

10.8.5.1 Dioden

Um Signale nichtlinear verzerren zu können, ist mindestens *ein* nichtlineares Bauteil erforderlich. Dies kann eine Röhre, ein Transistor, oder – im einfachsten Fall – eine Halbleiterdiode sein. Wenn im Folgenden von Dioden die Rede ist, sind immer **Halbleiterdioden** gemeint, nicht Röhrendioden (die natürlich auch zum Verzerren geeignet wären, aber praktisch nie zum Einsatz kommen). Vereinfacht betrachtet leiten Dioden Strom nur bei Betrieb in Flussrichtung; polt man um, sperrt die Diode (Sperrbetrieb). Genauere Modelle berücksichtigen, dass in Flussrichtung an der Diode einige 100 mV abfallen, sowie den auch im Sperrbetrieb fließenden Sperrstrom. Dynamische Modelle fügen (u.U. nichtlineare) Kapazitäten hinzu, sodass ein Dioden-Ersatzschaltbild schon ziemlich kompliziert werden kann. Im ersten Ansatz reicht zunächst die sog. Shockley-Kennlinie:

$$I = I_S \cdot (\exp(U/U_T) - 1); \quad U_T = 25.8 \text{ mV (300 K)} \quad \text{Shockley-Gleichung}$$

Der Diodenstrom I wächst exponentiell über der Dioden-Flussspannung U , die auf die Temperaturspannung U_T bezogen wird; I_S ist ein theoretischer Sperrstrom. Reale Dioden weichen von dieser Idealisierung u.U. erheblich ab, weswegen Korrekturen und Ergänzungen nötig sind. Vor allem muss die Temperaturspannung modifiziert werden: Bei der realen Diode misst man für U_T Werte bis über 60 mV, außerdem ist in Flussrichtung ein Bahnwiderstand zu berücksichtigen. In **Abb. 10.8.25** ist im linken Bild die Durchlasskennlinie einer 1N4148 im linearen Maßstab dargestellt, das mittlere Bild zeigt dieselbe Kennlinie halblogarithmisch. Die e -Funktion bewirkt bei der linearen Skalierung eine starke Kennlinienkrümmung, was zu dem Begriff "Schwellenspannung" geführt hat – bei Siliziumdioden gerne mit 0.7 V angegeben. Skaliert man das Bild für große Ströme, zeigt sich der verrundete Knick tatsächlich bei ca. 0.7 V, stellt man aber kleinere Ströme dar (im Bild die durchgezogene Kurve), verschiebt er sich zu ca. 0.4 V (oder zu noch kleineren Werten). Deshalb: Eine e -Funktion hat keinen Knick, der Wert der Schwellenspannung ist willkürlich!

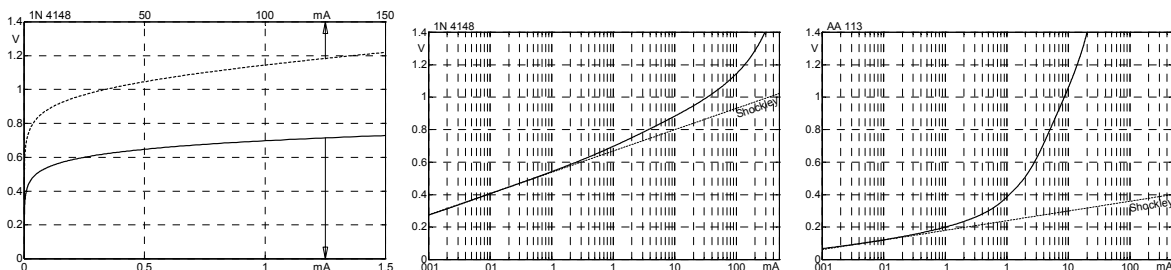


Abb. 10.8.25: Durchlasskennlinie einer 1N4148 (ITT-Datenblatt). Zu der im linken Bild gestrichelt gezeichneten Kurve gehört die obere Abszissenskalierung, zur durchgezeichneten Kurve die untere. Rechts: AA113 (Siemens).

Das rechte Bild stellt die Durchlasskennlinie einer Germanium-Spitzendiode (AA113) dar. Im Gegensatz zur 1N4148, die eine Siliziumdiode ist, fallen in Flussrichtung bei kleinen Strömen an der Ge-Diode kleinere Spannungen ab. Über 6 mA ist jedoch die Spannung der Ge-Diode größer als die der Si-Diode, weil sich die Bahnwiderstände stärker bemerkbar machen.

Bei all diesen Kennlinien muss bedacht werden, dass sie herstellungs- und temperaturbedingt streuen. Eine Temperaturerhöhung um 20°C kann den Flussstrom durchaus verdoppeln, und beim Auswechseln der Diode gegen eine typgleiche (!) andere kann sich der bei einer Spannung fließende Strom um $-70/+200\%$ ändern. Deshalb: Datenblätter nicht auf dreistellige Genauigkeit ausmessen!

Abb. 10.8.26 zeigt weitere (aus Datenblättern stammende) Durchlasskurven. Alle mit AA gekennzeichneten Dioden sind Ge-Dioden, alle anderen sind Si-Dioden.

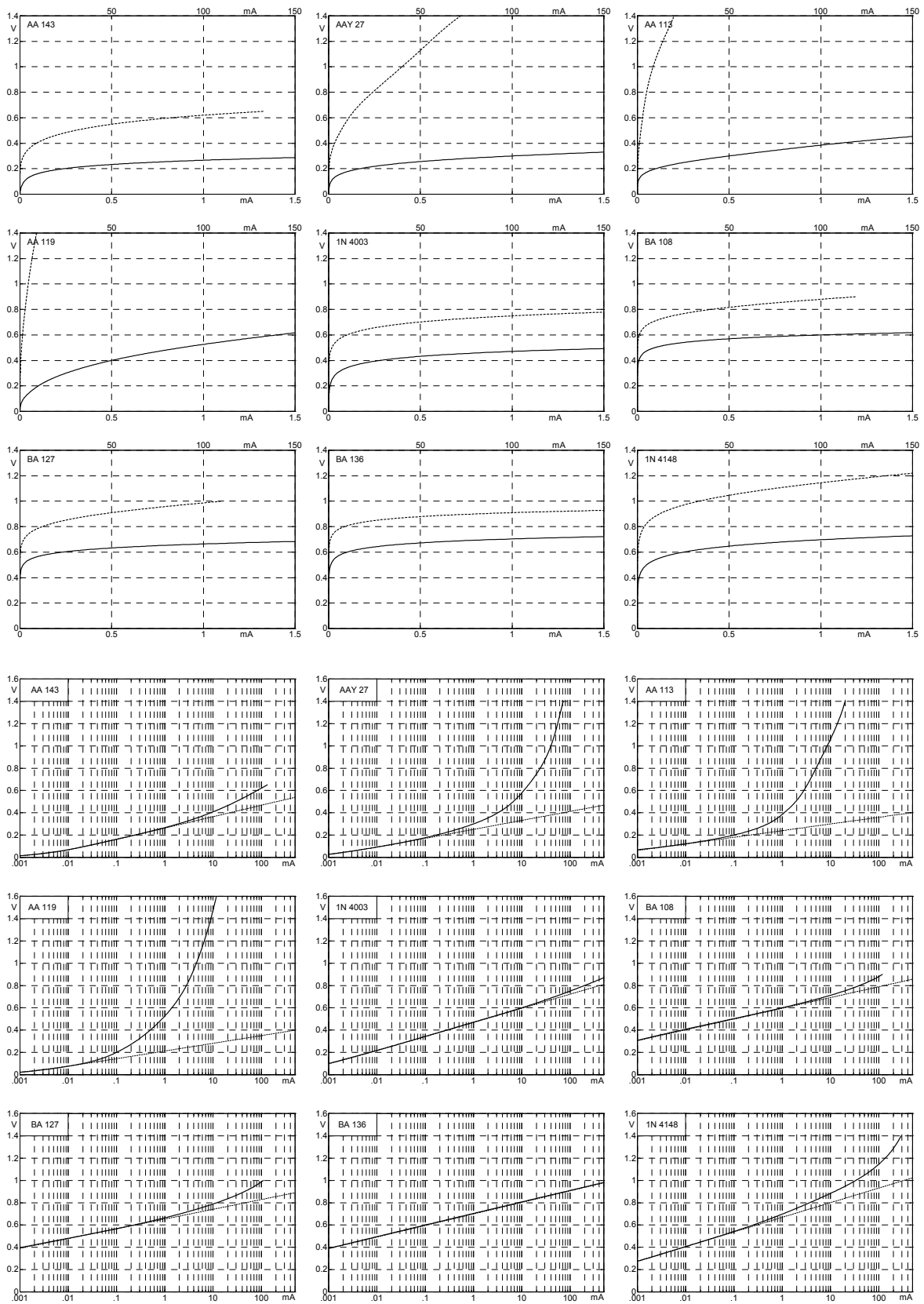


Abb. 10.8.26: Durchlasskennlinien verschiedener Halbleiter-Dioden (Datenblattangaben).

Die in typischen Verzerrern fließenden Diodenströme sind klein, maximal etwa 1 mA. Somit sind die bis über 100 mA reichenden Kennlinien nur in ihrem unteren Teil relevant, also in dem Teil, der relativ gut durch die Shockley-Gleichung angenähert werden kann. Um eine zweiseitige Signalbegrenzung zu erreichen, schaltet man zwei Dioden antiparallel zusammen, wodurch eine punktsymmetrische (ungerade) Kennlinie entsteht. Theoretisch, denn bei realen Dioden sind die fertigungsbedingten Streuungen erheblich. Prägt man auf das Diodenpaar sinusförmigen Strom ein, entsteht ein beidseitig verrundetes Signal, wie in Abb. 10.8.27 im rechten Bild dargestellt. Ideale Stromeinprägung ist allerdings nicht möglich (und auch nicht nötig). Weil der Innenwiderstand der ansteuernden Quelle nicht beliebig groß werden kann, ist es zweckmäßig, im Modell eine ideale Stromquelle zu verwenden, und das Diodenpaar um einen Parallelwiderstand zu ergänzen (linkes Bild) – hierdurch wird das Verhalten hauptsächlich bei kleiner Aussteuerung verändert. In allen drei Bildern sind Kurven zweier Diodenpaare dargestellt: Für die 1N4148, eine Kleinsignaldiode, und die 1N4003, eine Leistungsdiode.

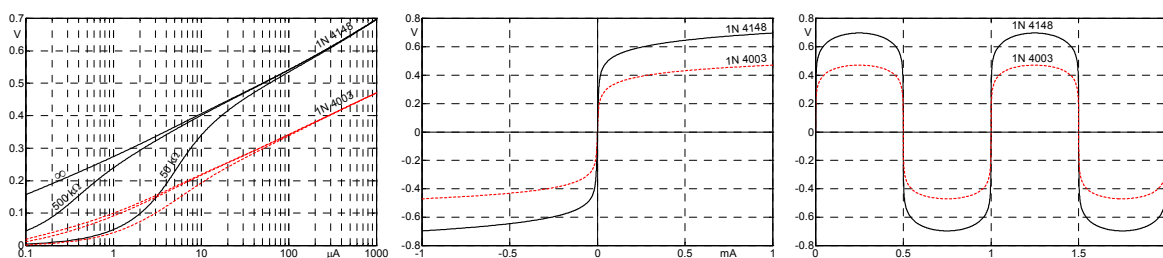


Abb. 10.8.27: Links: Durchlasskennlinien (halblogarithmisch), Diode mit parallelgeschaltetem Widerstand. Mitte: Zwei antiparallele Dioden. Rechts: Spannungs-Begrenzung bei sinusförmiger Stromeinprägung.

Solange man die Diodenkennlinien nur durch das Shockley-Modell beschreibt, gibt es nur **zwei Parameter**: Den Reststrom, und den Faktor bei der Temperaturspannung (1...2). Beide Größen kann man als Skalierungsfaktoren für Strom und Spannung auffassen, und somit gilt: Im Rahmen des Shockley-Modells zeigen alle Dioden dasselbe Verhalten, sofern man am Verzerrer-Eingang und -Ausgang eine variable Verstärkung vorsieht. Es ist im Rahmen dieses Modells nicht nötig, eine spezielle Diode zu suchen, da mit jeder Diode dieselben Verzerrer-Eigenschaften erreichbar sind. Damit ist allerdings noch nichts über das **dynamische** Verhalten ausgesagt, das nicht durch eine statische Kennlinie beschreibbar ist. Dioden sperren erst, wenn "alle" Ladungen aus der Sperrschicht abgefließen sind, und das dauert einen kleinen Moment. Relativ lang bei Leistungsdiode, relativ kurz bei HF-Dioden. Jedoch wird vor allem bei Dioden, die im Gegenkopplungszweig liegen, ein zusätzlicher Kondensator parallelgeschaltet, sodass man annehmen muss, allzu schnell sollen diese Dioden gar nicht reagieren. Beim **Tube-Screamer** sind z.B. 50 pF parallel geschaltet, die ihre Wirkung nur im obersten Frequenzbereich entfalten können, und auch nur bei voll aufgedrehter Verstärkung. Ganz anders im **Boss DS-1**: Hier findet man parallel zu den Dioden respektable **10 nF**! Angesichts dieser Riesenkapazität rückt das Schaltverhalten der Dioden dann doch etwas in den Hintergrund. Und nicht vergessen: Selbst ein derart großer Kondensator beeindruckt eine Si-Diode nur bei ganz kleinen Strömen. Bei (durchaus erreichbaren) 2 mA beträgt ihr differentieller Widerstand ungefähr 20 Ω , und im Vergleich dazu sind 10 nF relativ hochohmig.

Ist eine nicht-punktsymmetrische Kennlinie gewünscht, schaltet man unterschiedliche Dioden antiparallel zusammen, z.B. eine Ge- und eine Si-Diode, oder spezielle Serien-/Parallel-Netzwerke. Hierbei bekommt die individuelle Charakteristik Bedeutung, weil nicht mehr für jede Diode eine eigene Strom-/Spannungs-Skalierung vorgenommen werden kann.