

6 Kontaktwerkstoffe

Kontaktstücke (kurz: Kontakte) werden z. B. in Schaltern, Schützen oder als Schleifkontakte verwendet.

Kontakte schließen durch gegenseitiges Berühren elektrische Stromkreise.

6.1 Einteilung der Kontakte

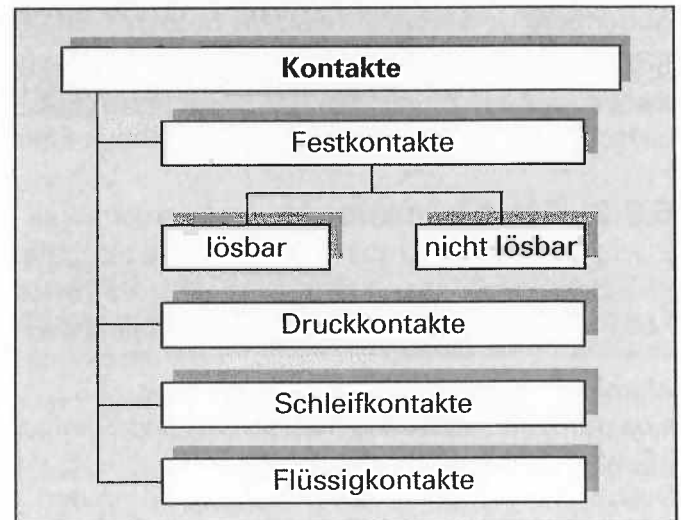
Kontakte teilt man nach der Art der Kontaktgabe und nach ihrer konstruktiven Ausführung ein (**Übersicht**).

Festkontakte werden in nicht lösbare und in lösbare Festkontakte unterteilt. Sie werden thermisch beansprucht. Nicht lösbare Festkontakte sind z. B. Wickelkontakte zur Verbindung von Drähten, Schweißkontakte zum Anschluss von Wicklungen an Kollektorlamellen und Lötkontakte bei gedruckten Schaltungen. Lösbare Festkontakte sind Klemmkontakte (**Bild**), Kontakte von Steckern und bedingt auch Schraubkontakte z. B. bei Sammelschienen.

Schleifkontakte werden z. B. bei Stellwiderständen und Stromwendern von Motoren verwendet. Sie werden vor allem thermisch und durch Abrieb beansprucht.

Druckkontakte (auch: Abhebekontakte) haben z. B. Schütze und Relais sowie Taster und Hochspannungsschalter. Sie sollen lichtbogenbeständig sein und eine hohe Schalthäufigkeit ermöglichen.

Flüssigkontakte befinden sich z. B. in quecksilbergefüllten Schaltrohren. Durch Kippen der Schaltrohre schließt bzw. öffnet das Quecksilber die Strombahn.



Übersicht: Kontaktarten

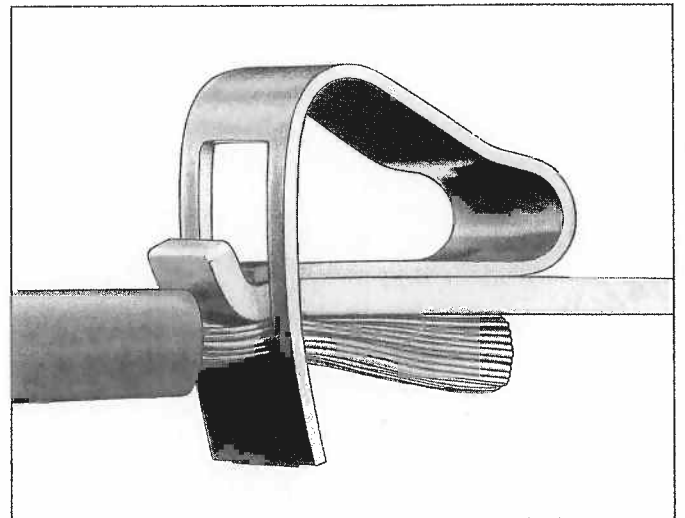


Bild: Käfigzugfeder, z.B. für Klemmleisten

6.2 Anforderungen an Kontaktwerkstoffe

Die Anforderungen an die Kontaktwerkstoffe ergeben sich aus der jeweiligen Aufgabenstellung. Angestrebt werden folgende Werkstoffeigenschaften:

- gute elektrische und thermische Leitfähigkeit
- hohe Lichtbogen- und Abbrandbeständigkeit
- hoher Schmelzpunkt
- geringe Neigung zum Kleben und Verschweißen
- wenig Neigung zur Materialwanderung
- beständig gegen chemische Einflüsse, Oxidation und Fremdschichtbildung
- gute mechanische Eigenschaften (Festigkeit, Härte, Bearbeitbarkeit)

Die verfügbaren Kontaktwerkstoffe können nur einen Teil der geforderten Eigenschaften erfüllen. Man wählt daher nach der zu erwartenden Kontaktbeanspruchung und den Werkstoffkosten aus. Materialkosten können eingespart werden durch das Aufbringen hochwertiger Kontaktwerkstoffe wie Gold, Silber oder Platin auf preiswerte Trägerwerkstoffe wie Kupfer, z. B. durch Aufdampfen, Galvanisieren, Plattieren (Kontaktbimetalle) oder durch Kontaktnieten. Geringe Materialwanderung oder hohe Lichtbogen- und Abbrandfestigkeit wird durch Legierungen oder Verbundwerkstoffe erreicht.

6.3 Begriffe der Kontakttechnik

6.3.1 Kontaktwiderstand

Der Kontaktwiderstand setzt sich aus dem als Engwiderstand bezeichneten Übergangswiderstand der Kontaktflächen und dem sich auf den Kontaktflächen bildenden Fremdschichtwiderstand zusammen.

Der **Engwiderstand** entsteht durch die Unebenheit der Kontaktflächen. Die wirksamen Berührungsflächen werden dadurch begrenzt, sodass der Stromübergang eingeeengt wird. Es entsteht ein Widerstand (Engwiderstand). Er ist umso größer, je größer der spezifische Widerstand des Kontaktwerkstoffes ist und je kleiner die Summe der wirksamen Kontaktflächen ist (**Bild 1**). Oberflächenunebenheiten, die durch Abbrand entstehen, führen ebenfalls zu einer Zunahme des Engwiderstandes. Kontakte für große Leistungen und hohe Spannungen werden daher aus Werkstoffen mit hohem Schmelz- und Siedepunkt hergestellt, z. B. aus Wolfram oder Molybdän.

Die Kontaktflächen verformen sich unter dem Einfluss der Anpresskraft der Kontakte (Kontaktkraft) elastisch und plastisch. Mit steigender Kontaktkraft und abnehmender Härte des Werkstoffs vergrößern sich die Berührungsflächen, wodurch der Engwiderstand abnimmt.

Fremdschichtwiderstand (Hautwiderstand) ist der Widerstand der Schicht, die sich auf der Kontaktoberfläche bildet. Fremdschichten entstehen meist durch Oxidation und durch Korrosion. Bereits Schichten von < 500 nm können den Kontaktwiderstand merklich beeinflussen. Schon geringe Konzentrationen von Schwefel in der Luft verursachen Fremdschichten, besonders bei Kupfer sowie bei Silber und ihren Legierungen. Um Sulfidschichten insbesondere auf Silberkontakten zu vermeiden, vergoldet man oder verwendet als Legierungszusätze Gold, Palladium und Platin. Der Fremdschichtwiderstand ist umso größer, je dichter die Fremdschicht und je kleiner die Berührungsfläche ist. Er nimmt mit steigender Temperatur zu und kann sich selbst ohne Schaltvorgang im Laufe der Zeit vervielfachen, von mehreren Ohm bis in den Kiloohmbereich. Je kleiner die zu schaltende Leistung und der Kontaktdruck sind, desto stärker wirken sich die Fremdschichtwiderstände aus. Bei leistungslos schaltenden Kontakten, z. B. in Relais, werden daher Edelmetalle wegen ihrer geringen Fremdschichtneigung eingesetzt. Bei Leistungskontakten, z. B. im Schütz, bauen sich die Fremdschichten durch Reiben der Kontakte beim Schaltvorgang ab. Kontaktfette und Öle verringern ebenfalls Fremdschichtbildungen.

6.3.2 Kontaktverschleiß

Kontakte werden elektrisch und mechanisch beansprucht. **Elektrischer Verschleiß** entsteht durch Materialwanderung und Abbrand, **mechanischer Verschleiß** durch Abrieb.

Materialwanderung führt zu einer Veränderung der Kontaktoberfläche durch Spitzen- und Kraterbildung.

Feinwanderung tritt vor allem beim Schalten von Gleichströmen kleiner Leistung auf. An der Anode wird Material abgetragen und auf die Katode verlagert (**Bild 2**). Die entstehenden Spitzen und Krater können verhaken und ein einwandfreies Schalten verhindern.

Grobwanderung entsteht durch stabile Lichtbögen. Erreichen die Kontakte an den Berührungsstellen des Lichtbogens ihre Schmelz- oder ihre Siedetemperatur, schmilzt und verdampft der Kontaktwerkstoff. Bei kleinem Kontaktabstand lagert sich das verdampfende Material auf dem jeweils anderen Kontakt ab. Bei Gleichstrom erhitzt der Lichtbogen die Katode stärker, das Katodenmaterial wird daher auf die Anodenfläche übertragen.

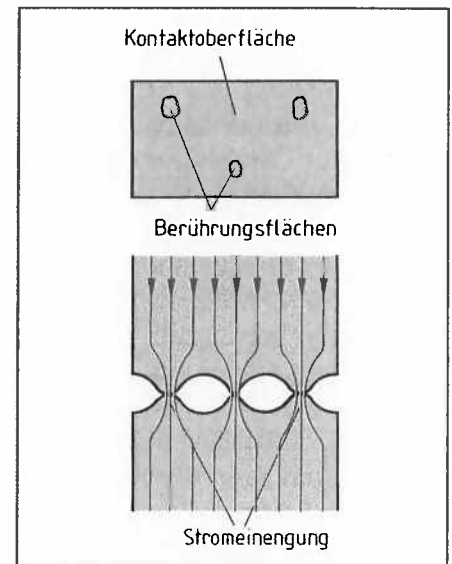


Bild 1: Engwiderstand

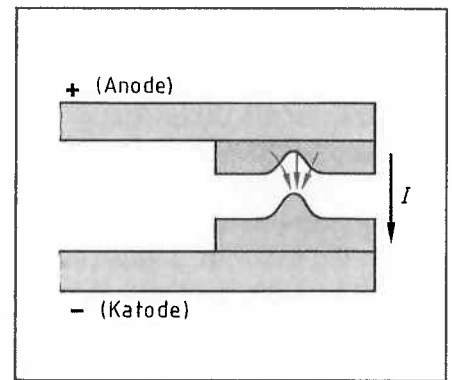


Bild 2: Materialübertragung durch Feinwanderung

Abbrand nennt man den Materialverlust von öffnenden und schließenden Kontakten durch die Wärmewirkung des Schaltlichtbogens. Beim Einschalten z. B. eines Schützes kann auftretendes **Prellen** zur Lichtbogenbildung führen. Hierbei öffnen und schließen die Kontakte mehrfach, bis nach Ablauf der Prelldauer eine feste Verbindung eintritt (**Bild 1**). Beim Öffnen eines Kontaktes kann bereits bei einer Spannung ab 10 V ein Lichtbogen entstehen, wenn ein Strom von mehr als 1 A fließt (Brennspannung und Brennstrom). Durch den punktförmigen Ein- und Austritt des Lichtbogens an der Kontaktfläche steigt die Stromdichte enorm an. Dadurch kann die Temperatur an der Kontaktstelle den Schmelz- und Siedepunkt des Werkstoffs überschreiten. Das Material verbrennt. Bei höheren Spannungen und großen Kontaktabständen wird Material in die Umgebung verspritzt oder verdampft. Bei kleinen Kontaktabständen tritt überwiegend eine Grobwanderung des Kontaktwerkstoffes ein. Besonders bei Leistungsschaltern und Schützen ist die Lebensdauer der Kontakte von der Abbrandfestigkeit abhängig. Ein Maß für das gefahrlose Schalten ohne Lichtbogenbildung ist der mögliche Grenzstrom. Wolfram z. B. hat einen hohen Grenzstrom, sodass es sehr gut zur Herstellung abbrandfester Kontakte geeignet ist (**Bild 2**).

Abrieb tritt ein, wenn sich Kontakte berühren und aneinander vorbeibewegen, z. B. bei Schleifkontakten (Kohlebürste am Kollektor eines Motors) oder bei Abhebekontakten (Schütz). Der Abrieb nimmt mit der Weichheit und Sprödigkeit des Werkstoffs zu. Durch gezielten Kontaktabrieb kann jedoch auch der Fremdschichtwiderstand auf Kontaktoberflächen verringert werden. Zu hoher Abrieb, z. B. bei Schleifkontakten durch übermäßigen Kontaktdruck, führt zu vorzeitigem Kontaktverschleiß, zu Überhitzung, Kontaktoxidation und zum Verkleben.

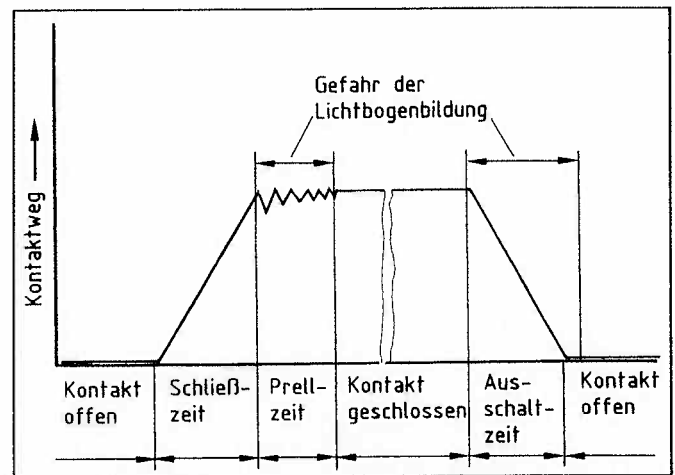


Bild 1: Lichtbogenbildung bei Schaltkontakten

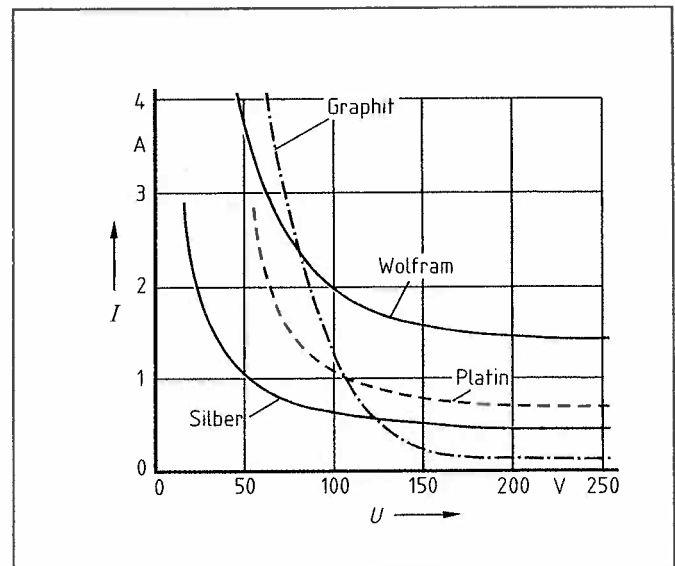


Bild 2: Grenzströme von Kontaktwerkstoffen abhängig von der Spannung

6.3.3 Kleben und Verschweißen von Kontakten

Kleben oder Verschweißen verhindert das Öffnen einer Kontaktstelle. Besonders bei Druck- und Abhebekontakten, z. B. bei Schützen und Hochspannungsschaltern, besteht beim Schließvorgang diese Gefahr.

Verschweißen erfolgt, wenn die Wärmeentwicklung an der Kontaktstelle so groß ist, dass die Schmelztemperatur des Kontaktmaterials überschritten wird, z. B. durch zu große Ströme im Engewiderstand oder durch Einschaltlichtbögen.

Kleben ist ein unerwünschtes mechanisches Haften der Kontakte. Es tritt bereits bei einer Erwärmung auf etwa ein Drittel der Schmelztemperatur (Entfestigungstemperatur) ein. Kleben kann durch den Zustand der Kontaktoberfläche verursacht werden, z. B. durch Fremdschichten.

Klebe- und Schweißvorgänge werden durch einen kleinen Kontaktwiderstand und durch Werkstoffe mit hoher Schmelztemperatur vermieden.

Metalle wie Kupfer neigen weniger zum Verschweißen als Edelmetalle. Silberlegierungen z. B. auf Ag-Ni-Basis haben ebenfalls eine geringe Verschweißneigung.

6.4 Eigenschaften von Kontaktwerkstoffen

Kontaktwerkstoffe können reine Metalle, Legierungen, Sinter- und Verbundwerkstoffe sein (**Übersicht**).

Kontaktwerkstoffe werden nach der Schaltleistung ausgewählt.

Treten praktisch **keine Schaltleistungen** auf, z. B. in der Nachrichtentechnik, muss die Kontaktfläche beständig gegen Fremdschichtbildung, z. B. durch Oxidation, sein. Bevorzugt werden Edelmetalle (z. B. Gold, Silber, Platin), meist als Kontaktüberzug.



Übersicht: Kontaktwerkstoffe

Kontakte für **geringe Schaltleistungen** sollen nicht zu Fremdschichtbildung und Feinwanderung neigen. Verwendung finden Edelmetalle und deren Legierungen.

Bei Kontakten für **mittlere Schaltleistungen** besteht bereits die Gefahr der Lichtbogenbildung. Verschweiß- und Klebeneigung sowie Grobwanderung sollen gering sein. Eingesetzt werden Kupfer, Legierungen von Silber, Platin und Palladium sowie Sinterwerkstoffe, z. B. Ag-Ni.

Kontakte höchster Schaltleistung werden vor allem durch Lichtbogenbildung und Abbrand belastet. Bevorzugt werden Sinterwerkstoffe aus Wolfram-Silber oder Wolfram-Kupfer.

6.4.1 Reine Metalle als Kontaktwerkstoffe

Reinmetalle sind für Kontakte mit geringer Schaltleistung geeignet, vor allem Silber, Gold und Platin. Sie werden wegen ihrer chemischen Beständigkeit (beständig gegen die Bildung von Fremdschichtwiderständen) z. B. für Kontakte der Nachrichtentechnik und Messtechnik verwendet, aus Kostengründen nur als dünnes Überzugsmaterial. Zum Schalten von Leistungen wie bei Schaltern und Schützen kommen weniger edle Metalle zum Einsatz, z. B. Kupfer für gleitende Kontakte und Molybdän sowie Wolfram für Leistungsschalter. In Schaltröhren wird Quecksilber verwendet.

Kontaktwerkstoff Silber (Ag)

Eigenschaften: Silber hat die beste elektrische und thermische Leitfähigkeit aller Metalle (**Tabelle, Seite 148**). Sein Kontaktwiderstand ist gering. Silber überzieht sich an Luft mit einer leitenden Oxidschicht. In schwefelhaltiger Atmosphäre entsteht ein schwarzer Überzug aus Silbersulfid, der den Kontaktwiderstand erheblich erhöht. Für Kontakte mit Schaltleistung ist reines Silber ungeeignet: es ist weich, hat einen relativ niedrigen Schmelzpunkt und neigt deshalb zum Kleben und Verschweißen.

Verwendung: Reinsilber wird für gering belastete Kontakte als Überzugsmaterial verwendet. Durch Legieren, z. B. mit Kupfer oder Nickel, steigert man Härte und Abbrandfestigkeit. Silber ist weich und lässt sich auch zu sehr dünnen Folien und Drähten verarbeiten.

Kontaktwerkstoff Gold (Au)

Eigenschaften: Gold (Feingold) hat eine gute elektrische Leitfähigkeit (**Tabelle, Seite 148**). Es ist chemisch sehr beständig und bildet im Gegensatz zu Silber auch in schwefelhaltiger Atmosphäre kaum Fremdschichten. Gold ist weich und dehnbar und neigt zum Kleben und zur Feinwanderung.

Verwendung: Gold wird für hochwertige, fremdschichtfreie Kontakte ohne Schaltleistung verwendet, bei denen geringe Kontaktkräfte auftreten, z. B. als „Hauchvergoldung“ mit einer Schichtdicke $< 0,5 \mu\text{m}$. Gold wird meist legiert, z. B. mit Platin, Nickel oder Silber, um größere Härte, geringere Feinwanderung und kleinere Klebeneigung zu erreichen. Durch Legieren wird die elektrische Leitfähigkeit und die chemische Beständigkeit etwas herabgesetzt. Derartige Kontakte verwendet man z. B. bei Messgeräten und bei Steckverbindungen der Informationstechnik. Um Material zu sparen, werden die Kontakte meist als Bimetalle (**Seite 152**) ausgeführt, z. B. plattierte Schichten oder plattierte Kontaktnieten.

Tabelle: Kontaktwerkstoffe (Edelmetalle)

	Silber	Gold	Platin	Palladium	Rhodium
Leitfähigkeit in $\text{m}/(\Omega \cdot \text{mm}^2)$	62	47,6	10,2	9,3	23
Wärmeleitfähigkeit in $\text{W}/(\text{K} \cdot \text{m})$	410	310	71	70	87
Schmelztemperatur in $^{\circ}\text{C}$	960	1063	1770	1554	1966
Siedetemperatur in $^{\circ}\text{C}$	2210	2950	3800	2930	3670
Dichte in kg/dm^3	10,5	19,3	21,4	12	12,4
Härte HV	30 bis 80	25 bis 60	40 bis 95	40 bis 100	130 bis 280

Kontaktwerkstoff Platin (Pt)

Eigenschaften: Platin ist wie Gold chemisch sehr beständig. Es ist widerstandsfähig gegen Oxidation und gegen Schwefel, neigt jedoch zu Feinwanderung. Die Leitfähigkeit ist geringer als die von Silber oder Gold, während die Schmelz- und Siedetemperatur wesentlich höher sind (Tabelle).

Verwendung: Reines Platin wird nur als Schichtwerkstoff bei Kontaktbimetallen (Seite 152) verwendet. Für Kontakte ohne bzw. mit geringer Schaltleistung werden einige der so genannten **Platinmetalle** eingesetzt. So nennt man die Metalle Iridium (Ir), Rhodium (Rh), Ruthenium (Ru), Palladium (Pd) und Osmium (Os), weil sie gemeinsam mit Platin vorkommen und auch im Periodensystem beieinander in der VIII. Nebengruppe stehen. Sie weisen alle eine hohe chemische Beständigkeit auf. Vor allem Platin und Palladium sind hochwertige Legierungsmetalle. Platinmetalle werden für korrosionsbeständige und mechanisch stark beanspruchbare Kontakte der Mess- und Informationstechnik eingesetzt.

Kontaktwerkstoff Palladium (Pd)

Eigenschaften: Palladium ist das wichtigste Platinmetall. Seine Leitfähigkeit und Härte entspricht der von Platin (Tabelle). Es neigt bei höheren Temperaturen zu Oxidschichtbildung.

Verwendung: Palladium wird als Kontaktüberzug verwendet. Galvanische Überzüge haben Schichtdicken von 1 bis 5 μm . Es ist preisgünstiger als Gold, Platin oder Rhodium und wird oft an Stelle von Platin verwendet, z. B. in der Relais-technik.

Kontaktwerkstoff Rhodium (Rh)

Eigenschaften: Rhodium ist außerordentlich widerstandsfähig gegen chemische Korrosion und anlaufbeständig, als Massivwerkstoff auch lichtbogenfest. Es ist sehr hart (Tabelle) und verschleißfest (abriebbeständig) sowie spröde.

Verwendung: Wegen der schweren Bearbeitbarkeit wird es auf ein Basismaterial, z. B. Silber, aufgedampft oder galvanisch abgeschieden. Es genügen sehr dünne Schichten ($< 1 \mu\text{m}$). Rhodiumkontakte werden z. B. bei Reed-Relais oder als Schleifkontakte in der Messtechnik verwendet.

Kontaktwerkstoff Kupfer (Cu)

Eigenschaften: Kupfer hat eine gute elektrische und thermische Leitfähigkeit (Tabelle, Seite 140). Es ist weich, zäh und gut dehnbar. Der Abbrand ist jedoch verhältnismäßig stark, ebenso die Neigung zum Oxidieren und die Empfindlichkeit gegen Schwefel. Der dadurch auftretende hohe Kontaktwiderstand erfordert zu seiner Beseitigung eine starke Reibung beim Schaltvorgang, also große Kontaktkräfte.

Verwendung: Kupfer ist der klassische Werkstoff z. B. für Steck-, Schraub- und Wälzkontakte. Bei elektrischen Maschinen wird es für Schleifringe und Kollektoren verwendet. Bei Bimetallkontakten dient es als Träger für Edelmetallkontaktwerkstoffe. Um die Oxidation zu vermeiden, werden Kupferkontakte in Vakuumschaltern, in Öl oder in Schutzgasen (Schwefelhexafluorid SF_6) eingesetzt. Kupferverbundwerkstoffe als Sinter- oder Tränklegerungen, z. B. in Verbindung mit Eisen, Chrom oder Wolfram, haben hohe Abbrandfestigkeit und sind gegen Kontaktverschweißen beständig. Sie werden in Nieder- und Hochspannungsschaltern hoher Schaltleistung eingesetzt.

Legierungen, z. B. mit Zink oder Zinn, werden bevorzugt für Kontakte der Installations- und Relais-technik (Steckkontakte, Klemmkontakte, Federkontakte) verwendet.

Tabelle: Kontaktwerkstoffe (Kupfer und Unedelmetalle)

	Kupfer	Wolfram	Molybdän	Rhenium	Quecksilber
Leitfähigkeit in $\text{m}/(\Omega \cdot \text{mm}^2)$	58	18,2	20	4,6	1,05
Wärmeleitfähigkeit in $\text{W}/(\text{K} \cdot \text{m})$	395	200	147	70	8,05
Schmelztemperatur in $^{\circ}\text{C}$	1085	3400	2625	3170	- 39
Siedetemperatur in $^{\circ}\text{C}$	2500	5900	4800	5600	356
Dichte in kg/dm^3	8,9	19,3	10,2	20,5	13,6
Härte HV	55 bis 100	360	100 bis 200	100 bis 200	-

Kontaktwerkstoff Wolfram (W)

Eigenschaften: Wolfram hat den höchsten Schmelzpunkt aller Metalle (Tabelle). Es ist dadurch beständig gegen Verkleben, Verschweißen und Kontaktabbrand. Die elektrische und thermische Leitfähigkeit ist im Vergleich zu Silber und Kupfer klein. Bei Temperaturen über etwa 500°C , die z. B. bei Schaltlichtbögen auftreten, besteht die Gefahr von Oxidschichtbildung. Den entstehenden Fremdschichtwiderständen muss durch reibende Kontaktgabe und durch hohe Kontaktkräfte entgegengewirkt werden. Wolframkontakte sind sehr hart und spröde, sie werden durch Sintern hergestellt.

Verwendung: Wolframkontakte sind verschleißfest und thermisch hoch belastbar. Sie ermöglichen hohe Schaltspannungen und große Schalthäufigkeit, wobei die Stromstärke durch die geringe Wärmeleitfähigkeit begrenzt ist. Wolframkontakte haben z. B. Kfz-Unterbrecher und Elektroden von Zündkerzen sowie Hochspannungsschalter. Für Niederspannungs- und Hochspannungsschaltgeräte werden in der Regel Legierungen mit Silber und Kupfer verwendet.

Kontaktwerkstoff Molybdän (Mo)

Eigenschaften: Molybdän hat nicht die hohe Schmelztemperatur von Wolfram (Tabelle). Dadurch ist die Abbrandfestigkeit von Molybdänkontakten geringer. Es ist auch weniger hart und spröde als Wolfram und dadurch leichter mechanisch zu bearbeiten. Die Kontakttherstellung erfolgt durch Sintern. Kontakte aus Molybdän neigen weniger zur Oxidation als solche aus Wolfram.

Verwendung: Molybdänkontakte werden verwendet, wo die extreme Wärmebeanspruchung von Wolfram nicht erforderlich ist. Sie werden z. B. bei Hochspannungsschaltern hoher Schaltleistung eingesetzt.

Kontaktwerkstoff Rhenium (Re)

Eigenschaften: Rhenium ist durch seinen hohen Schmelzpunkt (Tabelle) wie Wolfram und Molybdän sehr gut für Kontakte hoher Verschleiß- und Abbrandfestigkeit geeignet. Die geringe Oxidationsneigung verhindert auch bei hohen Temperaturen eine Fremdschichtbildung auf den Kontaktflächen. Rheniumkontakte neigen wenig zum Verkleben und Verschweißen. Die Kontakte stellt man durch Sintern her.

Verwendung: Kontakte mit hoher Schalthäufigkeit und geringer Materialwanderung. Geringe elektrische Leitfähigkeit und kleine Wärmeleitfähigkeit lassen keine hohen Schaltleistungen zu.

Kontaktwerkstoff Quecksilber (Hg)

Eigenschaften: Quecksilber ist das einzige Metall, das bei Raumtemperatur flüssig ist (Tabelle). Es greift außer Eisen und Wolfram die meisten Metalle, auch Edelmetalle, an und legiert mit ihnen zu sog. Amalgamen. Diese Metalle dürfen nicht mit Quecksilber kombiniert werden. Quecksilberkontakte haben geringe, gleich bleibende Übergangswiderstände. Sie sind praktisch verschleißfrei.

Quecksilber, seine Verbindungen sowie Dämpfe sind sehr giftig!

Verwendung: Kontaktflüssigkeit in schutzgasgefüllten Glasröhren (Bild). Filmkontakte benetzen z. B. in Reed-Relais die Zungenkontakte und ermöglichen prellfreies Schalten bei kurzen Schaltzeiten (Alarmanlagen, Fernmeldetechnik). Filmkontakte sind im Gegensatz zu Flüssigkontakten lageunabhängig und erschütterungsunempfindlich.

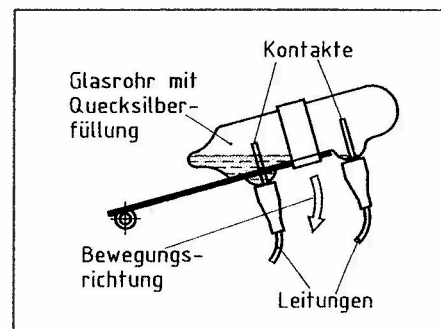


Bild: Quecksilberschalttröhre

6.4.2 Kontaktlegierungen und Sinter-Verbundkontakte

Legierungen und Sinter-Verbundwerkstoffe ermöglichen Werkstoffeigenschaften, die durch Reinelemente nicht oder nur durch sehr teure Werkstoffe erzielt werden.

Angestrebt werden folgende Kontakteigenschaften:

- hohe Temperaturbeständigkeit
- Beständigkeit gegen Abbrand, Verschweißen und Verkleben
- chemische Beständigkeit, z. B. gegen Oxidation
- hohe Kontakthärte
- geringe Fein- und Grobwanderung

Hierbei ist zu beachten, dass durch Legieren die elektrische Leitfähigkeit (**Bild 1**) und die Wärmeleitfähigkeit gegenüber dem Reinelement abnehmen.

Schmelzlegierungen entstehen durch das Lösen von Metallen im geschmolzenen Zustand. Sie werden besonders für Kontakte geringer Schaltleistung verwendet, z. B. bei Relais. Mit Kupfer legierte Silberkontakte haben z. B. eine geringere Feinwanderung und größere Abbrandbeständigkeit als Rein-Silberkontakte (**Tabelle, Seite 151**). Auch die Kontakthärte kann gesteigert werden (**Bild 2**).

Sinter-Verbundwerkstoffe sind pulvermetallurgisch hergestellte Gemische von Metallen, Nichtmetallen und Metalloxiden (**Übersicht**). Die Werkstoffe werden als Pulver vermischt und in Plattenform gepresst. Durch Trennen erfolgt die Formgebung der Kontakte. Der anschließende Sintervorgang gibt durch Diffusion und Zusammenschweißen der Pulverteilchen (Zusammenbacken der Stoffverbindung) die endgültige Festigkeit und Härte des Kontakts.

Verbundwerkstoffe verbinden einen Stoff hoher Abbrandfestigkeit und Härte mit einem solchen hoher elektrischer und thermischer Leitfähigkeit.

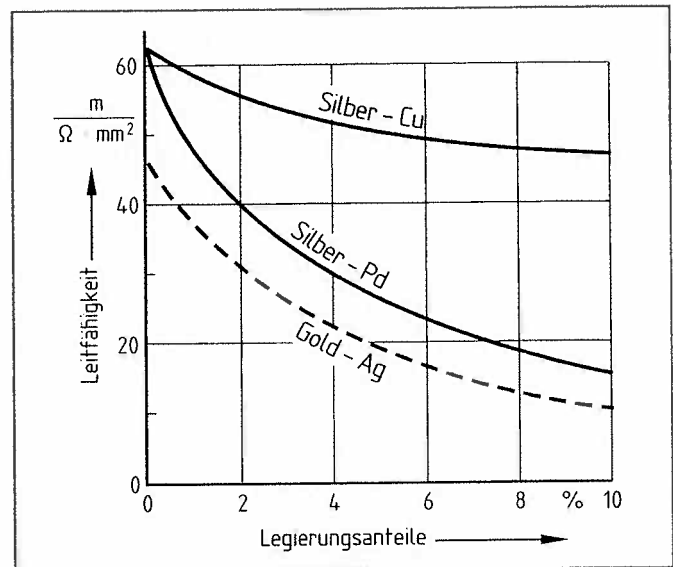


Bild 1: Einfluss von Legierungsanteilen auf die elektrische Leitfähigkeit

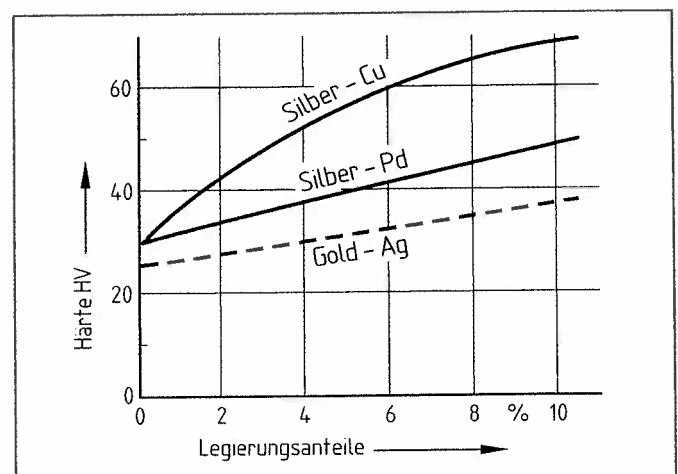
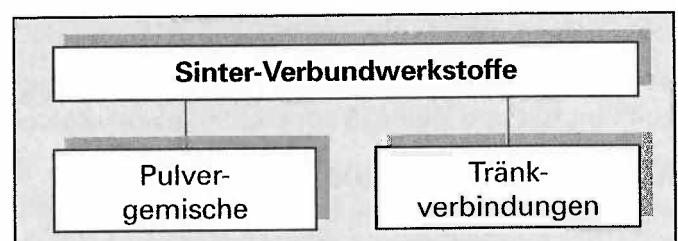


Bild 2: Zunahme der Werkstoffhärte durch Legierungsanteile



Übersicht: Arten von Sinter-Verbundwerkstoffen

Sie werden vor allem für Kontakte der Energietechnik mit hohen Schaltleistungen verwendet. Wolfram-Silber- und Wolfram-Kupfer-Sinter-Verbundwerkstoffe (**Tabelle, Seite 151**) erhalten durch Wolfram ihre hohe thermische Belastbarkeit, z. B. gegen Abbrand, und durch Silber bzw. Kupfer ihre hohe elektrische Belastbarkeit.

Sinter-Tränkverbundwerkstoffe: Diese besondere Art der Sinter-Verbundwerkstoffe besteht aus dem porös gesinterten Grundwerkstoff mit sehr hohem Schmelzpunkt, z. B. Wolfram, der mit einem elektrisch gut leitenden Metall niedrigen Schmelzpunktes, meist geschmolzenem Silber oder Kupfer, getränkt wird. Sinterkontakte ab einem Wolframgehalt von 70 % werden als Tränk-Verbundwerkstoff hergestellt (**Tabelle, Seite 151**). Durch Tränkung hergestellte Verbundwerkstoffe haben durch ihren hohen Schmelzpunkt eine noch höhere thermische Belastbarkeit als durch Zusammenpressen hergestellte Sinter-Verbundwerkstoffe.

Tabelle: Kontaktlegierungen und Kontaktverbundwerkstoffe						
Legierung	Legierungs- anteil in %	Leitfähigkeit in m/Ω · mm ²	Dichte in kg/dm ³	Schmelztem- peratur in °C	Eigenschaften (Beispiele)	Verwendung (Beispiele)
Schmelzlegierungen						
Silber-Kupfer	2...28 % Cu	55...47	10,5...10,0	940...780	herabgesetzte Materialwanderung durch Cu, beständig gegen Verschweißen und Abbrand, lichtbogenbeständig	elektrisch und mechanisch beanspruchte Relaiskontakte
– Hartsilber	2 % Cu + Ni	52	10,5	945		
Silber-Palladium	20...50 % Pd	6,5...3	10,8...11,2	1150...1320	oxidationsbeständig, hart, abbrandfest, verminderte Materialwanderung durch Pd	Messtechnik, Nachrichtentechnik, Subminiaturrelais
Silber-Cadmium	10...20 % Cd	25...19	10,2...10,4	880...920	abbrand- und verschleißfest	Niederspannungsschalter
Gold-Silber	8...20 % Ag	10...11	18,7...16,1	1045...1030	durch Korrosionsbeständigkeit gleich bleibende, sehr kleine Kontaktwiderstände; härter und abbrandfester als Rein-Ag	Schalt-, Steck- und Gleitkontakte für kleine elektr. Last (Feinkontakte, Subminiaturtechnik)
Gold-Nickel	5 % Ni	7	18,2	1010	wie Au-Ag, zusätzlich geringe Feinwanderung	wie Au-Ag, besonders für Gleichströme geeignet
Platin-Iridium	5...30 % Ir	5,5...3	21,5...21,8	1780...1890	korrosionsbeständig, abbrand- und verschleißfest	Mess-, Fernmeldekontakte hoher Schaltfrequenz und Belastung
Sinter-Verbundwerkstoffe						
Wolfram-Silber	10...30 % Ag	20...25	17,5...15,2	960	hart und spröde, hohe Abbrandfestigkeit, Kontaktverschlackung durch Mischoxide	Luftschütze, Hoch- und Niederspannungsschalter
Wolfram-Kupfer	20...30 % Cu	20...25	15,5...13	1050		
Silber-Cadmiumoxid	10 % CdO	43	10,2	960	spröde und korrosionsbeständig, abbrand- und verschleißfest, Cd begünstigt Lichtbogenlöschung	hoch belastete Luftschütze und Relais, Motorschutzschalter
Silber-Nickel	10...30 % Ni	50...40	10,1...9,7	960	geringer Abbrand und geringe Verschweißung, verschleißfest	Schaltstücke für Niederspannungsschalter und Schütze
Silber-Graphit	2,5 % C	48	9,5	960	sehr beständig gegen Verschweißen, erhöhter Kontaktabbrand, spröde	Schaltgeräte geringer Schaltfrequenz und sehr hoher Strombelastung, Schleifkontakte
Sinter-Tränkverbundwerkstoffe						
Wolfram-Silber	10...30 % Ag	20...25	17,5...15,2	3400	Abbrand- und Temperaturbeständigkeit höher als bei W-Ag-Sinterkontakt	Leistungsschalter, Leitungsschutzschalter; wie Sinterverbundwerkstoff
Wolfram-Kupfer	20...30 % Cu	20...25	15,5...13	3400	Abbrand- und Temperaturbeständigkeit höher als bei W-Cu-Sinterkontakt	wie Sinterverbundwerkstoff

6.5 Schichtverbundkontakte

6.5.1 Kontaktbimetalle

Kontaktbimetalle verwenden hochwertiges Edelmetall nur zur Kontaktgabe.

Das Kontaktmaterial wird hierbei in dünnen Schichten auf preisgünstige Trägerwerkstoffe durch Walzplattieren aufgebracht (**Bild 1**). Der Walzdruck vermindert durch Kaltverformung die Banddicke um über 50 %. Die auftretende Verformungswärme ermöglicht hierbei einen intensiven Austausch der Metallatome an den Verbindungsflächen.

Trägerwerkstoffe sind z. B. Kupfer, Stahl oder Aluminium mit ihren Legierungen sowie naturharte Federwerkstoffe. Als Kontaktwerkstoff werden Edelmetalle (Au, Ag, Pd, Pt) und z. B. für Verbindungselemente der Halbleitertechnik Lotschichten (Sn, PbSn-Legierungen) aufgebracht.

Kontaktbimetalle können mit Kontaktschichten von nur wenigen µm Dicke hergestellt werden. Sie werden z. B. als Steckverbindungen, Schalt- und Schleifkontakte für geringe elektrische Belastungen z. B. in der Datentechnik verwendet.

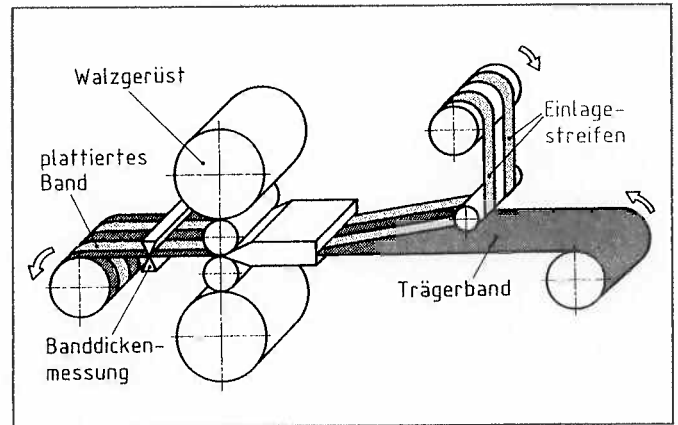


Bild 1: Walzplattierung

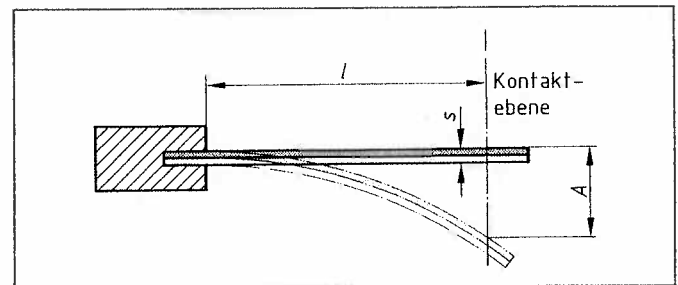


Bild 2: Einseitig eingespannter Thermobimetallstreifen

$$A = \frac{a \cdot l^2 \cdot \Delta\vartheta}{s} \quad \text{bei } A \leq 0,1 l \quad (1)$$

- A Ausbiegung am freien Ende
- a spezifische thermische Ausbiegung
- s Streifendicke
- l aktive Streifenlänge
- $\Delta\vartheta$ Temperaturänderung

6.5.2 Thermobimetalle

Thermobimetalle werden zum temperaturabhängigen, verzögerten Schalten von Stromkreisen verwendet.

Sie werden durch die feste Verbindung zweier etwa gleich dicker Metallstreifen mit unterschiedlicher Wärmedehnung hergestellt. Bei Erwärmung kommt es zu einer kreisförmigen Ausbiegung (**Bild 2**). Als Werkstoff mit großer Wärmedehnung (aktive Komponente) eignen sich Eisenlegierungen mit einem Nickelgehalt von rund 20 %, als Werkstoff kleiner Ausdehnung (passive Komponente) Eisenlegierungen mit etwa 35 bis 45 % Nickelgehalt. Je breiter ein Bimetallstreifen ist, desto stärker ist die Ausbiegungskraft, je länger er ist, desto größer ist die Ausbiegung A (**Formel 1**). Die spezifische thermische Ausbiegung a (**Tabelle, Seite 153**) kann im Anwendungsbereich von etwa -20°C bis $+150^\circ\text{C}$ als proportional zur Temperaturänderung $\Delta\vartheta$ angenommen werden.

Thermobimetalle sind korrosionsanfällig. Sie haben daher meist einen Schutzüberzug aus Cadmium, Zink, Kupfer oder Lack. Durch Verwendung gut leitender Überzugsschichten kann ihre elektrische Leitfähigkeit erhöht werden.

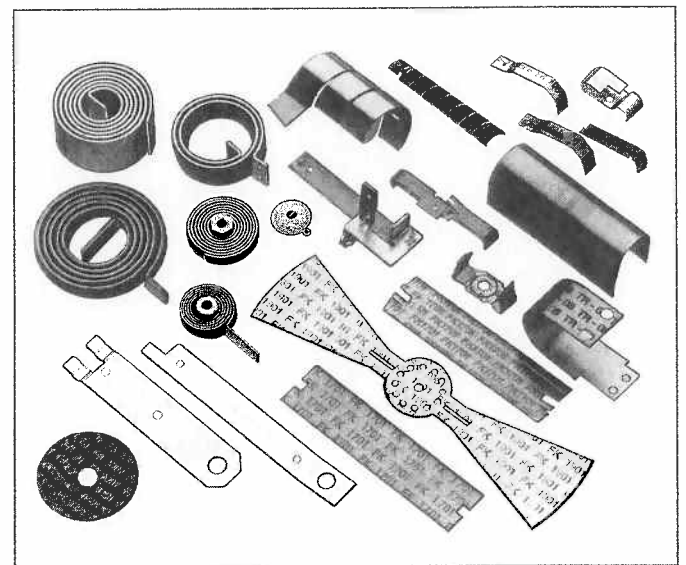


Bild 3: Ausführungsformen von Thermobimetallen

Anwendung: Thermobimetalle können durch den elektrischen Stromdurchfluss direkt erwärmt werden oder indirekt durch eine aufgebrachte Heizwicklung oder die Umgebungswärme, z. B. der Luft. Sie werden als Schaltelemente z. B. in Überstrom-Schutzeinrichtungen, Motorschutzschaltern, Startern für Leuchtstofflampen und Temperaturreglern (z. B. im Bügeleisen) verwendet. Man stellt sie z. B. in Streifenform, als Spiralen oder Wendeln für Drehbewegungen oder als Scheiben mit temperaturabhängiger Wölbung her (**Bild 3, Seite 152**). Das Kurzzeichen eines Thermobimetalls (**Tabelle**) gibt Auskunft über seine spezifische thermische Ausbiegung und den spezifischen elektrischen Widerstand. Das Thermobimetal TB 1577 hat eine Ausbiegung $a = 15,5 \cdot 10^{-6}/K$. Die beiden letzten Ziffern geben das Hundertfache des spezifischen Widerstandes in $\mu\Omega \cdot m$ an, hier ist ρ somit $77/100 \mu\Omega \cdot m$.

Tabelle: Thermobimetalle					Nach DIN 1715	
Kurzzeichen	Bestandteile	Ausbiegung a in $10^{-6}/K$ ($-20^\circ C$ bis etwa $+150^\circ C$)	spezif. Wärmekapazität c in $Ws/g \cdot K$ bei $20^\circ C$	Grenztemperatur in $^\circ C$	spezifischer Widerstand ρ in $\mu\Omega \cdot m$ bei $20^\circ C$	Wärmeleitfähigkeit η in W/Km
TB 20110	MnCuNi	20,8	0,46	350	1,10	6
TB 1577	NiMn20-6	15,5	0,46	450	0,77	13
TB 1577	X 60NiMn 14-7	15,5	0,46	450	0,77	13
TB 1170	NiMn20-6	11,7	0,46	450	0,70	13
TB 1170	X 60NiMn 14-7	11,7	0,46	450	0,70	13
TB 1075	NiCr16-11	10,8	0,46	550	0,75	19
TB 1555	NiMn20-6	15,0	0,46	450	0,55	16
TB 1435	NiMn20-6	14,8	0,46	450	0,35	22
TB 1511	NiMn20-6	15,0	0,44	400	0,11	70
TB 1109	NiMn20-6	11,5	0,46	400	0,09	88

6.6 Kohlehaltige Kontaktwerkstoffe (Elektrokohle)

Elektrokohlen haben bei ausreichender elektrischer Leitfähigkeit sehr gute Gleiteigenschaften. Sie werden daher bevorzugt für Schleifkontakte verwendet, z. B. bei Stromabnehmern elektrischer Bahnen, und zur Herstellung von Kohlebürsten. Kohlekontakte sind verschleißfest und sehr beständig gegen chemische Einflüsse und hohe Temperaturen. Eine Oxidschichtbildung auf der Kontaktfläche tritt nicht ein, weil sich bei Oxidation CO- bzw. CO₂-Gas bildet. Die Verdampfungstemperatur liegt bei $4000^\circ C$.

Arten von Kohlen: Durch unterschiedliche Zusammensetzung und Herstellung werden die Eigenschaften der Kohlearten bestimmt. Sie werden vorwiegend als Kohlebürsten für elektrische Maschinen zur Stromzuführung oder Abnahme über Kollektoren oder Schleifringe verwendet (**Bild**).

Hartkohlen und Weichkohlen werden aus einer Mischung von Kohlepulver bzw. Kohle, Koks und Graphitpulver sowie einem Kunstharz als Bindemittel hergestellt. Das Gemisch wird in Formen gepresst und bei Temperaturen von rund $1000^\circ C$ zu Kohlekeramik gebrannt, wobei das Bindemittel ebenfalls zu Kohlenstoff verkockt.

Hartkohlen erhält man bei Verwendung von Kohle oder Kohlegraphit. Bürsten aus Hartkohle werden vor allem bei Kleinmotoren verwendet, bei denen die Zwischenisolation zwischen den Kollektorlamellen nicht ausgekratzt (vertieft) ist.

Weichkohlen (Graphitkohlen) werden aus Ruß und Naturgraphit hergestellt. Sie zeichnen sich durch besonders gute Gleiteigenschaften aus. Weiche Kohlebürsten werden bevorzugt bei Gleichstrommaschinen eingesetzt.

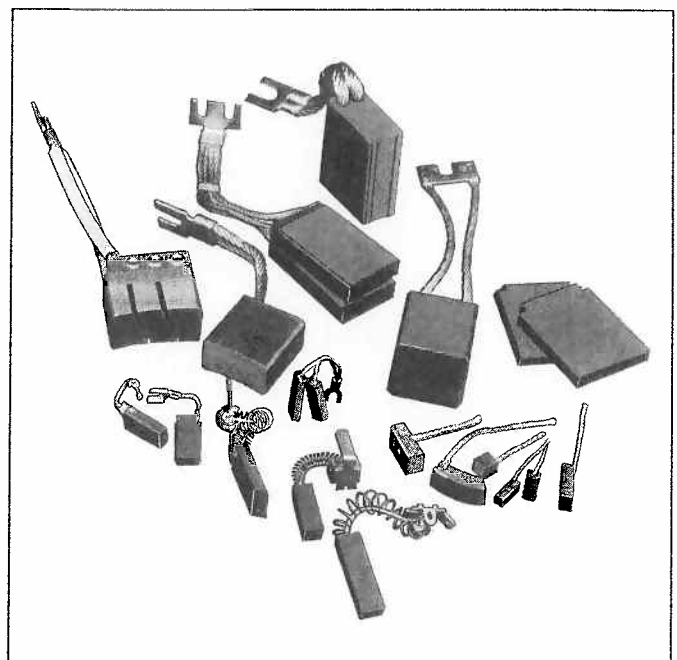


Bild: Kohlebürsten

Elektrographitierte Kohlen (Edelkohlen) entstehen, wenn Hartkohlekörper einem weiteren Glühvorgang im Elektro-Lichtbogenofen bei Temperaturen über 2500 °C unterworfen werden. Hierbei entsteht durch Kristallwachstum ein festes Graphitgefüge, das frei von Verunreinigungen ist. Bürsten aus elektrographitierter Kohle nutzt man für Maschinen mit großen Umfangsgeschwindigkeiten und hoher Leistung.

Metallhaltige Kohlen bestehen aus einer Mischung von Graphit und 20 % bis 80 % Metall, z. B. Kupfer, Bronze, Silber oder Zinn. Durch Sintern verbinden sich die Metallanteile zu einem Metallgerüst und geben dem Verbundwerkstoff seine Festigkeit. Steigender Metallanteil verringert den spezifischen Widerstand und erhöht die Strombelastbarkeit. Metallhaltige Kohlen sind daher besonders für hohe Stromdichten geeignet (**Tabelle**).

Kunstharzgebundene Graphitkohlen (Spezialgraphit) bestehen aus einer Mischung aus Elektrographitpulver und ausgehärteten duroplastischen Kunstharzen. Durch die Kunstharzeinbettung des Graphits wird ein erhöhter spezifischer Widerstand erreicht, der z. B. bei Kommutierungsvorgängen eine Strombegrenzung ermöglicht. Kunstharzgebundene Bürsten werden bei Drehstrom-Kommutatormotoren verwendet.

Anwendungsbeispiele: Neben der Verwendung von Kohlen zur Herstellung von Bürsten und Schleifkontakten, z. B. bei Stelltransformatoren oder als Stromabnehmer elektrischer Bahnen, Förder- und Krananlagen, werden Kohlewerkstoffe in der Elektrotechnik vielfältig genutzt. Als Elektrodenwerkstoff werden sie in Elektrolyseanlagen (elektrochemische Kohle) oder in Lichtbogenöfen (elektrothermische Kohle) verwendet. Kohle ist weiterhin Basismaterial zur Herstellung von Kohleschichtwiderständen und Anodenwerkstoff bei galvanischen Elementen. Wegen der Beständigkeit gegen Oxidation und Materialwanderung werden auch Tastaturkontakte datentechnischer Geräte, z. B. elektronischer Rechner, aus Kohle gefertigt.

Tabelle: Verwendung von Elektrokohle als Kohlebürsten

Kohlensorte	Spezifischer Widerstand ρ in $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$	Zulässige Stromdichte J in A/cm^2	Umfangsgeschwindigkeit v in m/s	Verwendung (Beispiele)
Harte Kohlen	40...60	8	15...30	Kleinmotoren für Gleich- und Wechselstrom, Universalmotoren z. B. in Elektrokleinwerkzeugen und Haushaltsgeräten
Weiche Kohlen (Graphitkohle)	10...60	12	20...50	Maschinen großer Leistung, Schnellläufer (in Verbindung mit Schleifringen aus Stahl)
Elektrographitierte Kohlen (Edelkohlen)	15...50	12	40...80	Gebräuchlichste Bürstenkohle, Kommutatormaschinen großer Leistung, Bahnmotoren, Schweißgeneratoren
Metallhaltige Kohlen	0,1...2	25	20...40	Kleinstmotoren, Maschinen mit hohen Strömen bei kleinen Spannungen, z. B. Lichtmaschinen bei Kraftfahrzeugen

Wiederholungsfragen

- 1 Welche Kontaktarten unterscheidet man nach der Art der Kontaktgabe?
- 2 Welche Anforderungen werden an Kontaktwerkstoffe gestellt?
- 3 Wodurch entstehen Fremdschichtwiderstände und wie werden sie vermieden?
- 4 Warum verschweißen elektrische Kontakte und wodurch kann das Verschweißen vermieden werden?
- 5 Welche Eigenschaften haben die Kontaktwerkstoffe Silber und Gold und wann werden sie eingesetzt?
- 6 Aus welchen Gründen werden Kontaktwerkstoffe legiert?
- 7 Wie werden Sinter-Verbundwerkstoffe hergestellt?
- 8 Welche Eigenschaften haben Wolfram-Silber-Legierungskontakte?
- 9 Wie werden Kontakte aus Schichtverbundwerkstoffen hergestellt?
- 10 Nennen Sie von Thermobimetall-Kontakten a) die Eigenschaften und b) Anwendungen.
- 11 Welche Arten von Elektrokohlen werden unterschieden?