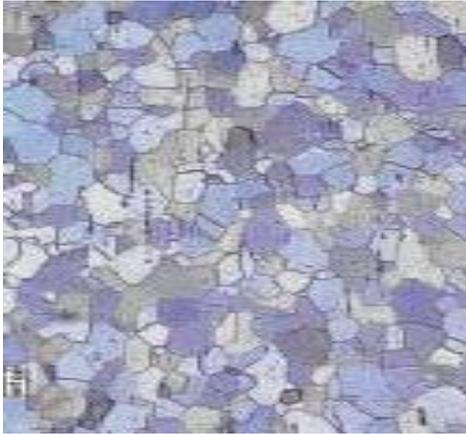


Abbildung 1 IF-Stahlkonstruktion[92]

In diesen Stählen sind Zwischengitterelemente (Kohlenstoff, Stickstoff) an Carbid-, Nitrid- oder Carbonitrid-Bildelemente (Al, Ti, Nb, V) gebunden. Die Eliminierung von interstitiellen Elementen durch Bindung an Elemente, die bei der Verarbeitung von Flüssigstahl eine hohe Affinität aufweisen, führt zu einer hervorragenden Kompressibilität der Bleche beim Endpressen. Freier Kohlenstoff in IF-Stählen sowie in Stählen, die freien Kohlenstoff enthalten (z.B. phosphorierter Stahl), kann z.B. für die Kalthärtung (BH) verwendet werden[71],[76],[82].

In Bezug auf die Metallurgie erfordern IF-Stähle eine hohe Reinheit und die Kontrolle der Einschlussmorphologie. Aufgrund der nicht vorhandenen interstitiellen Verstärkung haben sie eine geringe Streckgrenze (unter 160 MPa) und sind vollständig alterungsbeständig.

## 8.4. Kalthärtender (BH)-Stahl

Bei Blechen zur Herstellung von komplex geformten Pressteilen durch Kaltpressen und der anschließenden Oberflächenbehandlung durch Lackieren sind technologisch gute Kompressibilität und Gleichmäßigkeit der Eigenschaften auch im Hinblick auf die Produktnutzeigenschaften (Steifigkeit und Konstruktionssicherheit), hohe Festigkeit und dynamische Belastbarkeit gefordert. Diese Anforderungen werden durch BH-Stahlpressteile[71] weitgehend erfüllt.

BH-Stähle vor dem Pressen haben niedrige Werte der Streckgrenze und der hohen Plastizität. Nach dem Pressen und Auftragen des Lackes kommt es während des Backens zu einer verformungsbedingten Wärmealterung, die zu einer Erhöhung der Streckgrenze um 30 - 70 MPa und einer Erhöhung der Festigkeit führt. Auf diese Weise ist das Blech resistenter gegen Verformung. Um den BH-Effekt zu ermöglichen, müssen insbesondere physikalische und metallurgische Bedingungen erfüllt sein. Die BH-Effektkontrolle durch Kontrolle des in Ferrit gelösten Kohlenstoffs erfordert, dass Stickstoff vollständig an

AlN gebunden ist. Die Fällung von AlN wird durch Al und N-Gehalt, Wicklungstemperatur, Rekristallisationsglühen und die zugehörigen Elemente gesteuert (Abbildung 2).

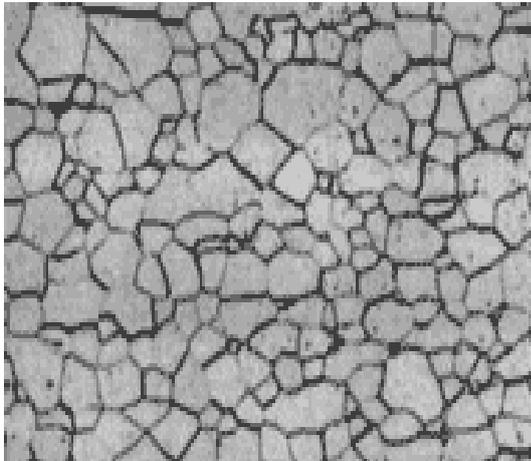


Abbildung 2 BH-Stähle Struktur[92]

## 8.5. HSLA-Stähle

Niedrig legierte Stähle (HSLA Duktile Low Alloy) mit ferritisch-perlitischem Gefüge sind Feinkornstähle mit niedrigem Gehalt (max. 0,15 %) an einem Element der Kombination aus Al, Ti, Nb und V. Die Wirkung von niedrig legierten Elementen besteht in ihrer Affinität zu Kohlenstoff und Stickstoff bei Löslichkeit von Carbiden, Nitriden und Carbonitriden in Austenit und Ferrit und Verstärkungsmechanismen (Abbildung 3)[71].

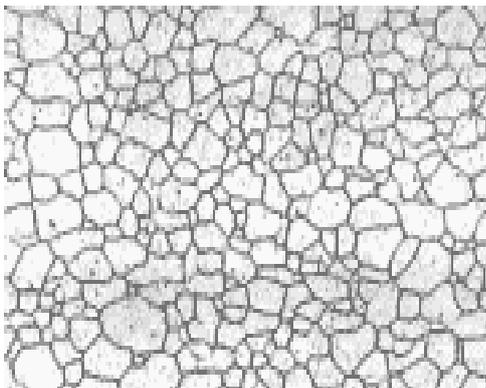


Abbildung 8.3 HSLA-Stahlkonstruktion[92]

Niedrig legierte Stahlbleche zeichnen sich durch eine feine Struktur und eine höhere Kaltschweißbarkeit aus. Niedriglegierte Stähle weisen signifikante Korngrenzen (Kornverfeinerung) und Dispersionsverstärkung von Zwischenverbindungen (Carbid-, Nitrid- und Carbonitridverbindungen) von Mikrolegierungselementen auf.

# 9. MATERIALIEN IN DER AKTUELLEN AUTOMOBILINDUSTRIE II.

## 9.1. Mehrphasenstähle (CP, TRIP-Stähle)

Stähle mit Transformation Induced Plasticity (TRIP) sind ein vielversprechender Werkstoff im Automobilbau. Sie haben gute Festigkeitseigenschaften und eine ausgezeichnete Duktilität bei der Kaltumformung. Während ihrer plastischen Verformung wird Austenit in verformungsinduziertes Martensit umgewandelt, das wesentlich zur Gesamtmaterialfestigkeit beiträgt. Dadurch wird die Verformung allmählich gleichmäßig über die gesamte verformte Zone verteilt und verhindert so die lokale Ansammlung der Verformung an kritischen Stellen. Ebenso kann die Bildung von verformungsinduzierten martensitischen Platten die Rissbildung verlangsamen und damit die Ermüdungseigenschaften verbessern (Abbildung 1)[71].

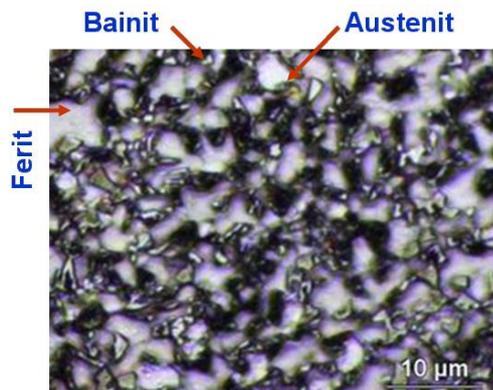


Abbildung 1 TRIP-Stähle Struktur[92]

## 9.2. Dualphasenstähle (DP-Stähle)

Die Struktur der derzeit produzierten Dualphasenstähle, die für die Stahlblechherstellung zur Kaltumformung verwendet werden, besteht meist aus Ferrit und Martensit. Der empfohlene Kohlenstoffgehalt in diesen Stählen liegt nicht über 0,13%. Andere Elemente sind Mn, Si, Mo, Cr oder V (Abbildung 2).

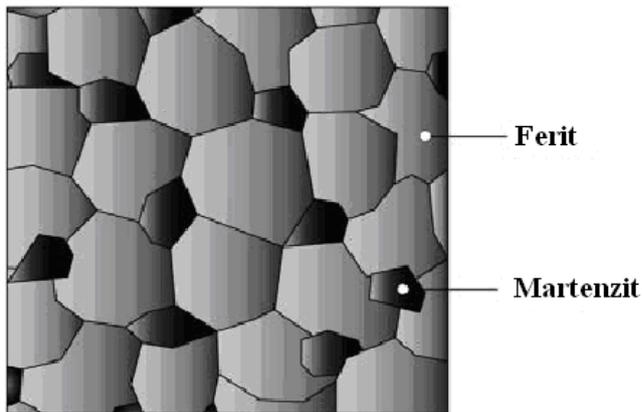


Abbildung 2 DP-Stahlstruktur[92]

Zweiphasige ferritisch-martensitische Stähle werden im interkritischen Glüh- oder kontrollierten Kühlverfahren hergestellt. Das Verfahren des interkritischen Glühens besteht aus dem Erwärmen des Materials nach dem Kaltwalzen auf die Temperatur im Intervall von  $AC_1 - AC_3$  mit einer erforderlichen Haltezeit von 5-15 Minuten und dem anschließenden kontrollierten Abkühlen mit überkritischer Geschwindigkeit, das die erforderlichen Volumenanteile an Ferrit und Martensit gewährleistet,[71]. Ein weiteres Verfahren zur Herstellung von zweiphasigen ferritisch-martensitischen Stählen besteht darin, die technologischen Bedingungen des Warmwalzverfahrens anzupassen oder die chemische Zusammensetzung dieser Stähle so zu wählen, dass die erforderliche zweiphasige ferritisch-martensitische Stahlstruktur unmittelbar nach dem Warmwalzen erreicht wird.

### 9.3. Maraging-Stähle

Der Name ist eine Kombination aus zwei aufeinanderfolgenden Phasenumwandlungen, die eine Verstärkung (martensitisch und alterungsbedingt) bewirken. Es handelt sich um kohlenstoffarme Stähle mit dem Kohlenstoffgehalt  $C < 0,03\%$ ,  $Mn < 0,1\%$ ,  $Si < 0,1\%$ ,  $S < 0,01\%$ ,  $P < 0,01\%$ . Sehr unerwünschte Zusatzstoffe sind C, S, N, da ihr Vorhandensein die Dichte der Versetzungserdungspunkte aus Carbiden und Nitriden erhöht, die hauptsächlich an den Korngrenzen abgegeben werden. Dies führt zu verminderten plastischen Eigenschaften. Ein ähnlicher Effekt wird durch Einschlüsse auf Schwefelbasis verursacht (Abbildung 3)[71].

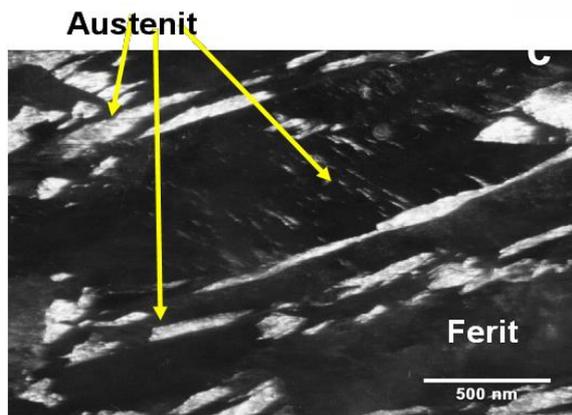


Abbildung 3 Struktur von martensitischen Stählen[92]

Diese Bedingungen gewährleisten die Auflösung der Partikel in Austenit und gleichzeitig die Entspannung der durch die vorherige Verarbeitung verursachten potenziellen Spannungen. Das Gefüge besteht nach dem Härten aus nahezu kohlenstofffreiem Nickel-Martensit, das sich durch hohe Plastizität, relativ geringe Härte (30-35 HRC), Zugfestigkeit um 1000 MPa und gute Bearbeitbarkeit auszeichnet. Während des Alterungsprozesses werden Dispersionspartikel aus intermetallischen Phasen, die hauptsächlich Mo und Ti enthalten, im Martensit ausgeschieden. Sie ermöglichen es, die Härte von bis zu 62 HRC zu erreichen. Diese Stähle haben viele wichtige technologische Eigenschaften, die sich wie folgt charakterisieren lassen: hohe Dimensionsstabilität bei der Wärmebehandlung und im Langzeitbetrieb; geringer Verfestigungsexponent und gute Plastizität, die es ermöglicht, alle Arten der Warm- und Kaltumformung mit hohem Verformungsgrad zu verwenden; gute Zerspanbarkeit insbesondere im gehärteten Zustand; Eignung für verschiedene Aushärtungsverfahren; gute Schweißbarkeit.

## 9.4. Warmgewalzte Bleche

Ihre übliche Dicke beträgt 2 - 15 mm, selten 1,5 - 25 mm. Die Bruchlast kann sich im Bereich von 5 - 50 % ändern. Neben der hohen Festigkeit bei statischer und dynamischer Belastung sind weitere geforderte Eigenschaften eine gute Kaltkompressibilität und Schweißbarkeit. Sie sind aus Bau- und Ziehstahl gefertigt.

Konstruktionsstahlbleche werden für tragende Elemente mit geringeren Anforderungen an die Kaltumformbarkeit verwendet. Der Festigkeitsbereich und die plastischen Eigenschaften werden durch die folgenden Werte bestimmt:  $R_{e\ min} = 200 - 360\ MPa$ ,  $R_m = 300 - 650\ MPa$ ,  $A_{5\ min} = 22 - 26\ \%$ .

Ziehbleche werden zur Herstellung von Bauelementen verwendet; eine sehr gute Kaltkompressibilität ist erforderlich. Der Bereich ihrer mechanischen Eigenschaften wird durch die folgenden Werte bestimmt:  $RP_{0.2\ max} = 250 - 360\ MPa$ ,  $R_m = 250 - 450\ MPa$ ,  $A_{5\ min} = 29 - 45\ \%$  (Tabelle 1).

Tabelle 1 Warmgewalzte hochfeste Stähle für die Automobilindustrie[71]

Mechanismus spevnenia	Hlavné prvky	Úroveň Rm [MPa]	Charakteristika	Praktické použitie	
Tuhým roztokom (TR)	Si – Mn No Nb+V	490-590	Dobrá ohýbatelnosť	Konštrukčné komponenty rámových dielov Podvozkové časti	
Precipitáciou (P)	Nb, Ti, V Nb + Ti Nb + Ti + Cr	490 – 780	Ťažný typ, Vysoké výťažky s obrubou	Konštrukčné komponenty Ráfy kolies Konzoly	
Transformáciou (T)	F + M	Si – Mn Si (Cr,P,Mo)	540 – 980	Vysoké predĺženie, nízka medzera sklzu Nízky pomer $R_{p0,2}/R_m$	Podvozkové časti Disky kolies
	F + B	Si – Mn Si – Mn – Nb Cr, Ti + Cr	440 – 780	Vysoké predĺženie	Závesy Držiaky motora
	M + B	Si, Ti	590 – 1100	Vysoká pevnosť	Podvozkové časti Nárazová výstuž dverí
	RA	C, Si Si – Mn Al – Mn (Cr, P)	590 – 980	TRIP typ Vysoké predĺženie Dobrá rovnováha medzi pevnosťou a ťažnosťou	Crash zóny (nárazníky, podvozkové časti, stĺpiky, nárazové výstuže dverí)

Legende: Mechanismus spevnenia - Härtemechanismus, tuhým roztokom - durch feste Lösung, precipitáciou - durch Niederschlag, transformáciou - durch Transformation, hlavné prvky - Hauptelemente, úroveň - Ebene, charakteristika - Eigenschaften, dobra ohýbatelnosť - gute Biegebarkeit, ťažný typ - Zeichnung, vysoké výťažky s obrubou - hohe Zeichnungen mit Beschnitt, vysoké predĺženie - hohe Dehnung, nízka medzera sklzu - geringe Rutschgefahr, nízky pomer - niedrige Ration, vysoká pevnosť - hohe Festigkeit, TRIP Typ - TRIP Typ, dobra rovnováha medzi pevnosťou a ťažnosťou - gute Balance zwischen Stärke und Verspannung, praktické použitie - praktischer Einsatz, konštrukčné komponenty rámových dielov - Strukturkomponenten, podvozkové časti - Fahrwerksteile, ráfy kolies - Radfelgen, konzoly - Halterungen, disky kolies - Radscheiben, závesy - Scharniere, držiaky motora - Motorhalterungen, nárazníky - Stoßfänger, sloupky - Säule, nárazová výstuž dverí - Türstoßverstärkung

## 9.5. Kaltgewalzte Bleche

Für den praktischen Einsatz werden sie in den Dickenbereichen von 0,50 - 2,00 mm oder ausnahmsweise 0,30 - 3,00 mm hergestellt. Die Zugfestigkeit von kaltgewalzten Blechen liegt zwischen 300 - 1000 MPa, die Streckgrenze 150 - 800 MPa und die Duktilität A80= 15 - 50 % (Tabelle 2)[84].

Die Eigenschaften von Stahl für die Automobilindustrie können durch die Wahl einer chemischen Zusammensetzung und von Mechanismen zur Stahlhärtung, einschließlich der folgenden, eingestellt werden:

- Stärkung der Mischlösung durch interstitielle und Substitutionselemente,
- Stärkung der Versetzung,
- Verfestigung der Korngrenzen,
- Ausscheidungshärtung,
- Umwandlungshärtung.

Die Analyse des Einflusses einzelner Verstärkungsmechanismen auf die Umformbarkeit und die Eigenschaften der resultierenden ferritischen Matrix, basierend auf der Literatur, zeigt folgendes: Die Umwandlungshärtung zeigt den stärksten Einfluss auf die Stahleigenschaften; die resultierenden Stahleigenschaften hängen gleichzeitig von mehr Härte- und Verstärkungsmechanismen ab, und diese Beiträge sind abhängig von der chemischen Zusammensetzung der Stähle,[5],[6],[84].

Wenn nur eine hohe Festigkeit bei minimaler Plastizität erforderlich ist, kann dies z.B. durch die Kombination von Mischkristallverfestigung und Umwandlungshärtung von martensitischem Stahl erreicht werden. Häufig werden aber auch gute plastische Eigenschaften gefordert. Dies kann nur durch die Kombination verschiedener Verstärkungs- und Härtungsmechanismen erreicht werden.

Der effizienteste Verstärkungsmechanismus ist die strukturelle Stärkung durch kontrollierte Phasenumwandlung, die mit anderen Verstärkungsmechanismen (TR, P und Kornfeinung) kombiniert werden könnte. Die strukturelle Härtung mittels kontrollierter Phaserverformungen kann wie folgt durchgeführt werden:

- Bei den Prozessen der heißen plastischen Verformungen,
- Durch kontrolliertes Walzen (RV) und kontrolliertes Kühlen (RO),
- Bei den Prozessen der plastischen Kaltverformung,
- Mit Hilfe der thermischen Verarbeitung.

Kohlenstoff verursacht eine Abnahme der Plastizität von kaltgewalzten Stählen und verschlechtert die Schweißbarkeit, daher besteht eine klare Tendenz, sich auf die Minimierung des Gehalts in den für den Einsatz in der Automobilindustrie bestimmten Stählen zu konzentrieren. Bis zur Einführung der Vakuumtechnik betrug der C-Gehalt  $C > 0,05\%$ . Die Einführung der Vakuumtechnik in die Stahlerzeugungstechnologien ermöglicht die Herstellung von kohlenstoffarmen Stählen, die nach dem C-Gehalt wie folgt weiter klassifiziert werden: [82]:

- LC-Stähle (kohlenstoffarm) 0,03 - 0,2 % C
- ELC-Stähle (extra low carbon) 0,01 - 0,03 % C
- ULC-Stähle (ultra low carbon) 0,01 - 0,003 %C

- SULC-Stähle (Super Ultra Low Carbon) < 0,003 %.

Tabelle 2 Kaltgewalzte hochfeste Stähle für Fahrzeugkomponenten[71]

Mechanismus spevnenia	Hlavné prvky	Úroveň Rm [MPa]	Charakteristika	Praktické použitie	
Tuhým roztokom (TR) (LC – low carbon)	P – Mn Si – Mn P	340 – 440	Ťažný typ Dobrá lisovateľnosť BH typ	Vonkajšie panely Vnútorne panely Konštrukčné prvky Konzoly, stĺpiky	
Tuhým roztokom (TR) (ULC – ultra low carbon)	P – Mn P – Si Mn – P – Si Ti, Nb	340 – 590	Hlbokotažný typ BH typ	Hlboko ťahané časti Vonkajšie panely Vnútorne panely	
Precipitáciou (P)	Mn Nb Si – Mn – Nb	390 – 590	Dobrá zvariteľnosť	Vnútorne panely	
TR + P	Mn – Ti Si – Mn – P – Nb Cu – Ti	490 – 590	Dobrá ohýbatelnosť Typ s vysokou „r“ hodnotou	Výstuže Konzoly	
Transformáciou (T)	M M + B	Mn – Si Mn – Si – P Mn Si – Mn – Nb	490 – 1470	Nízky pomer $R_{m,2}/R_m$ BH typ	Vnútorne panely Konštrukčné prvky Výstuže Nárazníky
	B	Mn – Cr	440 – 590	Vysoké výtazky s obrubou Vysoké predĺženie	Konštrukčné prvky Konzoly Výstuže
	RA	Si – Mn	590 – 980	TRIP typ Vysoké predĺženie	Konštrukčné prvky v crash zónach
P + T	Mn-Si-Ti Mn-Si-Ti-Mo	780-1470	Ultra-vysoko pevné	Nárazníkové výstuže Nárazová výstuž dverí	

Legende: mechanizmus spevnenia - Verstärkungsmechanismus, tuhým roztokom - feste Lösung, precipitáciou - durch Niederschlag, transformáciou - durch Umwandlung, hlavné prvky - Hauptelemente, úroveň - Ebene, charakteristika - Eigenschaften, ťažný Typ - Zeichnung Stahl, dobrá lisovateľnosť - gute Kompressibilität, BH-Typ - BH-Typ, hlbokotažný-Typ - Tiefziehstahl, dobrá zvariteľnosť - gute Schweißbarkeit, dobrá ohýbatelnosť - gute Biegebarkeit, Typ s vysokou "r" hodnotou - Typ mit hohem "r"-Wert, nízky pomer - niedriges Verhältnis, vysoké výtazky s obrubou - Zeichnungen mit Zierleiste, vysoké predĺženie - Erweiterung, TRIP-Typ - TRIP-Typ, ultra-vysoko pevné - ultrahochfest, praktické použitie - praktischer Einsatz, vonkajšie panely -

*Außenpaneele, vnútorné panely - Innenpaneele, konštručné prvky - Konstruktionselemente, konzoly - Konsolen, stlpiky - Säulen, hluboko táhané časti - Tiefziehteile, výstuže - Verstärkung, nárazníky - Stoßfänger, crash zóny - Crashzonen, nárazníkové výstuže - Stoßfängerverstärkung, nárazová výstuž dveří - Türaufprallverstärkung*

## 9.6. Verzinkte Bleche im Automobilbereich

### Klassifizierung von verzinkten Blechen.

Verzinkte Stahlbleche sind kein neues Material. Die Entwicklung ihrer Verwendung in verschiedenen Bereichen der Maschinenbauproduktion macht sie zu einem sehr fortschrittlichen Produkt. Der Einsatz von verzinkten Blechen war zwischen 1975 und 2000 doppelt so hoch, während der Umsatz mit unbehandelten Blechen fast um die Hälfte zurückging. Der Sektor, der die größte Menge an verzinktem Stahlblech verarbeitet, ist in erster Linie die Automobilindustrie[71].

Bei der Oberflächenbehandlung von Stahlblechen durch Metallbeschichtungen wird Zink vor allem wegen seines relativ niedrigen Preises und seiner guten Korrosionseigenschaften eingesetzt. Die Haltbarkeit der Beschichtung ist proportional zu ihrer Dicke und der Umgebung, in der die Zinkschicht aufgebracht wird[7],[9],[29].

Die Anforderungen an verzinkte Materialien sind: geringes Gewicht, Korrosionsbeständigkeit, technologische Formbarkeit, leichte Schweißbarkeit, oberflächenverträgliche Oberfläche, überdurchschnittliche Festigkeit und plastische Eigenschaften.

### 9.6.1. Feuerverzinkte Stahlbleche

Die Feuerverzinkung ist die am weitesten verbreitete Methode zum Schutz von Stahlprodukten vor Korrosion. Die meisten von ihnen (mehr als 50%) werden in der Automobil- und Bauindustrie eingesetzt. Um die Korrosionseigenschaften zu verbessern, werden manchmal Al und Si in die Beschichtung eingebracht. Die Verzinkung, insbesondere die Feuerverzinkung, ist eines der kostengünstigsten Verfahren der Oberflächenbehandlung von Stahlbändern. Es werden ein- und zweiseitig verzinkte Bleche mit gleicher Schichtdicke hergestellt, die sowohl für äußere als auch für innere Karosserieteile bestimmt sind.

Eine wichtige Anforderung, die feuerverzinkte Bleche im Hinblick auf ihren Einsatz im Automobil erfüllen müssen, ist die Vermeidung der Bildung von Zinkblüten, die ein Begleitphänomen der Feuerverzinkung ist.

## Die Erfüllung dieser Anforderungen kann wie folgt sichergestellt werden:

- Erhöhung der Abkühlgeschwindigkeit der Flüssigverzinkung,
- Erhöhung der Anzahl der Kristallisationszentren während des Beschichtungs-erstarrensprozesses,
- Reduzierung des Bleigehalts im Galvanikbad unter 0,08 %.
- Verwendung von elektrolytischem Zink im Bad,
- Leichtes Walzen von verzinktem Band (0,8 - 1,5% Entfernung).

### 9.6.2. Elektrolytisch verzinkte Bleche

Die elektrolytische Verzinkung wird seit 1917 eingesetzt. Die Herstellung von elektrolytisch verzinkten Blechen ist weltweit weniger verbreitet als die Herstellung von feuerverzinkten Blechen mit einem Anteil von etwa 10 - 15 % [71],[76],[82].

Im Vergleich zu feuerverzinkten Blechen ergeben sich folgende Vorteile durch elektrolytisch verzinkte Bleche:

- Die Möglichkeit, sehr dünne Zinkschichten herzustellen (ab 0,4  $\mu\text{m}$ ),
- Relativ dünne Zinkschicht sorgt für ausreichenden Korrosionsschutz
- Der Verzinkungsprozess hat keinen Einfluss auf die ursprünglichen mechanischen Eigenschaften des Grundwerkstoffs, insbesondere seine Fähigkeit zum Tiefziehen,
- Die Verzinkung mit einer Konversionsschicht sorgt für eine gute Haftung der organischen Beschichtung,
- Differenzierte und einseitig verzinkte Bleche können relativ einfach hergestellt werden.

Die übliche Dicke der im Automobilbereich erforderlichen elektrolytischen Beschichtung liegt unter 7,5  $\mu\text{m}$ . Elektrolytisch verzinkte Bleche verwenden alkalischen oder sauren Elektrolyten; der Verzinkungsprozess wird daher in zwei Badtypen durchgeführt:

### 9.6.3. Im alkalischen Bad

Zink ist in Form von Alkalizink und in Form von komplexem Zinkkalkalicyanid gebunden. Das Bad weist eine sehr gute Tiefenwirkung, Feinkörnigkeit und Qualitätsstruktur der Beschichtung auf und ist leicht zu regenerieren. Aufgrund dieser Eigenschaften haben sich Cyanidbäder durchgesetzt. Je nach Zusammensetzung des Bades, der Glanzmittel und den Betriebsbedingungen entstehen weitere Arten von Beschichtungen: matte, halbgänzende und glänzende Beschichtungen. Die Grundmasse der alkalischen Zinkbäder ist Zinkcyanid, Natriumcyanid, Natriumhydroxid, Natriumsulfid und Glanzmittel.

Die Kathodenstromdichte des Bades beträgt 1 - 6 A.dm<sup>2</sup>, die Badtemperatur 20 - 35°C.

### 9.6.4. Im Säurebad

Die wichtigsten sind sulfatierte und fluoroborierte Bäder. Säurebäder haben eine sehr geringe Tiefenaktivität und eine schlechte Deckkraft. Die Badzusammensetzung ist stabiler als bei Cyanidbädern. Es ist möglich, eine hohe Stromdichte zu verwenden, bei der Bäder mit hohem Kathodenerz-Extrakt betrieben werden. Sie werden zum Verzinken von Drähten, Blechen, Bändern und Produkten einfacher Form verwendet.

Die Grundkomponente des Säurebades ist Zinksulfat, Aluminiumsulfat, Ammoniumchlorid und Borsäure. Die Kathodenstromdichte beträgt 1 - 6 A dm<sup>2</sup>, die Kathodenstromleistung 95 - 100 %, die Badtemperatur 20 - 30°C. Die Beschichtungsbildungsrate in sauren Verzinkungsbädern ist etwa 8 mal höher als im alkalischen Bad.

Mit der stetigen Entwicklung von cyanidfreien Säurebädern für die Galvanik wurden Ergebnisse erzielt, die es in vielen Fällen ermöglichen, die Vernickelung und Verchromung zu ersetzen. Diese sind hauptsächlich:

- ungiftiges Bad,
- Glänzende Oberfläche
- Langlebigkeit und Kosteneffizienz

# 10. ROSTFREIE MATERIALIEN

Es gibt mehrere Stahlsorten nach verschiedenen Kriterien. Nach der Verarbeitungsmethode gibt es eine Klasse von Stählen für die Umformung in Form von Halbfabrikaten, nach der Verwendung - Baustahl, nach der vom Lieferanten garantierten chemischen Zusammensetzung - Qualitätsstähle (die Hersteller garantieren ihre chemische Zusammensetzung, d.h. den minimalen und maximalen Gehalt der Elemente), nach der chemischen Zusammensetzung - Legierungsstähle, die ein oder mehrere Legierungselemente enthalten. Alle oben genannten Stähle sind Edelstähle der Klasse 17[4],[70],[71].

In Europa ist die Klassifizierung und Kennzeichnung von Stählen auf der Grundlage europäischer Normen (EN) einheitlich (ČSN EN in der Tschechischen Republik). Die Klassifizierung von Stählen wird durch die europäische Norm EN 100020 festgelegt, die definiert:

- Der Begriff "Stähle zum Umformen",
- Klassifizierung von Stählen nach ihrer chemischen Zusammensetzung,
- Unterteilung in Hauptgruppen basierend auf den Eigenschaften und der Verwendung.

Stähle zum Umformen werden als Werkstoffe bezeichnet, bei denen der Eisenanteil höher ist als bei jedem anderen Element, die weniger als 2 % C enthalten und auch andere Elemente enthalten.

## 10.1. Klassifizierung von Stählen nach ihrer chemischen Zusammensetzung:

- **Unlegierte Stähle** - der Gehalt der einzelnen Elemente erreicht diese Grenzwerte nicht:

Mn = 1,65 Si = 0,60 Cu = 0,40 Ni = 0,30 W = 0,30 Co = 0,30 Al = 0,30 V = 0,10 %.

Mo = 0,08 Ti = 0,05 Bi = 0,10 Nb = 0,06 Zr = 0,05 Pb = 0,40 B = 0,008

Der Massenanteil ist in % angegeben.

- **Legierte Stähle** - der Gehalt an einzelnen Elementen erreicht oder überschreitet in mindestens einem Fall die oben genannten Grenzwerte des Gehalts an Legierungselementen.

## Klassifizierung von Stählen nach Qualität entsprechend den Eigenschaften und der Verwendung:

- **Legierte Qualitätsstähle** - die Eigenschaften werden durch vorgeschriebene chemische Zusammensetzung und spezielle Verarbeitungsbedingungen erreicht. Diese Gruppe umfasst legierten Baustahl, legierten Stahl für Druckleitungen und Behälter, Stähle für Wälzlager, Werkzeugstähle, Schnellarbeitsstahl, Stähle mit besonderen physikalischen Eigenschaften - ferritische Ni-Stähle.

## Je nach Gehalt an Legierungselementen werden sie in die folgenden Untergruppen eingeteilt:

- Rostfreie Stähle mit dem Gehalt an Cr  $\min \geq 10,5 \%$  a max. C-Gehalt  $1,2 \%$ ,
- Schnellarbeitsstahl mit dem Gehalt an C  $\geq 0,60 \%$  und Cr =  $3,0 - 6,0 \%$ , und neben anderen Elementen enthalten sie mindestens zwei Elemente dieser Gruppe: Mo, W, V (Gesamtgehalt über  $7 \%$ ).

### 10.1.1. Rostfreie Stähle

Rostfreie Stähle sind Chromlegierungen mit Eisen, die etwa  $12 - 30 \%$  Chrom, bis zu  $30 \%$  Nickel oder bis zu  $2,4 \%$  Mangan bei einer bestimmten Menge an Mo, Si, Cu, Ti, Ni, N, etc. enthalten. (max. ein paar Prozent). Chrom sorgt für die Passivität dieser Legierungen und ist damit das wichtigste Element zur Erreichung der Korrosionsbeständigkeit. Rostfreie Stähle sind in einigen Umgebungen anfällig für lokale Korrosion (Lochfraß, Spalte, interkristallin, Spannungsrisskorrosion). Dies kann jedoch durch die Wahl einer geeigneten Stahlsorte unter den gegebenen Bedingungen vermieden werden. Obwohl der Anteil von Chrom, Nickel, Mangan und anderen Legierungselementen in Edelstählen recht hoch ist, ist das Grundelement Eisen und seine Legierung mit Kohlenstoff, d.h. Stahl. Edelstähle werden aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung und Struktur in mehrere Gruppen eingeteilt[71]:

- austenitisch
- martensitisch (härtbar)
- ferritisch
- austenitisch-ferritisch (Duplex)

## 10.1.2. Austenitische Stähle

Sie haben die höchste Korrosionsbeständigkeit aller Grundstähle. Diese kann durch Zugabe von Mo und Cu noch erhöht werden. Eine wichtige Eigenschaft ist die Duktilität und Festigkeit. Um unterschiedliche Eigenschaften zu erhalten, wird die Grundmasse durch Hinzufügen weiterer Elemente verändert, um zu erhöhen:

- allgemeine Korrosionsbeständigkeit (Chrom, Molybdän, Kupfer, Silizium, Nickel)
- Qualität der mechanischen Eigenschaften (Stickstoff)
- Bearbeitbarkeit (Schwefel, Selen, Phosphor, Blei, Kupfer)
- Beständigkeit gegen Schweißrisse (Mangan)
- Beständigkeit gegen Loch- und Spaltkorrosion (Molybdän, Silizium, Stickstoff)
- Beständigkeit gegen Korrosionsrisse (Reduzierung des Phosphor-, Arsen- und Antimonanteils)
- Kriechfestigkeit (Molybdän, Titan, Niob, Bor)
- Hitzebeständigkeit (Chrom, Aluminium, Silizium, Nickel)

## 10.1.3. Martensitischer Stahl

Die Korrosionsbeständigkeit ist gering. Es kann in Kombination mit Salpetersäure, Borsäure, Essigsäure, Benzoesäure, Ölsäure, Pikrinsäure, mit Carbonaten, Nitraten und Laugen verwendet werden. Ihr Widerstand nimmt jedoch mit zunehmender Temperatur ab. Die Beständigkeit gegen atmosphärische Korrosion ist in sehr sauberer Luft ausreichend.

## 10.1.4. Ferritische Stähle

Sie sind magnetisch und ausreichend dehnbar. Ein höherer Chromgehalt erhöht ihre Korrosionsbeständigkeit, die höher ist als bei martensitischen Stählen in oxidierender Umgebung. Sie können in der chemischen Industrie, in der Salpetersäure, im Verkehr, in der Klimatisierung, in der Architektur eingesetzt werden. Sie sind jedoch für einige Industriebereiche nicht geeignet. Sie sind nicht für Schweißkonstruktionen geeignet.

## 10.1.5. Austenitisch - ferritische (Duplex) Stähle

Sie werden aus klassischen austenitischen Stählen hergestellt. Durch den hohen Chrom- und Molybdängehalt verfügen sie über eine ausgezeichnete Bruch- und Korrosionsbeständigkeit. Die Mikrostruktur von Duplexstählen gewährleistet eine hohe Beständigkeit gegen Spannungsrisskorrosion, Spannungsrisskorrosion und Erosion. Die Schweißbarkeit von Duplexstählen ist gut. [71].

## 10.2. Allgemeine Eigenschaften von rostfreien Materialien

- Entsprechende Qualitäten unter ČSN
- Ferritische Stähle 17020, 17021, 17022, 17023, 17024, 17040
- Austenitische Stähle 17240, 17249, 17352, 17350, 17349, 17248, 17348, 17348
- Austenitisch-ferritisch 17381

### 10.2.1. Kaltgewalzte Edelstahlbleche

Sie werden nach DIN 17441/EN 10088-2, mit einer Toleranz DIN 59382 hergestellt.  
Oberfläche:

- 2R (III d) kaltgewalzt, blankgeglüht, glänzend poliert.
- 2B (III c) kaltgewalzt, gebeizt, geglüht, feingewalzt, opak poliert.
- 2G kaltgewalzt, geschliffen (verschiedene Arten von Schleifmaschinen P80 - P400) oder geschliffen und gebürstet.
- 2J kaltgewalzt, gebürstet (Scotch-Brite)

### 10.2.2. Warmgewalzte Edelstahlbleche

Sie werden nach DIN 17440/EN 10088-2, AD-W2 hergestellt. Toleranz DIN 59382, EN 10029.

### 10.2.3. Dekorative Stahlbleche

**Qualität:** 1.4016, 1.4301, 1.4301, 1.4404 (AISI 430, 304, 316L)

**Oberflächenbehandlung** 2B (geglüht, gebeizt), 2R (blankgeglüht);  
Andere Oberflächen auf Anfrage

**Abmessungen:** Dicke 0,5-2,0 mm

**Formate:** 1000×2000 mm; 1250×2500 mm; 1250×3000 mm; 1500×3000 mm;  
1500×3000 mm

Andere Formate auf Anfrage

## 10.2.4. Flachgewalzte Bleche

**Qualität:** 1.4016 ; 1.4301 ; 1.4301 ; 1.4404 (AISI 430 ; 304 ; 316L)

**Oberflächenbehandlung:** 2B (geglüht, gebeizt) ; 2R (blankgeglüht) ; R13 ; gebürstet; farbig;  
andere Oberflächen auf Anfrage

**Abmessungen:** Dicke 0,5-2,0 mm

**Formate:** 1000×2000 mm; 1250×2500 mm; 1250×3000 mm; 1500×3000 mm ;  
Andere Formate auf Anfrage

## 10.2.5. Bleche mit spezieller Oberflächenbehandlung

Farbige, gebürstete, getriebene und geätzte dekorative Oberflächen (verschiedene Muster).

## 10.2.6. Boden-(Aufreiß-)Platten

Weitere Informationen über Typen, Formate und Oberflächenbehandlung erhalten Sie bei den Herstellern auf Anfrage.

## II. SSAB (SCHWEDISCHE ROSTFREIE) STÄHLE

Es gibt viele Eigenschaften von Stahl. Es kann hart oder weich, zäh oder spröde, dick oder dünn oder extra stark sein, um dem Verschleiß zu widerstehen. Es kann auch eine Kombination all dieser Eigenschaften geben, bei der die Stahleigenschaften durch den technologischen Prozess im Stahlwerk, durch Walzen und Weiterverarbeitung bestimmt werden. [81].

Der schwedische Hersteller ist auf die Herstellung von hochfestem Stahl spezialisiert. In der Stahlherstellung konzentrieren sie sich auf den Automobilbau, Haushaltsstähle, Freizeitprodukte, Innenausstattungen, Großgebäude, Brücken, Transportmittel, Industrieanlagen oder Gesundheitseinrichtungen. In der Stahlproduktion stehen rund 500 Stahlsorten zur Auswahl.

Der Anteil der progressiven SSAB-Stähle nimmt stetig zu, da immer mehr Kunden ihre Vorteile und die Einsatzmöglichkeiten dieser Stähle entdecken. Um optimale Ergebnisse zu erzielen, ist es notwendig, Technologien und Innovationen zu kombinieren.

### In der Stahlherstellung gibt es zwei verschiedene Verfahren:

- **Stahl aus Erz** - Roheisen aus Eisenerz wird in Schweden aus Eisenerz-Pellets im Hochofen in Luleå und Oxelösund hergestellt. Eine geringe Menge Eisenschrott wird hinzugefügt, wenn Roheisen in LD zu Rohstahl verarbeitet wird. Schweden produziert auch Stahlbleche und Schwerstahl.
- **Stahl aus Eisenschrott** - wird in den USA hergestellt, wo das Stahlwerk Eisenschrott in Elektrolichtbogenöfen recycelt und Rohstahl nur aus Eisenschrott hergestellt wird. In den USA werden schwere Bleche produziert.

In beiden Fällen entspricht die resultierende Stahlzusammensetzung den SSEB - Veredelungsverfahren, bevor der geschmolzene Stahl gegossen und in einer Stranggießanlage auf BRÄMY abgekühlt wird. Hochfeste Stähle gewinnen ihre Festigkeit durch Zugabe von Legierungselementen und den Herstellungsverfahren, z.B. Härten in extrem schnellen Härteprozessen. Hohe Genauigkeit ist die wichtigste Voraussetzung.

## II.1. Art der SSEB-Stähle

Der schwedische Stahlproduzent SSEB konzentriert sich auf die Lösung komplexer Probleme. Die Experten von producer´s verfügen über exzellente Kenntnisse und Erfahrungen in allen Bereichen der Stahlerzeugung, angefangen bei den verschiedenen Stahleigenschaften (Festigkeit, fertigungstechnische Aspekte, Umformung, Verbindungen) über Verschleiß und Oberflächenbehandlung.

Ein gutes Beispiel ist die europäische Automobilindustrie, die in den letzten zehn Jahren den Kauf von modernem hochfestem Stahl verstärkt hat. Damit erzielen Fahrzeuge gute Ergebnisse bei Crashtests, senken den Kraftstoffverbrauch und tragen zur Reduzierung der Kohlendioxidemissionen bei. Der Hersteller von schwedischen Stählen hat eine führende Position auf dem Markt der fortschrittlichsten gehärteten und veredelten Stähle. Docol-Produkte (kaltgewalzt) werden häufig für Pkw verwendet. Kunden wählen oft Kombinationen von HARDOX-, WELDOX-, DOMEX- und Docol-Stählen in

Schwerfahrzeugen, Lastkraftwagen, Anhängern, LKW-Aufbauten, Containern und Kranen, um ihre Produkte zu optimieren. Dies führt zu einer Erhöhung der Tragfähigkeit, der Lebensdauer und der Reduzierung der Wartungskosten. Es gibt noch weitere Anwendungsmöglichkeiten. TOOLOX ist eine spezielle Stahlsorte, die zur Herstellung von Presswerkzeugen verwendet wird[81].

Spezialisten für den technischen Support sind von Anfang an mit der Vorbereitung neuer Produkte und Projekte beschäftigt. Der Hersteller entwickelt oft neue Stahlsorten, die für einen bestimmten Zweck bestimmt sind. Die Entwicklung neuer Produkte auf diese Weise hat klare Vorteile.

## II.2. Die aktuelle Produktpalette der SSSEB-Stähle:



**DOMEX**  
HIGH STRENGTH STEEL

DOMEX ® sind warmgewalzte Bleche für den Schiffbau, Gebäude, Maschinen, Fahrzeuge, Hebezeuge, Container.



**HARDOX**  
WEAR PLATE

HARDOX ® ist vergüteter und verschleißfester Stahl für Kippaufbauten, Container, Schredder, Mühlen, Schaufeln.



DOCOL ® ist kaltgewalztes Stahlblech in Form von Weichstahl zum Pressen und Biegen zu ultrahochfestem Stahl.



DOGAL ist es eine Art DP-Stahl, mit guter Umformbarkeit und Festigkeit. Dogal 600 D und 800 DP sind extra- und ultrahochfeste Stähle, feuerverzinkt.



WELDOX ® ist ein hochfester Baustahl, der für leichte Produkte mit gleicher oder höherer Festigkeit verwendet wird, als die Produkte aus gewöhnlichem Stahl. Es wird z.B. im Kranbau, bei Anhängern und Fahrzeugen eingesetzt.



PRELAQ ® ist ein beschichtetes Stahlblech für die Bauindustrie. Es wird für Dachdeckungsprodukte, Fassaden, Dächer, Regenfallrohre, Schmiedeteile verwendet.



ARMOX ® ist Stahl, der als Schutz beim Transport von z.B. Kassenfenstern, Minenräumfahrzeugen, Personenschutz usw. verwendet wird.



TOOLOX ® sind moderne Werkzeugstähle zum Verdichten von Werkzeugen und Maschinenelementen.

QSTE - hochfeste Stahlbleche, warmgewalzt, zum Kaltverformen  
QSTE-Stähle sind Feinkornstähle, thermisch und mechanisch gewalzte Mikrolegierungen™, die aufgrund ihrer höheren Festigkeit zum Kaltbiegen geeignet sind.

## 11.3. Umwelt und Recycling

Die natürlichen Ressourcen sind begrenzt. Daher ist es sehr wichtig, Ressourcen zu schonen und so effektiv wie möglich zu nutzen. Zunächst einmal ist es wichtig, Materialien wie Eisen, das bereits aus seinen natürlichen Vorkommen gewonnen wurde, zu recyceln.

Während seiner Lebensdauer werden etwa 90 % aller Eisen- und Stahlabfälle wiederverwendet oder recycelt. Stahlschrott, wie alte Fahrzeuge, Maschinen und Schienenfahrzeuge, wird geschmolzen, veredelt und neuer Stahl für neue Produkte hergestellt. Stahl ist Teil eines Kreislaufs, in dem alles erneuert werden kann. Rund ein Drittel der weltweiten Stahlproduktion basiert auf dem Schrottreycling. Da die Nachfrage nach Stahl weiter steigt und das verfügbare Schrottangebot übersteigt, muss neuer Stahl aus Eisenerz hergestellt werden. Schwedische producers´ Hochöfen gehören zu den energieeffizientesten der Welt.

Prozessgase werden mittels Dampfturbinen als Ausgangsmaterial für die Stromerzeugung in Blockheizkraftwerken (BHKW) genutzt. Damit wird etwa die Hälfte des Bedarfs der SSEB-Produzenten an elektrischer Energie für ihre drei Produktionsanlagen gedeckt. In der nächsten Stufe wird Dampf aus Dampfturbinen zur Warmwasserbereitung in einem Fernwärmenetz für 35.000 Haushalte verwendet, die mit Wasser aus dem Fernwärmenetz versorgt werden. Etwa 40.000 weitere Haushalte nutzen eine Fernwärmanlage aus Prozessgas, bei der die Wärme aus Hochofengas gewonnen wird.

Aus ganzheitlicher Sicht von Industrie und Energiewirtschaft können die Gesamtemissionen von Kohlendioxid reduziert werden. Darüber hinaus können in der Stahlindustrie andere Energien erneuert werden. Wenn also Kohle verwendet wird, soll sie in erster Linie für die Stahlerzeugung verwendet werden.

Produktionsstätten in Schweden und den USA nutzen Erdgas zur Erwärmung im Rahmen des Schrottreyclings, bevor Schrott in Elektrolichtbogenöfen geschmolzen wird. Erdgas wird auch zur Erwärmung von BRÁM in Plattenwalzwerken verwendet.

Diese Produktionsplatten producers´ erreichen geringere Emissionen in Luft und Wasser, insbesondere durch den Einsatz von Nebenprodukten, die Energiegase, Staub, Schlacke, Nassschlamm, Kühlflüssigkeit, Prozesswasser, OKOVINY, Schwefel, Teer, Benzol, etc. effektiv trennen. Die Materialien werden gesammelt und getrennt. Ein großer Teil dieser Materialien wird recycelt. Nebenprodukte der stahlverarbeitenden Industrie sind Vermögenswerte, die von neuen Anwendern als Rohstoff verarbeitet und genutzt werden können.

Merox, ein Stahlproduzent, konzentriert sich auf die Verwendung von Nebenprodukten. Sie verarbeitet Produkte und Rohstoffe für ein breites Anwendungsspektrum,

wie z.B. Baustoffe, Straßenmaterialien, Reitwege, Rohstoffe zur Herstellung von Zement, Düngemittel, Ferrite für Magnete und Pigmente für Farben. Die Verwendung von Nebenprodukten als neue Rohstoffe bedeutet einen wichtigen Schutz der natürlichen Ressourcen.

Hochofenruß, -staub und -schlamm aus Wasseraufbereitungsanlagen von Produktionsanlagen können mit Feinanteilen von Schrott und Pelletsabfällen gemischt werden und dienen als neuer Rohstoff für den Hochofen, z.B. in Form von Briketts.

Hochofenschlacke ist ein hervorragender Baustoff für den Straßenbau sowie für die Zementherstellung. Ein großer Vorteil ist der hohe Ca-Gehalt (30 %). Wenn Schlacke für den Straßenbau verwendet wird, bindet Ca sie in einer kontinuierlichen Ladeinheit. Gleichzeitig bindet Ca andere Elemente in der Schlacke und verhindert die Versauerung durch pH-Steigerung. Hochofenschlacke ist ein gutes Beispiel für die mögliche Anwendung eines geschlossenen Kreislaufs in Stahlwerken.

Kontinuierliche Probenahme von Luft, Wasser und Fisch und deren Analyse gewährleisten eine minimale Belastung der Umwelt. Umweltorganisationen erstellen und führen umfangreiche Programme zur Kontrolle und Überwachung aller Emissionen durch, die sicherstellen, dass diese die zulässigen Grenzwerte nicht überschreiten.

Der schwedische Stahlproduzent hat seine Arbeitsumweltpolitik, bei der die Sicherheit im Vordergrund steht, da sie für die Zufriedenheit am Arbeitsplatz, die Entwicklung von employees´ und die Rentabilität des Unternehmens von entscheidender Bedeutung ist. Vorrangiges Ziel ist es, dass es weder auf Seiten der Mitarbeiter noch auf Seiten der Lieferanten oder Besucher zu Unfällen, Verletzungen oder Berufskrankheiten kommt. Es garantiert einen systematischen Umgang mit der Arbeitsumgebung und der Arbeitssicherheit.

## 12. VERBUNDWERKSTOFFE I.

Eine qualitative Veränderung bei der Lösung des Widerspruchs zwischen den geforderten Eigenschaften und den tatsächlichen Eigenschaften homogener Materialien sind Verbundwerkstoffe, deren Komponenten in der Lage sind, die Funktionen auszuführen, die innerhalb eines Materials nicht kompatibel sind. Verbundwerkstoffe umfassen eine breite Palette verschiedener Materialien[59],[60],[61],[62].

**Nach den Eigenschaften können Verbundwerkstoffe unterteilt werden in:**

- Verbundwerkstoffe mit guten mechanischen Eigenschaften;
- Verbundwerkstoffe mit besonderen physikalischen und chemischen Eigenschaften.

Verbundwerkstoffe sind Materialien, die eine Kombination aus bestehenden homogenen Materialien sind. Das Basismaterial, die Matrix, hat eine Funktion als Bindemittel. Die zweite Komponente, Fasern, Schichten oder Dispersionsteilchen, sind Verstärkungsphasen. Die Eigenschaften einer Verbundverbindung aus dem Material A (Verstärkungskomponente) und B (Matrix) werden insbesondere durch die folgenden Parameter beeinflusst:

- a) Volumenanteil der Komponenten A und B ( $V_a$ ,  $V_b$ ),
- b) Geometrie des Systems, die gekennzeichnet ist durch:
  - eindimensionale kontinuierliche Phase (Faser, Stick),
  - zweidimensionale kontinuierliche Phase (Platte, Platine),
  - dreidimensionale kontinuierliche Phase (räumliches Netzwerk),
- c) Grad der Kontinuität (von totaler Kontinuität bis zu Dispersoiden),
- d) Anordnung der Phasen (parallele und serielle Anordnungen sind extrem).

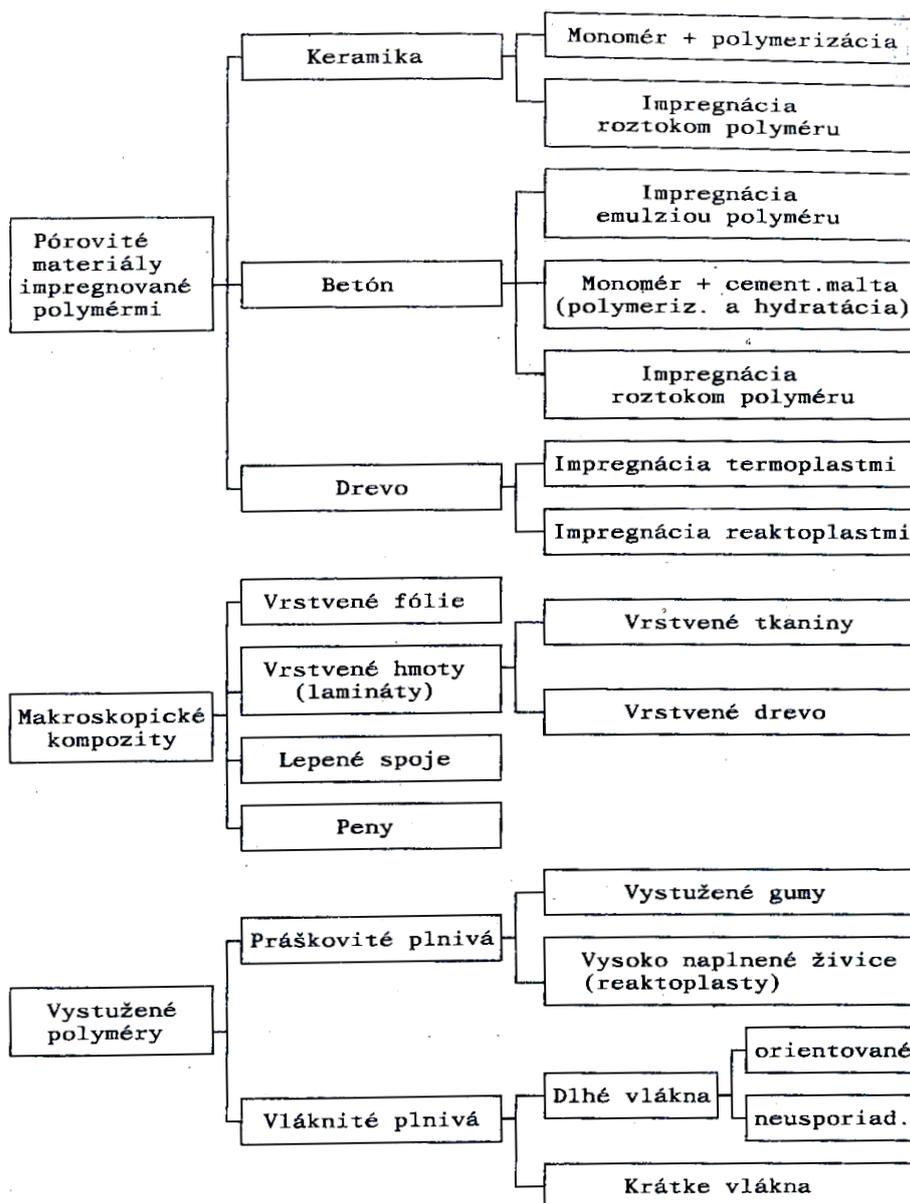
Die mechanischen Eigenschaften werden am stärksten durch die Anordnung der Phasen beeinflusst. Verbundeigenschaften können als additiv betrachtet werden, d.h. sie können aus den Eigenschaften der Ausgangsstoffe abgeleitet werden. [61]

### 12.1. Verbundwerkstoffe auf Polymerbasis

Fast alle biologischen Systeme bestehen aus Polymeren, die entweder mechanische Funktionen übernehmen (Holz, Knochen, Haut) oder chemische Reaktionen in der Natur (Blätter, Zellen) beeinflussen. Die Menschen verwenden Polymere seit Jahrtausenden,

thetische Polymere wurden im letzten Jahrhundert entwickelt. Einfache synthetische Polymere haben eine höhere Festigkeit als Metallmaterialien, aber auch als Holz oder Knochen. Weil Holz und Knochen Verbundwerkstoffe sind: Ihre Polymermatrix ist durch Fasern oder Partikel verstärkt. Aus diesem Grund konzentrierte sich auch die Entwicklung von Kunststoffen später auf Verbundwerkstoffe. Derzeit gibt es eine große Anzahl von Verbundwerkstoffen auf Polymerbasis, die von Jahr zu Jahr zunehmen. Tabelle 1 zeigt ihre Klassifizierung[59],[60],[61],[62].

Tabelle 1 Polymer-basierte Verbundwerkstoffe[61]



Makroskopische Verbundwerkstoffe sind Verbundwerkstoffe, bei denen makromolekulares Material eine makroskopische kontinuierliche Phase erzeugt. Die wichtigsten makroskopischen Verbundwerkstoffe sind laminierte Materialien (Laminates), die durch die Verbindung von mehreren Schichten aus Polymeren und Verstärkungsmaterial entstehen. Die Verstärkung erfolgt nicht in der Matrix, sondern die einzelnen Fasern werden in Form eines Gewebes mit verschiedenen Bindungen oder in Form von Matten oder Rovings (Faserstrang) verbunden. Die einzelnen Schichten sind mit flüssigen oder pulverförmigen Harzen gesättigt, die in der nächsten Stufe verstärkt werden. Zu den am häufigsten verwendeten Verbundkunststoffen je nach Art der Verstärkung gehören Glaslaminates. Laminates werden für die Herstellung von Teilen einer Karosserie einiger Fahrzeuge verwendet (die Karosserie von Trabant besteht aus Polyphenolharz, das durch Matten aus kurzen Baumwollfasern verstärkt wird). Glaslaminates werden auch für die Herstellung von Sportflugzeugen (Flugwerke und Flügel) verwendet.

Imprägnierte poröse Materialien sind Verbundwerkstoffe auf Basis von Keramik, Beton und Holz. Diese Materialien sind mit Polymeren gefüllt.

Verbundsicherheitsglas verhindert, dass sich Glasscherben bei Bruch ausbreiten. Sie wird durch die Verbindung von zwei oder mehreren Glasscheiben mit Kunststoffen hergestellt. [61].

Leichtbauwerkstoffe, Schaumstoffe, sind Polymere, die Hohlräume unterschiedlicher Form und Größe enthalten. Sie werden aus Kunststoff und Naturkautschuk hergestellt. Technisch gesehen sind die wichtigsten Leichtbaumaterialien PS (Polystyrol), PVC (Polyvinylchlorid) und Schaumduroplast. Sie werden z.B. im Innenbereich von Verkehrsmitteln (Sitze) und als Verpackungsmaterial[59],[60],[62] eingesetzt.

Ein Sonderfall von laminierten Kunststoffen sind Sandwiches. Es handelt sich um Verbund- oder Aluminiumbeschichtungen mit leichtem Kunststoffkern, die z.B. für die Herstellung von Karosserien von Kühlfahrzeugen und Wohnwagen bestimmt sind.

Verstärkte Polymere sind Materialien, die durch die Verbindung eines Verstärkungsmaterials (Füllstoff) und eines makromolekularen Materials entstehen, vor allem um die mechanischen Eigenschaften zu verbessern. Die Polymerkomponente ist die grundlegende kontinuierliche Matrix eines Verbundwerkstoffs. Der Füllstoff kann organisch oder anorganisch sein. Die Basis der verstärkten Polymere sind Duroplaste, z.B. PTFE (Polymer aus fluoriertem Ethylen - Teflon) mit Graphitfüllung und Bronzepulver für bewegliche, ungeschmierte Dichtungen und Gleitlager. [62].

## 12.2. Verbundwerkstoffe mit Metallmatrix

Verbundwerkstoffe mit Metallmatrix können unterteilt werden in:

- **Dispersionsverstärkte Materialien** - Metallmatrix + nicht-kohärente Dispersoide,
- **Faserverbundwerkstoffe** - Metallmatrix + dünne Drähte oder monokristalline Fasern.

Dispersionsverstärkte Materialien sind Verbundwerkstoffe mit einer durch disperse kontinuierliche Phasen verstärkten Matrix. Sie werden meist mit Hilfe von pulvermetallurgischen Technologien hergestellt. Sie haben eine polykristalline Matrix mit dispersiven Partikeln, meist vom Typ Oxid, Karbid und Nitrid. Die Verstärkung kann sowohl direkt (bestehend aus der Hemmung der Bewegung von Matrixversetzungen) als auch indirekt (bestehend aus der Tatsache, dass Dispersoide bei der Bildung die Dichte der Versetzungen erhöhen und die Korn- und Unterkornstruktur verfeinern) erfolgen. Theoretische Studien und Experimente zeigten, dass die maximale Bewehrung durch folgende Strukturparameter erreicht wird:

- Die Abmessungen der Verstärkungsteilchen der Sekundärphasen (Dispersoide) dürfen 50 nm nicht überschreiten,
- Der mittlere Abstand zwischen den Verstärkungsteilchen muss zwischen 0,1 und 0,5 liegen  $\mu\text{m}$  und ihre Verteilung muss gleichmäßig sein.

**Die oben genannten Parameter geben die tatsächlichen Volumenanteile der Dispersoide an.**

Aluminium SAP (Sinteraluminiumpulver), d.h. mit  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Partikeln verstärktes Aluminium, ist der älteste dispersionsbewehrte Werkstoff. Für seine Herstellung wird die Oberflächenoxidation von Aluminiumpulver während des Fräsprozesses verwendet. Harte Oxide auf der Oberfläche der Aluminiumpartikel brechen, lösen sich ab und reine Metallkörner werden geschweißt. Das Ergebnis dieser wiederholten Prozesse ist die Bildung von Aluminiumkörnern, die durch Oxidpartikel im Inneren verstärkt sind. Das dabei entstehende Aluminiumpulver wird verdichtet, gesintert und heiß extrudiert. Der Vorteil von SAP sind sehr gute mechanische Eigenschaften, geringe Dichte, gute Korrosionsbeständigkeit und gute Wärmeleitfähigkeit[59],[60],[61],[62].

Dispal ist ein neues Material mit ähnlichen Eigenschaften wie SAP. In diesem Fall ist es Aluminium verstärkt durch  $\text{Al}_4\text{C}_3$ -Partikel, die durch mechanisches Legieren der Mischung aus Aluminium und Graphitpulver hergestellt werden. Dieses Pulver wird anschließend heißverdichtet. Wie SAP wird auch Dispal als Baustoff vor allem im Automobil- und Luftverkehr eingesetzt. Es sind Eigenschaften mit hoher Rekristallisationsbeständigkeit und hoher ŽÁRUPEVNOST zwischen 300 - 500 °C.

TD-Nickel (98 % Ni, 2 % ThO<sub>2</sub>) gilt heute als traditionelles, dispersiv verstärktes Material. Durch Thoriumdioxid verstärktes Nickel hat eine hohe Festigkeit und ist für den Einsatz bei Temperaturen von 1100 °C und höher geeignet.

Dispersionsverstärkte ŽÁRUPEVNÉ-Legierungen werden derzeit am häufigsten mit Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> verstärkt, da ThO<sub>2</sub> radioaktiv ist. It´s hauptsächlich NiCrAl-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Legierungen, hergestellt durch mechanisches Legieren. Sie werden für Gasturbinen von Flugzeugtriebwerken eingesetzt. Es handelt sich um Eigenschaften mit hohem ŽÁRUPEVNOST bis zur Temperatur von 1200 °C und kurzzeitig bis zu 1350 °C.

Dispersionsbewehrte rostfreie und ŽÁRUPEVNÉ Stähle, austenitische und ferritische Stähle (verstärkt durch Al, Ti oder Th Oxide) weisen eine höhere Beständigkeit gegen Strahlungssprödigkeit auf und werden daher im Reaktorbau eingesetzt. Aufgrund ihrer hohen Festigkeit (auch bei hohen Temperaturen - kurzzeitig bis 1200 °C) bei akzeptabler Zähigkeit und Korrosionsbeständigkeit werden sie auch in der Luft- und Raumfahrt und Raketentechnik eingesetzt. Zu ihren Nachteilen gehören hohe Kosten, Anfälligkeit für Wärmesprödigkeit, Probleme mit der Schweißnahtfestigkeit, häufige anisotrope Eigenschaften und Neigung zu Spannungsrisskorrosion. [61].

## 12.3. Faserverstärkte Verbundwerkstoffe

Faserverstärkte Verbundwerkstoffe mit Metallmatrix-Ca-Durchmesser von 2 - 250 µm), Fasern (kurze dünne Drähte) und Whiskern (kurze einkristalline Fasern mit einem Durchmesser von ca. 1 µm).

Fasern (oder Drähte) haben eine Zugfestigkeit von ca. 2000 - 4000 MPa. Faserverstärkte Materialien werden meist geformt, so dass das Verbundmaterial eine signifikante Anisotropie der Eigenschaften aufweist. Sie werden pulvermetallurgisch hergestellt, indem man die Fasern mit dem Grundmaterial einbettet oder Matrix-Metallfolien walzt, die durch Fasern verflochten sind. Bei der Betrachtung der plastischen Verformung bei höheren Temperaturen wird das optimale Verhältnis l/d auf etwa 50 erhöht.

Verbundwerkstoffe mit Aluminiummatrix sind eines der am häufigsten verwendeten faserverstärkten Materialien. Das gebräuchlichste Material sind Kohlefasern, die entweder zwischen Aluminiumfolien komprimiert oder mit einer Ti- und B-Schicht und Aluminium beschichtet werden. Wichtige Fasern sind die B- und B-Fasern + SiC (Borfasern mit SiC-Schicht).

Verbundwerkstoffe mit Titanmatrix werden auch in der Luft- und Raumfahrt (Schaufeln von Triebwerksventilatoren) eingesetzt. Borsische und Berylliumfasern eignen sich für die Verstärkung von Titan. Verbundwerkstoffe mit einer Titanlegierungsmatrix vom Typ VT6 erreichen eine Faserfestigkeit von 1 000 - 1400 MPa.

ŽÁRUPEVNÉ Verbundwerkstoffe bestehen hauptsächlich auf Basis von Nickel-Superlegierungen mit Wolfram- und Korundfasern sowie Graphitfasern. Der Anteil der Fasern liegt zwischen 20 - 70 %, die Festigkeit bei der Temperatur von 20 °C beträgt 1 400 - 2 100 MPa, die Kriechzeit (1 000 h) bei der Temperatur von 1 100 °C beträgt 200 - 300 MPa, was viel höher ist als bei herkömmlichen ŽÁTUPEVNÉ-Legierungen. Sie können bei Temperaturen bis zu 1650°C eingesetzt werden.

Whisker sind kurze einkristalline Fasern mit einem Durchmesser von etwa 1 µm. Sie werden in der Regel durch Kristallisation aus der Flüssig- und Gasphase hergestellt. Die bequemste Produktion ist die Herstellung von Saphir ( $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) Whiskern. Sie werden durch Erhitzen von Aluminiumoxid auf 1 300 - 1 500 °C in wasserdampfhaltiger Wasserstoffatmosphäre hergestellt. Das Oxid wird reduziert, Aluminium verdampft und reoxidiert. Aluminiumoxid lagert sich dann in Form von Whiskern im kühleren Teil des Reaktionsraums[59],[60],[61],[62] ab.

Flüsterverstärkte Verbundwerkstoffe sind leicht zu formen und können eine hohe Festigkeit erreichen. So hat beispielsweise Aluminium mit SiC-Whiskern eine Zugfestigkeit von bis zu 600 MPa. Es wurden auch Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>- oder B<sub>4</sub>C-Whisker in Silber und Niobium entwickelt. Verbundwerkstoffe mit Niobmatrizen erwiesen sich bei einer Temperatur von 1100 °C als äußerst spannungsfähige Materialien. Der Hauptnachteil von Whiskern ist ihr hoher Preis.

## 13. VERBUNDWERKSTOFFE II.

### 13.1. Gesinterte metallische keramische Materialien

Die Pulvermetallurgie ermöglicht es, mehr Arten von neuen Materialien herzustellen, die mit herkömmlichen technologischen Verfahren nicht gewonnen werden können. Dazu gehören auch gesinterte Materialien aus der Mischung Metall und keramische Pulver. Dabei handelt es sich hauptsächlich um gesinterte Hartmetalle für Schneidwerkzeuge und Reibmaterialien zur Herstellung von Bremsbelägen.

Sinterkarbide gehören zu den gesinterten mikroheterogenen Materialien. Sie stellen ein fortgeschrittenes Stadium der harten Werkzeugmaterialien dar. Die Pulvermetallurgie ermöglichte die Herstellung von Werkstoffen, in denen die hohe Härte von Hartkarbiden genutzt wird, die beim Gießen sehr spröde sind. Ausgangsmaterial für die derzeit verwendeten Sinterkarbide sind Partikel aus hochfesten Karbiden aus Wolfram und Titan, die mittels Kobalt verbunden werden. Eine ausreichende Härte und Reduzierung der Sinterkarbidbrüchigkeit ist erreicht, wenn die einzelnen Karbidpartikel die Größe einiger weniger  $\mu\text{m}$  nicht überschreiten. Ein steigender Kobaltgehalt erhöht die Biegefestigkeit und reduziert die Härte. Die Härte (ohne Verringerung der Zähigkeit) kann durch das Aufbringen von Hartschichten auf Hartmetallplatten[61],[62] weiter erhöht werden.

Metallische und keramische Reibmaterialien sind gesinterte heterogene Materialien für Kupplungen und Bremsbeläge für sehr effiziente Transportmittel (Flugzeuge, Straßenbahnen), Maschinen und Transportmechanismen. Für diese sind konventionell verwendete nichtmetallische Reibungsmaterialien nicht geeignet, da bei hoher Temperatur ein hoher Reibungskoeffizient erforderlich ist, gute Wärmeleitfähigkeit (zur Leitung der durch Reibung erzeugten Wärme). [61], [62].

### 13.2. Verbundwerkstoffe mit keramischer Matrix

Es wurden neuartige keramische Materialien entwickelt. Diese werden als "Materialien der dritten Generation" bezeichnet und finden z.B. im Maschinenbau, in der Elektrotechnik und in der Elektronik Verwendung.

**Es gibt zwei Gruppen von keramischen Materialien:**

- Monolithische keramische Materialien,
- Verbundwerkstoffe.

## 13.3. Monolithische keramische Materialien

Grundelement dieser Materialien sind Aluminiumoxide, Silikone und anorganische Materialien verschiedener Art. Neben der Entwicklung dieser Materialien wurden auch neue Technologien für ihre Herstellung und Verarbeitung entwickelt. Neue keramische Werkstoffe werden als Strukturkeramik bezeichnet, die aus veredelten oder synthetischen Rohstoffen hergestellt wird. Für die Verarbeitung von Rohstoffen werden spezielle chemische Verfahren sowie mineralische und technische Behandlungen eingesetzt.

### **Strukturkeramik hat spezifische Eigenschaften, die es ermöglichen, sie zu nutzen:**

- In den Bereichen mit priorisierten elektrischen und mechanischen Eigenschaften, d.h. in der Elektronik und Starkstrom-Elektrotechnik.
- Als Schneidstoff. Gesinterte Aluminiumoxide, Siliziumkeramiken und Zirkonium-Aluminium-Keramiken sind beim Schneiden vorteilhafter als Wolframkarbide.
- für Bauteile, die bei hohen Temperaturen arbeiten, wobei insbesondere die Keramikstabilität bei Temperaturen bis zu 1 300o C verwendet wird. Keramik wird z.B. für Turbinenschaufeln, Rotorabdeckungen, Lüfter und deren Hebezeuge in Verbrennungsmotoren verwendet.

## 13.4. Keramische Verbundwerkstoffe

Ihre Eigenschaften werden durch eine geeignete Anordnung ihrer Struktur - Füllstoffmatrix und Fasern - erreicht. Sie haben eine höhere Festigkeit und Härte als andere Materialien. Dies wird durch die Verstärkung mit Fasern und Whiskern erreicht. Während Polymerverbundwerkstoffe nur bei Temperaturen von maximal 300o C und bei Metallverbunden von 600o C eingesetzt werden können, sind keramische Verbundwerkstoffe auch bei wesentlich höheren Temperaturen stabil.

### **Es gibt zwei Arten der Herstellung von keramischen Verbundwerkstoffen:**

- Pulveraufbereitung des Grundmaterials und Infiltration von Fasersträngen Suspensionen. Sie sind durch Fasern oder Whisker verstärkt, die Verdichtung erfolgt durch Heißpressen;
- Chemische Prozesse - thermische Zersetzung, Reaktionsbindung und chemische Infiltrationstechnik. Hohe Betriebstemperaturen sind nicht erforderlich. Chemische Prozesse sind im Vergleich zu den vorherigen langsam.

Keramische Verbundwerkstoffe werden mit ähnlichen Technologien wie Metallverbunde hergestellt. Die Oberflächenbeschichtung von Fasern wird verwendet, um die richtige Phasengrenze zwischen einer Faser und der Füllung zu erreichen[61],[62].

## 13.5. Kohlefaser-Verbundwerkstoffe

**Der Ausgangsrohstoff für die Herstellung von Kohlenstofffasern sind drei Materialien:**

- Zellulose - die erzeugten Fasern haben eine unvollkommene Struktur, sie werden bei hohen Temperaturen als Isoliermaterial verwendet.
- Polyacrylnitril (PAN) - Standardfasern, seit 1980
- Pech, eine kostspielige Methode der Faserherstellung, deren Endpreis angesichts des niedrigen Preises des Ausgangsmaterials sehr günstig ist. Es hat einen hohen Wert des E-Moduls und sehr gute thermische und elektrische Eigenschaften. Ihre Druckfestigkeit ist im Vergleich zu den Standardfasern deutlich geringer, da die Verbindungen zwischen den einzelnen Graphitschichten reduziert werden. Sie haben einen relativ geringen Marktanteil, HM (mit hoher Flexibilität) Fasern, HT (mit hoher Festigkeit) Fasern werden für spezielle Zwecke verwendet.

Im Allgemeinen zählt die Herstellung von Verbundfasern zu den fortschrittlichsten Produktionstechnologien. Das derzeit am häufigsten verwendete Herstellungsverfahren ist die Faserpyrolyse mittels PAN. Sie werden nach dem Erwärmen gedehnt, um die gewünschte Orientierung der Moleküle zu erreichen. Anschließend ist eine Karbonisierungsstabilisierung für bis zu 10 Stunden bei Temperaturen von 220-230°C erforderlich. Der nächste Schritt beinhaltet das Strecken der Fasern in einer inerten Atmosphäre bei Temperaturen von 1000-1500°C und die Verkokung wird fortgesetzt. Diese Fasern werden als HS-Fasern (hochfest) bezeichnet. Bei Erwärmungstemperaturen über 2500°C in einer inerten Atmosphäre bewirkt die Graphitierung die Bildung einer graphitähnlichen Struktur. Diese Fasern werden als HM-Faser (High Modulus) bezeichnet.

Derzeit ist es möglich, die Fasern nach Kundenwunsch anzupassen. Dazu gehören z.B. hochmodulige Graphitfasern, Hohlfasern, Fasern mit hohem Elastizitätsmodul oder Nanofasern[59],[60],[61],[62].

Abbildung 1 zeigt die Übersicht der Gebrauchseigenschaften von Kohlefasern.

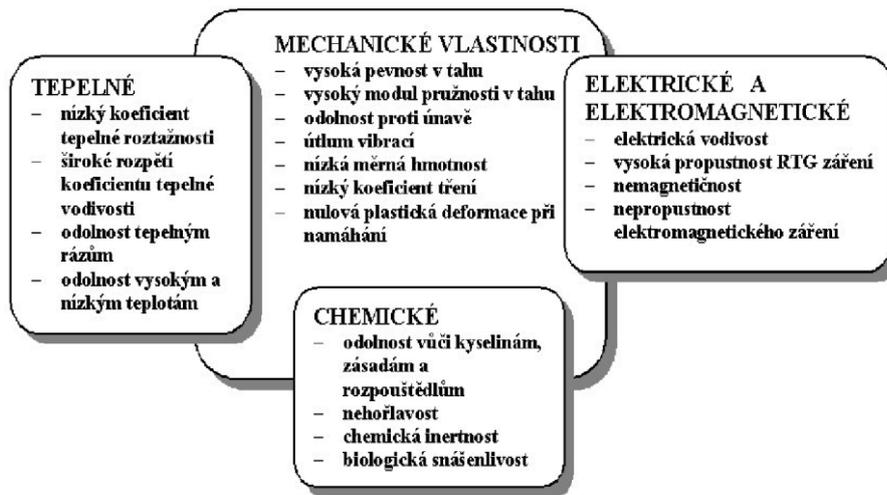


Abbildung 1 Eigenschaften von Kohlenstofffasern und Verbundwerkstoffen[60]

*Legende: tepelné vlastnosti (thermische Eigenschaften): nízký koeficient tepelné roztažnosti (niedriger thermischer Ausdehnungskoeffizient), široké rozpětí koeficientu rázů (breite Palette von Rückstellungskoeffizienten), odolnost vůči vysokým a nízkým teplotám (Widerstandsfähigkeit gegen hohe und niedrige Temperaturen)*

*Mechanické vlastnosti (mechanische Eigenschaften):vysoká pevnost v tahu (hohe Zugfestigkeit), vysoký modul pružnosti v tahu (hoher Zugflexibilitätsmodul), odolnost proti únavě (Ermüdungsfestigkeit), útlum vibrací (Schwingungsdämpfung), nízká měrná hmotnost (geringes spezifisches Gewicht), nízký koeficient tření (niedriger Reibungskoeffizient), nulová plastická deformace při namáhání (keine plastische Verformung bei Belastung)*

*Elektrické a elektromagnetické (elektrisch und elektromagnetisch): elektrická vodivost (elektrische Leitfähigkeit), vysoká propustnost RTG záření (hohe Röntgendurchlässigkeit), nemagnetičnost (nicht magnetisch), nepropustnost elektromagnetického záření (Nichtdurchlässigkeit elektromagnetischer Strahlung),*

*Chemické (chemisch): Odolnost vůči kyselinám, zásadám a rozpouštědlům (Beständigkeit gegen Säuren, Basen und Lösungsmittel), nehořlavé (brennbar), chemická Internist (chemische Trägheit), biologická snášlivost (Biokompatibilität)*

Die durch Graphitieren hergestellten Fasern bilden Stränge, die auf Vorgarne aufgewickelt werden. Die Spulen werden dann auf einem Webstuhl platziert, wo der Stoff hergestellt wird.

Durch die Erhöhung der Faseranzahl in der Kette entstehen verschiedene Arten von Faserübergängen. Diese werden als Bindungen[59],[60],[61],[62] bezeichnet. Der Vorteil von Geweben gegenüber unidirektionaler Verstärkung liegt in der einfachen Verarbeitung. Abbildung 2 zeigt die Klassifizierung von Faserverbundwerkstoffen in einem schematischen Diagramm aus geometrischer Sicht.

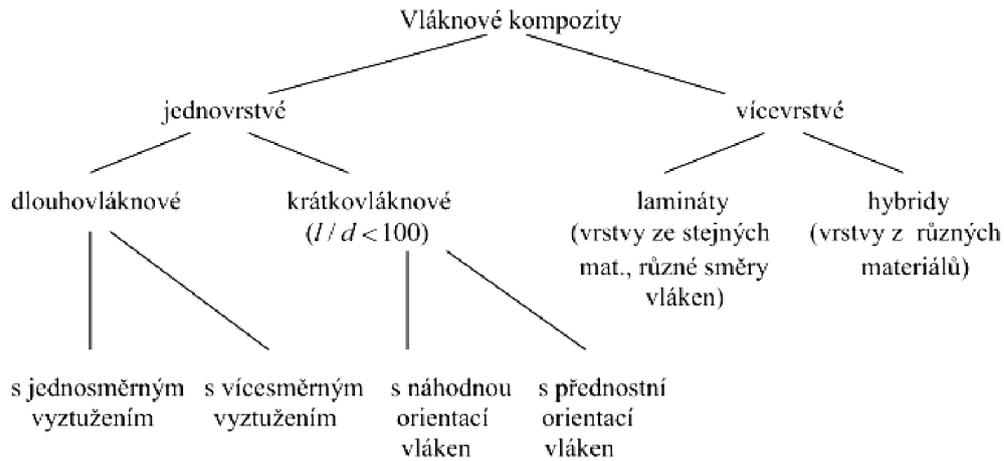


Abbildung 2 Klassifizierung von Faserverbundwerkstoffen aus geometrischer Sicht[61].

Legende: vláknové kompozity - Faserverbundwerkstoffe, jednovrstvé - einschichtig, vícevrstvé - mehrschichtig, dlouhovláknové - langfaserig, krátkovláknové - kurzfaserig, s jednosměrným vyztužením - mit einseitiger Verstärkung, s vícesměrným vyztužením - mit multidirektionaler Verstärkung, s náhodnou orientací vláken - mit zufälliger Faserorientierung, lamináty - Laminate (Schichten aus gleichen Materialien, mit unterschiedlicher Faserorientierung), Hybridy (Schichten aus verschiedenen Materialien)