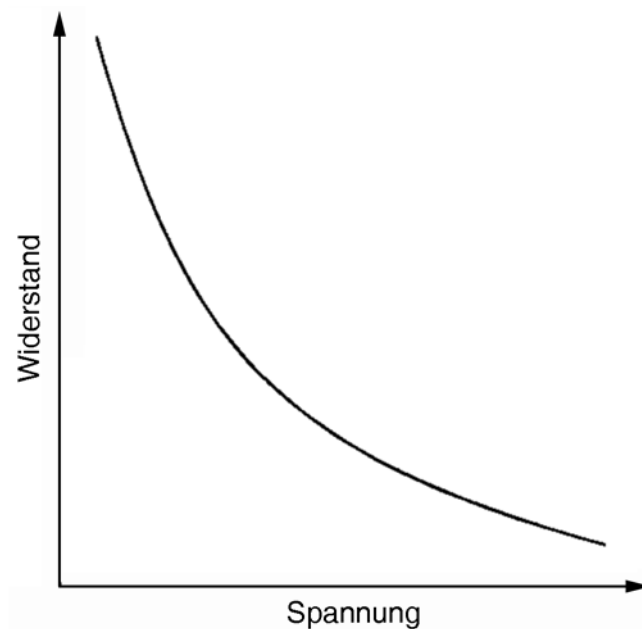


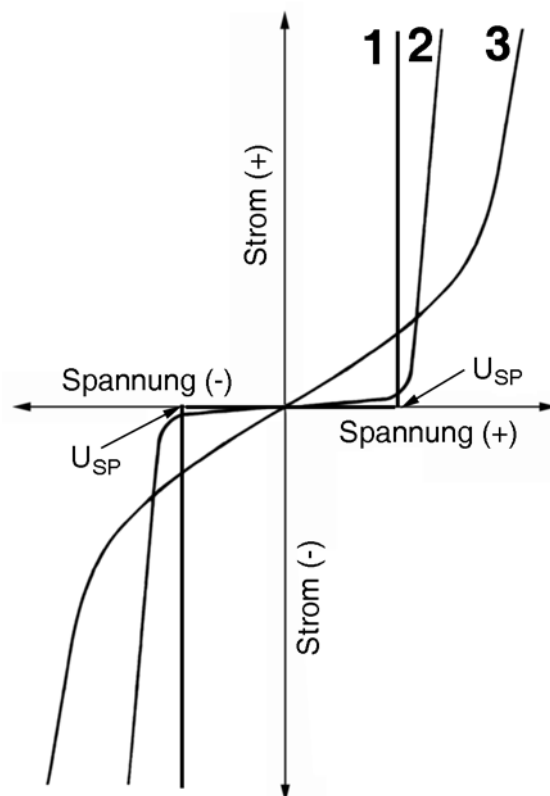
## 1.6 Spannungsabhängige Widerstände (Varistoren, VDRs)

### 1.6.1 Grundlagen

Varistoren sind Widerstandsbauelemente, deren Widerstandswert von der anliegenden Spannung abhängt (VDR = Voltage Dependent Resistor). Ihr Widerstand sinkt mit zunehmender Spannung (Abb. 1.116). Die Strom-Spannungs-Kennlinie hat einen nichtlinearen Verlauf. Er ähnelt dem einer Halbleiterdiode, die in Durchlaßrichtung betrieben wird, ist aber symmetrisch. Er kommt einem Verlauf nahe, der für Aufgaben der Spannungsbegrenzung und -stabilisierung ideal wäre – von 0 V bis zu einem bestimmten Spannungswert (Schutzpegel, Ansprechspannung) ein unendlich hoher Widerstand und von da an Widerstandswert Null, so daß sich die Spannung nicht ändert, gleichgültig wie hoch die Belastung ist (Abb. 1.117). Bei niedriger Spannung hat der Varistor einen sehr hohen Widerstand, so daß nur ein vergleichsweise schwacher Strom fließt. Mit zunehmender Spannung sinkt der Widerstand immer weiter ab. Diese Abhängigkeit hat einen näherungsweise exponentiellen Verlauf. Die Hersteller sind bestrebt, der Strom-Spannungs-Kennlinie eine Krümmung zu geben, die einem scharfen Knick nahekommt. Im Bereich von 0 V bis zu einem den jeweiligen Typ kennzeichnenden Spannungswert (als Schutzpegel, Ansprechspannung oder Knickspannung bezeichnet) fließt nur ein sehr geringer Reststrom. Nähert sich die Spannung dem Schutzpegel, so fällt der Widerstand auf so geringe Werte ab, daß der Strom nahezu ungehindert fließen kann (steiler Anstieg des Kennlinienverlaufs).

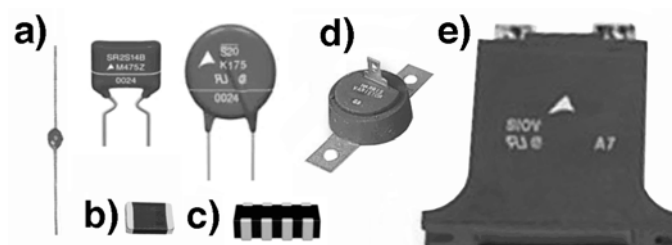


**Abb. 1.116** Varistor. Der Widerstand in Abhängigkeit von der Spannung. Es kommt nur auf den Betrag der Spannung an; die Polarität spielt keine Rolle.



**Abb. 1.117** Typische Verläufe der Strom-Spannungs-Kennlinie. 1 - der für die hauptsächlichen Anwendungen gewünschte ideale Verlauf; 2 - Metalloxidvaristor; 3 - Siliziumkarbidvaristor;  $U_{SP}$  - Schutzpegel oder Ansprechspannung.

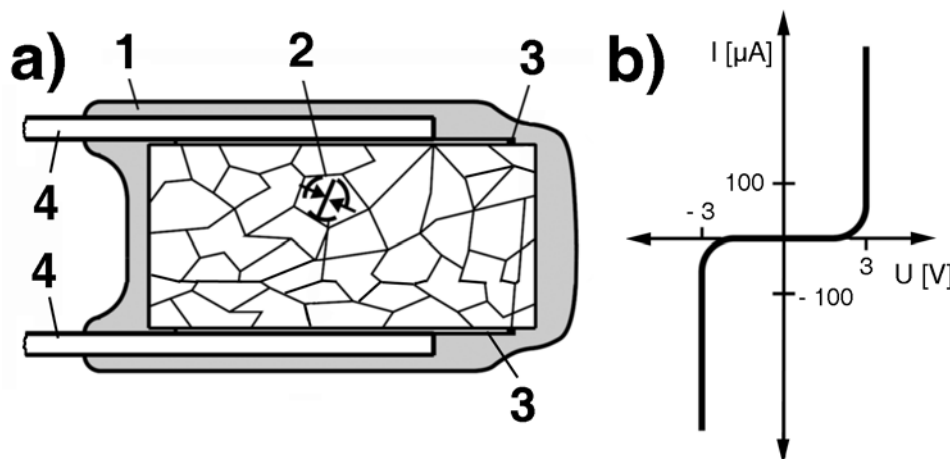
Varistoren sind mit Sinterverfahren gefertigte keramische Volumenwiderstände. Dem Ausgangswerkstoff nach unterscheidet man Siliziumkarbidvaristoren und Metalloxidvaristoren (MOVs). Siliziumkarbidvaristoren weichen offensichtlich (vgl. Abb. 1.117) viel stärker vom idealen Kennlinienverlauf ab als Metalloxidvaristoren. Moderne Bauelemente sind zumeist Metalloxidvaristoren auf Grundlage von Zinkoxid (ZnO). Abb. 1.118 zeigt einige typische Bauformen.



**Abb. 1.118** Typische Bauformen (Auswahl). a) mit Drahtanschlüssen; b) SMD; c) SMD-Merfachanordnung (Varistor-Array); d) mit Schraub- und Steckanschlüssen; e) Blockvaristor.

### Aufbau und Wirkungsweise

An den Berührungspunkten der Körner des Basismaterials ergeben sich Halbleiterübergänge, die – im Kleinen – die charakteristische Strom-Spannungs-Kennlinie aufweisen (Abb. 1.119). Diese sog. Mikrovaristoren haben eine Ansprechspannung von ca. 3...3,5 V. Die Gesamtwirkung des Bauelements ergibt sich aus dem Verbund dieser Mikrovaristoren, die durch den Sinterprozeß sowohl parallel als auch in Reihe geschaltet werden. Je dicker das Bauelement, desto mehr Mikrovaristoren liegen in Reihe, desto größer ist die Ansprechspannung. Je größer die Fläche, desto mehr Mikrovaristoren sind parallelgeschaltet, desto größer ist die Strombelastbarkeit. Je größer das Volumen, desto mehr Mikrovaristoren sind vorhanden, desto mehr Energie kann das Bauelement absorbieren. Weil die Funktion im ganzen Volumen des Bauelements erbracht wird – und nicht, wie beispielsweise bei Halbleiterdioden, nur in einer dünnen Sperrschicht –, sind Varistoren in der Lage, hohe Überlastungen auszuhalten.



**Abb. 1.119** Zu Aufbau und Wirkungsweise des Varistors (nach [1.36]). a) Querschnitt; b) Kennlinie eines Mikrovaristors (an den Berührungspunkten der Körner). 1 - Umhüllung; 2 - Körner, die sich untereinander berühren; 3 - Elektroden; 4 - Anschlüsse.

### Vielschichtvaristoren

Vielschichtvaristoren (Multilayer Varistors; MLVs) sind Metalloxidvaristoren in SMD-Ausführung. Aufgrund ihrer Bauart haben sie folgende Vorteile:

- geringe Zuleitungsinduktivität,
- niedriger Serienwiderstand,
- geringe Ansprechzeit (typischerweise unter 1 ns).

Die Betriebsspannungswerte reichen von wenigen V bis zu etwa 60 V (Richtwert). Solche kleinen Bauelemente können offensichtlich weniger Energie absorbieren als Typen in Scheiben- oder Blockform. Sie halten aber tausende Impulse gemäß ihrer Stoßstromspezifikation aus, ohne daß sich ihre Kennwerte verschlechtern.

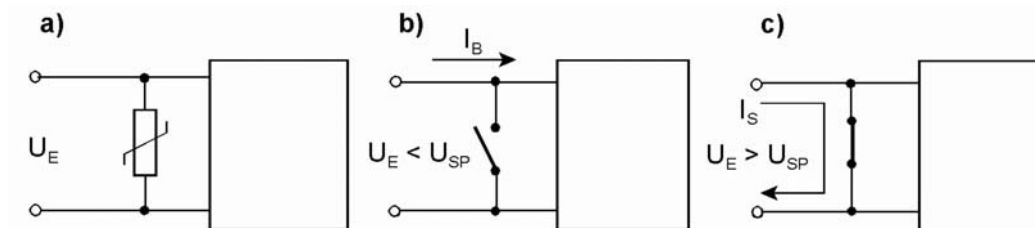
Anwendung: vor allem zum Überspannungsschutz von Transistoren und integrierten Schaltkreisen. Da sie sich (im Leckstrombereich) wie Kondensatoren verhalten, können sie zudem Glättungs- und Filterfunktionen übernehmen. Spezielle Typen weisen eigens ein definiertes Kondensatorverhalten auf.

### Anwendungen

Der bei weitem wichtigste Anwendungsbereich ist der Überspannungsschutz. Hierzu wird der Varistor der zu schützenden Einrichtung parallelgeschaltet (Abb. 1.120). Das ideale Verhalten:

- ist die anliegende Spannung kleiner als der Schutzpegel, so hat der Varistor einen unendlich großen Widerstand; es geschieht also gar nichts (offener Schalter),
- erreicht die anliegende Spannung den Schutzpegel, so wechselt der Widerstand des Varistors von Unendlich auf Null, so daß die Überspannung praktisch kurzgeschlossen wird (geschlossener Schalter).

Die Hersteller bemühen sich, diesem Ideal so nahe wie möglich zu kommen. Moderne Bauelemente werden auf diesen Einsatzfall hin optimiert.

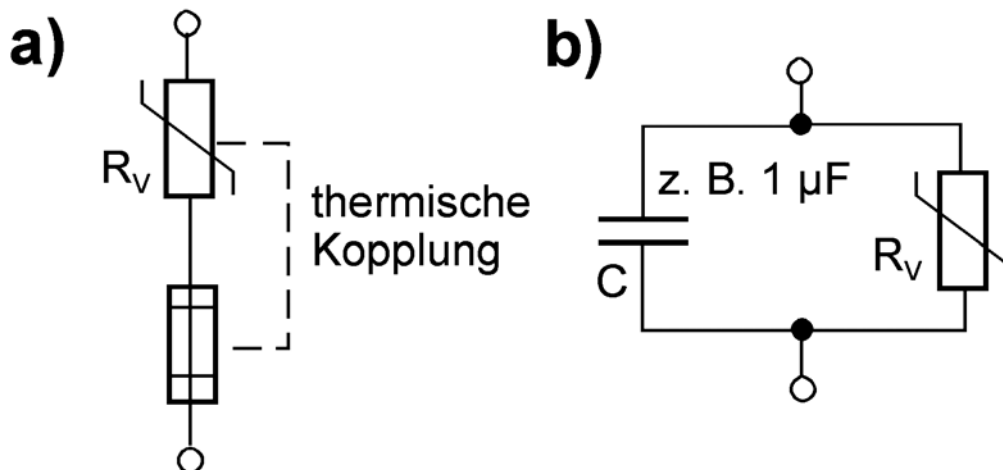


**Abb. 1.120** Überspannungsschutz mit Varistor. a) Grundschialtung; b) idealisierte Ersatzschaltung für Spannung unterhalb des Schutzpegels; c) idealisierte Ersatzschaltung für Spannung im Bereich des Schutzpegels (Überspannung).  $I_B$  - Betriebsstrom;  $I_S$  - Spitzenstrom.

Varistoren können überall dort eingesetzt werden, wo Spannungsspitzen zu kappen und Spannungspegel zu begrenzen sind (Funkenlöschung, Unterdrückung von Abschaltspannungsspitzen beim Schalten induktiver Lasten usw.). Zudem kann man den Kennlinienverlauf der Varistoren zur Spannungsstabilisierung und zu diversen Spezial- und Tricklösungen ausnutzen.

### Kombinationsbauelemente

Um die Vielzahl der heutigen Vorschriften zu erfüllen, werden an nahezu allen extern zugänglichen Schnittstellen Schutzbauelemente benötigt. Mit einer einzigen Bauelementart sind aber nicht alle Schutzbedürfnisse zu erfüllen. Es sind also oftmals Kombinationslösungen erforderlich. Manche Kombinationen werden als komplette Bauelemente angeboten (Abb. 1.121).

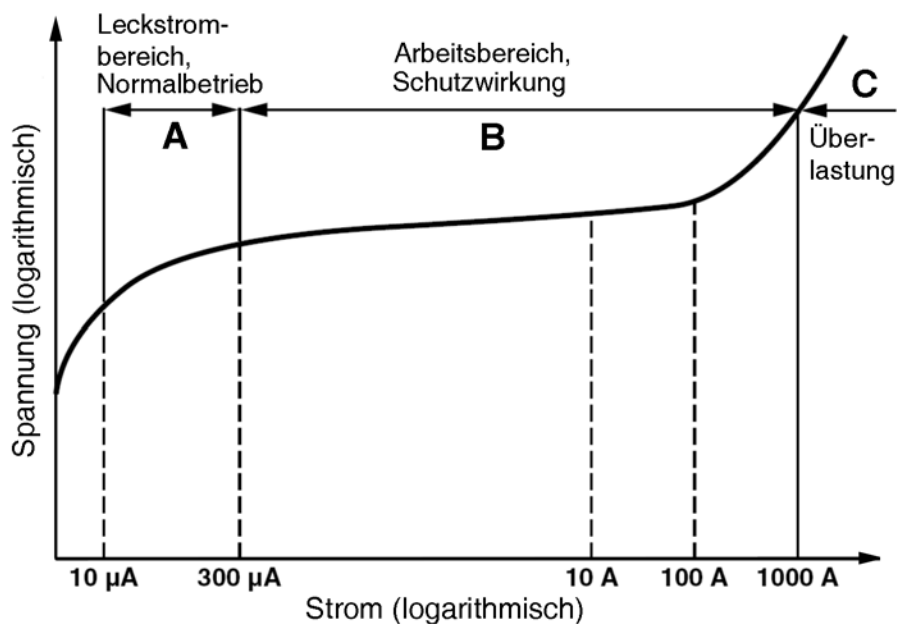


**Abb. 1.121** Kombinationselemente mit Varistoren (Beispiele). a) Varistor mit Schmelzsicherung (spricht an, wenn die Überlastung zu lange dauert); b) Varistor + Kondensator (Überspannungsschutz und Filterwirkung).

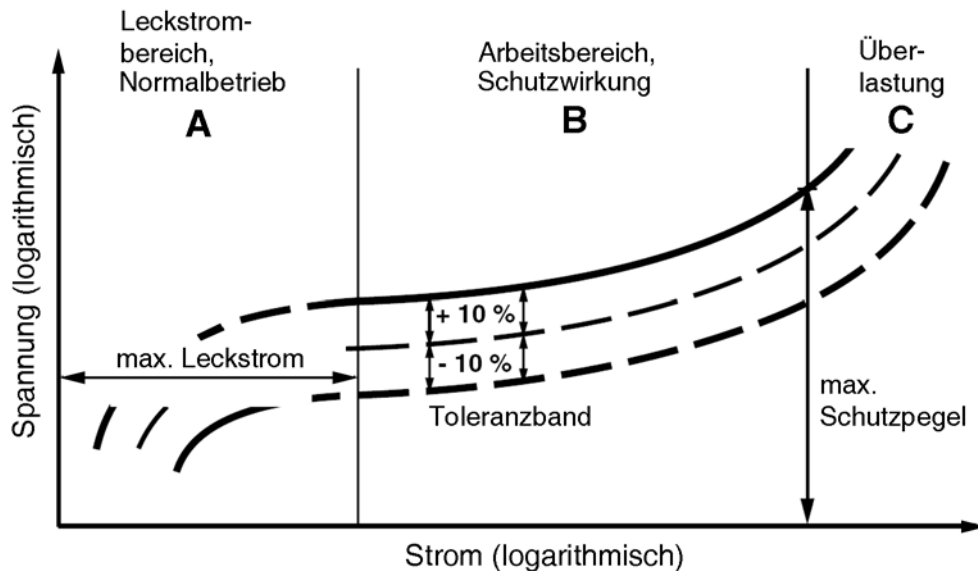
### Die Spannungs-Strom-Kennlinie

Obwohl manche Darstellungen dies nahelegen, hat die Strom-Spannungs-Kennlinie keinen Knick, sondern einen stetigen Verlauf. Um Varistoren auswählen und einsetzen zu können, ist es wichtig, den Übergang zwischen den deutlich erkennbaren Bereichen hoher und niedriger Widerstandswerte genauer zu betrachten. Hierzu muß die Strom-Achse mit höherer Auflösung dargestellt werden. Eine besonders anschauliche Darstellung ergibt sich, wenn man den Spannungsverlauf in Abhängigkeit vom Strom angibt (Spannungs-Strom-Kennlinie; Abb. 1.122 bis 1.124\*).

\*: Prinzip: Die Kennlinie gemäß Abb. 1.117 wird um  $90^\circ$  gedreht und um die waagerechte Achse gespiegelt. Zudem wird nur der erste Quadrant dargestellt.



**Abb. 1.122** Die Spannungs-Strom-Kennlinie eines Varistors (1). Überblick über den Kennlinienverlauf (nach [1.36]). A, B, C sind typische Bezeichnungen für die drei anwendungspraktisch wichtigen Abschnitte des Kennlinienverlaufs.



**Abb. 1.123** Die Spannungs-Strom-Kennlinie eines Varistors (2). Toleranzen und Kennwerte (nach [1.36]).

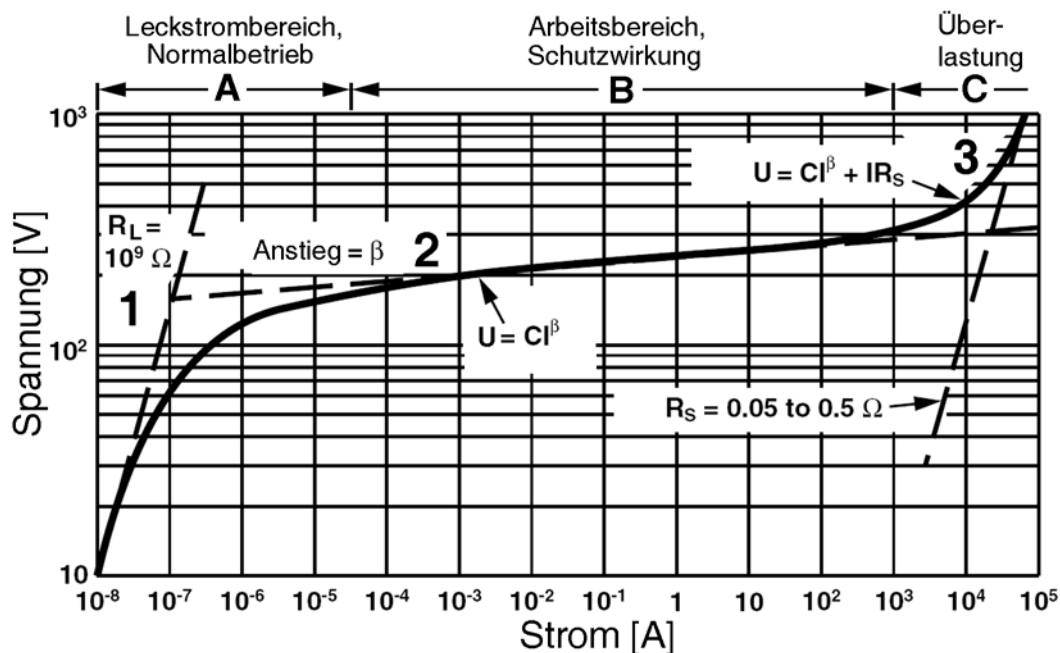
Im Kennlinienverlauf lassen sich drei Bereiche erkennen:

- **Leckstrombereich.** Beim Überspannungsschutz ist dies der Normalbetrieb (es liegt keine Überspannung an). Hierbei sollte so wenig Strom wie möglich fließen (Richtwert: einige zehn bis einige hundert  $\mu\text{A}$ ). Die Breite dieses Bereichs wird durch den maximalen Leckstrom bestimmt. Anfängliche Widerstandswerte (bei kleinen Spannungen):  $\text{M}\Omega\text{...G}\Omega$ .
- **Arbeitsbereich.** Beim Überspannungsschutz ist dies der Ernstfall. Es liegt Überspannung an, und das Bauelement erbringt seine Schutzwirkung – es wird niederohmig, wodurch die Quelle der Überspannung so stark belastet wird, daß die Spannung nicht über den Bereich des Schutzpegels ansteigen kann. Der niedrige Widerstand des Varistors hat einen entsprechenden Stromfluß zur Folge. Wenn die Stromstärke wächst, erhöht sich die Spannung nur wenig. Das Ende des Bereichs wird durch den maximalen Schutzpegel und den zugehörigen Stoßstrom bestimmt. Im Bereich der höheren Stromstärken darf der Varistor typischerweise nicht dauernd, sondern nur kurzzeitig betrieben werden (Impulsbelastung).
- **Überlastung.** Übersteigt die anliegende Spannung den maximalen Schutzpegel, kann das Bauelement zerstört werden. Richtwert für die Grenze zwischen Betriebsfähigkeit und Zerstörung ist der maximale Stoßstrom – ein Stromstoß, den das Bauelement ein einziges Mal in seinem Leben aushalten muß.

Im Arbeitsbereich (Bereich der Schutzwirkung) kann der Zusammenhang zwischen Strom und Spannung näherungsweise durch einfache Exponentialfunktionen beschrieben werden. Jede solche Funktion ist durch eine sog. Varistorkonstante ( $K$  oder  $C$ ) und einen nicht ganzzahligen Exponenten ( $\alpha$  oder  $\beta$ ) gekennzeichnet. Die Varistorkonstante ist für das jeweilige Bauelement typisch; der Exponent hängt von den Materialeigenschaften ab. Richtwerte:

- Siliziumkarbid:  $\alpha = 2 \dots 10$ ;  $\beta = 0,1 \dots 0,5$ ,
- Zinkoxid:  $\alpha = 20 \dots 40$ ;  $\beta = 0,025 \dots 0,05$ .

Es ergeben sich zwei Funktionen. Die eine beschreibt den Strom in Abhängigkeit von der Spannung, die andere die Spannung in Abhängigkeit vom Strom (Tabelle 1.21). Der Exponent gibt den Anstieg der jeweiligen Kennlinie an. Er kann aus zwei Wertepaaren von Strom und Spannung errechnet werden ((1.129), (1.136)). Richtwerte:  $I_1 = 1 \text{ mA}$ ,  $I_2 = 1 \text{ A}$ ;  $U_1$  und  $U_2$  sind zu messen oder aus der Kennlinie abzulesen.



- Spannung im Leckstrombereich  $\approx R_L \cdot I$  (stark temperaturabhängig),
- Spannung im Arbeitsbereich  $\approx C \cdot I^\beta$ ,
- Spannung bei Überlastung  $\approx C \cdot I^\beta + I \cdot R_S$ .

**Abb. 1.124** Die Spannungs-Strom-Kennlinie eines Varistors (3). Praxisbeispiel (nach [1.36]). 1 - anfänglicher Leckwiderstand  $R_L$  als Tangente an Kurve; 2 - Anstieg der Tangente = Exponent  $\beta$ ; 3 - Widerstand im Überlastungsfall  $R_S$  als Tangente an Kurve.

### **Maximal zulässige Betriebsspannung**

Die maximal zulässige Betriebsspannung (Operating Voltage, Maximum Continuous Voltage) ist die höchste Spannung, die ständig über dem Varistor abfallen darf. Die Angabe betrifft den Leckstrombereich bzw. – beim Überspannungsschutz – den Normalbetrieb. Wenn diese Spannung anliegt, ist der Strom noch vernachlässigbar (Leckstrom). Mit anderen Worten: Die Betriebsspannung ist die höchste Dauerspannung, die nicht als Überspannung gilt. Es ist der typische Kennwert, mit dem das Ausschuchen eines Varistors beginnt. Höhere Spannungspegel (Überspannungen) sollten nicht ständig, sondern nur kurzzeitig anliegen (Spannungsspitzen). Viele Datenblätter enthalten Werte für Gleichspannung ( $V_{DC}$ ) und Wechselspannung ( $V_{RMS}$  oder  $V_{AC}$ ).

Faustregel (wenn nur einer der Werte angegeben ist): Gleichspannungswert = Spitzenwert der Wechselspannung  $\cdot 0,7$ .

### **Varistorspannung**

Die Varistorspannung (Varistor Voltage  $V_V$ ) ist die Spannung, die über dem Varistor abfällt, wenn ein Strom von 1 mA hindurchfließt. Es ist ein pauschaler Kennwert zum Vergleichen und Ausschuchen von Varistoren. Wegen des – verglichen mit typischen Leckströmen – vergleichsweise starken Stromes ist die Varistorspannung höher als die Betriebsspannung.

*Hinweis:* Bei einschlägigen Messungen sollte der Strom (1 mA) nur kurze Zeit fließen, damit sich der Varistor nicht zu sehr erwärmt. Richtwerte: 0,2 .. 2 s; typisch 1 s.

### **Toleranz**

Die Toleranzangaben betreffen typischerweise die Varistorspannung  $V_V$  bei einer Umgebungstemperatur von + 25 °C. Richtwerte +10...+20 %.

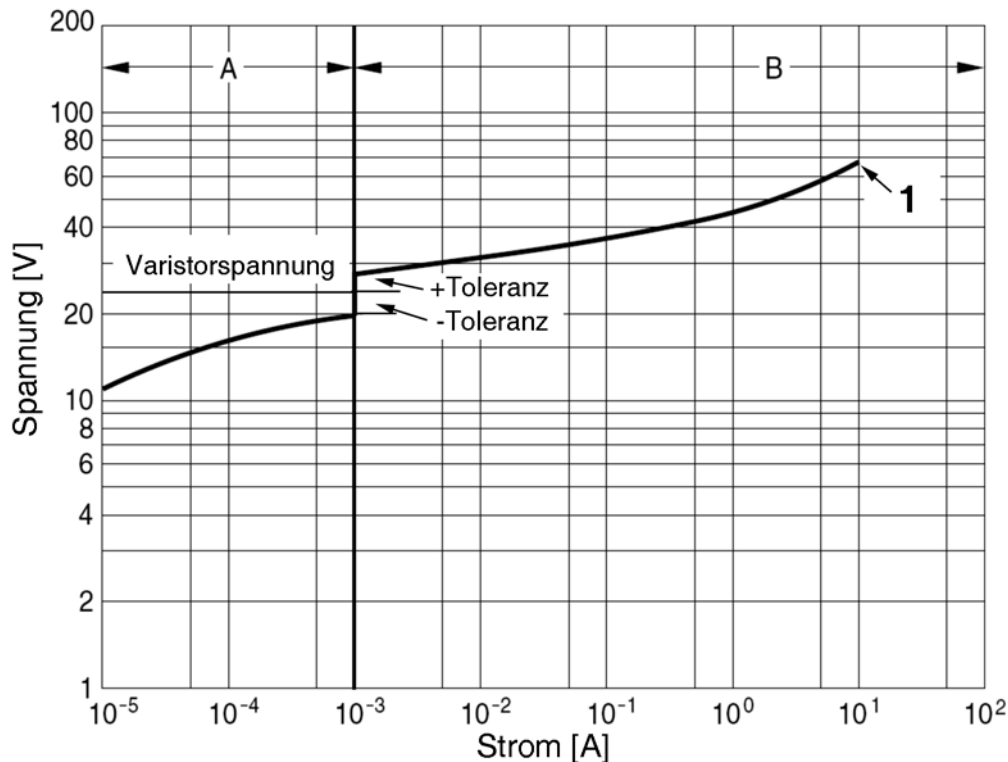
#### *Das Toleranzband*

Über die gesamte Spannungs-Strom-Kennlinie hinweg ist mit Abweichungen vom idealen Verlauf zu rechnen. Der ideale Kennlinienverlauf ist somit von einem Toleranzband umgeben. Die Breite des Toleranzbandes ist typischerweise nicht überall gleich. In der Anwendungspraxis sind nur die besonders ungünstigen Fälle von Bedeutung:

- im Leckstrombereich soll der Widerstand hoch sein. Der ungünstigste Fall ist gegeben, wenn der Widerstandswert an der unteren Toleranzgrenze liegt, wenn also bei der jeweiligen Betriebsspannung der stärkste Leckstrom fließt. Deshalb genügt es, die untere Grenze des Toleranzbandes anzugeben.
- im Arbeitsbereich soll der Widerstand gering sein. Der ungünstigste Fall ist gegeben, wenn der Widerstandswert an der oberen Toleranzgrenze liegt, wenn also bei Durchfließen eines Stromstoßes (beim Ableiten von Überspannungen) der höchste Spannungsabfall auftritt. Deshalb genügt es, die obere Grenze des Toleranzbandes anzugeben.



Die Grenze zwischen beiden Bereichen zieht man typischerweise bei einem Strom von 1 mA (Abb. 1.125). Das ist ein pauschaler Standard-Wert, der lediglich festgesetzt wurde, um eine einheitliche Grundlage zum Vergleichen und Aussuchen von Bauelementen zu haben.



**Abb. 1.125** Aus dem Datenmaterial: die Spannungs-Strom-Kennlinie eines Varistors (nach [1.37]). 1 - Ablesebeispiel für den maximalen Schutzpegel (s. Text).

### Schutzpegel (Ansprechspannung)

Jeder Spannungsabfall bei Strömen über 1 mA gilt als Ansprechspannung oder Schutzpegel (Protection Level). Der maximale Schutzpegel (Maximum Clamping Voltage) ist die höchste Spannung, die über dem Varistor abfallen darf, wenn er mit einem Standard-Prüfimpuls  $8/20 \mu\text{s}$  belastet wird. Die Spannungs-Strom-Kennlinie gibt den jeweiligen maximalen Schutzpegel in Abhängigkeit vom durchfließenden Impulsstrom an. Die Höchstwerte sind an der rechten Grenze des Arbeitsbereichs (B) zu finden. Ablesebeispiel (vgl. Abb. 1.125): ca. 70 V bei einem Impulsstrom von 10 A.

### Maximaler Leckstrom

Der maximale Leckstrom (Maximum Leakage Current) ist der Strom, der höchstens durch den Varistor fließen darf, wenn die maximal zulässige Betriebsspannung anliegt. Richtwert: 1...100 nA.

### Maximaler Stoßstrom (Ableitvermögen)

Beim Ableiten von Überspannungsspitzen muß der Varistor Stromstöße aushalten. Dieses Vermögen wird typischerweise durch Angabe der Stärke eines Stromstoßes gekennzeichnet,

den das Bauelement einmal in seinem Leben aushalten muß (Maximum Non-Repetitive Surge Current). Noch stärkere Ströme können zur Zerstörung führen. Geprüft wird mit einem Standard-Prüfimpuls 8/20  $\mu$ s). Der Varistor hat den Stromstoß erfolgreich überlebt, wenn die Varistorspannung (bei 1 mA) nach dem Prüfimpuls nicht mehr als  $\pm 10\%$  von der vorher gemessenen abweicht.

### **Überspannungsschutz**

Der Überspannungsschutz betrifft zum einen Schnittstellen zur Außenwelt und zum anderen Schaltungen im Innern, die vor übermäßigen Spannungsspitzen zu schützen sind. Entsprechende Schutzbauelemente tun praktisch nichts, falls die anliegende Spannung im jeweils zulässigen Bereich bleibt. Falls aber die Spannung zu hoch ansteigt, schalten sie einen Stromweg und führen somit eine Belastung der Spannungsquelle herbei, die so hoch ist, daß der Spannungspegel in zulässigen Grenzen bleibt. Hierzu können verschiedene physikalisch Effekte ausgenutzt werden (neben dem Varistoreffekt u. a. Durchbrucheffekte in Halbleitern und die Gasentladung). An den Schnittstellen zur Außenwelt sind einschlägigen Vorschriften zu erfüllen, im Innern sind die Schutzaufgaben gezielt mit jeweils angemessenem Aufwand zu lösen. Hierzu stehen verschiedenartige Bauelemente (z. B. Varistoren, Suppressordioden und Gasentladungsableiter) zur Verfügung. Oft müssen mehrere Bauelemente im Verbund eingesetzt werden, um die geforderte Schutzwirkung zu erbringen. Der Aufwand hängt davon ab, wogegen man die Schaltung schützen will. So ist es offensichtlich, daß die einfache Lösung von Abb. 1.120 zwar gegen sehr kurze (Mikrosekunden) Spannungsspitzen helfen kann, daß sie aber ein Problem hat, wenn die Überspannung längere Zeit anliegt (Beispiel: Schutz eines Meß- oder Telekommunikationsgerätes gegen irrtümliches Anschließen an die Netzwechselspannung).