

Zeitschrift: Helvetica Physica Acta
Band: 41 (1968)
Heft: 6-7

Artikel: Prinzipieller Vergleich der Leistungsfähigkeit von steuerbaren und nicht steuerbaren Gleichrichterzellen
Autor: Spenke, Eberhard
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-113990>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 17.03.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

auf dem Weltmarkt heute wie ehemals eine sichere Stellung innehaben, was nur dadurch erreicht werden konnte, dass ihre Produkte dauernd an der vordersten Front der Technik gehalten wurden. Obwohl in der Vergangenheit der zahlenmässige Anteil an Physikern in der Industrie gering war, darf die grosse Bedeutung ihrer Beiträge nicht übersehen werden, was an zwei freilich weit auseinander liegenden Beispielen illustriert sei: In einer Armbanduhr bildet die Spiralfeder, in einer Dampfturbine die Schaufel den kritischen Bestandteil, von dem die Funktion des Ganzen massgebend abhängt. Die Legierungen, aus denen diese zwei so verschiedenen Bauteile hergestellt werden, haben sich in den vergangenen 30 Jahren enorm verbessert und beruhen heute auf einem wissenschaftlich seriös fundierten Verständnis der physikalischen Vorgänge in Metallen.

Die Schweizer Industrie hat in den vergangenen Jahren ihren Bestand an Physikern vergrössert und hat ausserdem für die kommenden Jahre einen bedeutenden Mehrbedarf angemeldet. Aus Erhebungen geht ausserdem hervor, dass die festkörperphysikalische und die physikalisch-chemische Fachrichtung an diesem Mehrbedarf am stärksten beteiligt sind. Darin findet unter anderem die Tatsache ihren Ausdruck, dass die Halbleiterbauelemente nicht nur in Nachrichtengeräten universelle Verwendung finden, sondern auch in die Energietechnik und in den Uhrenbau eingedrungen sind.

Die festkörperphysikalische Forschung an der ETH blickt auf eine lange und erfolgreiche Tradition zurück. Lange bevor auf der Welt die explosionsartige Vermehrung der Arbeiten auf diesem Gebiet einsetzte und lange bevor das Wort «Festkörperphysik» überhaupt existierte, hatte sie an unserer Hochschule schon einen gefestigten Platz; es sei erinnert an die bedeutenden Arbeiten auf dem Gebiet des Paramagnetismus, an die Röntgen-Interferenz, an die Untersuchungen der ersten bekannten Ferroelektrika und der Halbleitereigenschaften von Siliziumkarbid und grauem Zinn. Diese Ergebnisse, ebenso wie die aus dieser Forschung hervorgegangenen Physiker, sind für die Industrie unseres Landes von grösster Bedeutung.

Prinzipieller Vergleich der Leistungsfähigkeit von steuerbaren und nicht steuerbaren Gleichrichterzellen

von **Eberhard Spenke**

Siemens Aktiengesellschaft, ZW Laboratorium LFH D 8551 Pretzfeld,
Bundesrepublik Deutschland

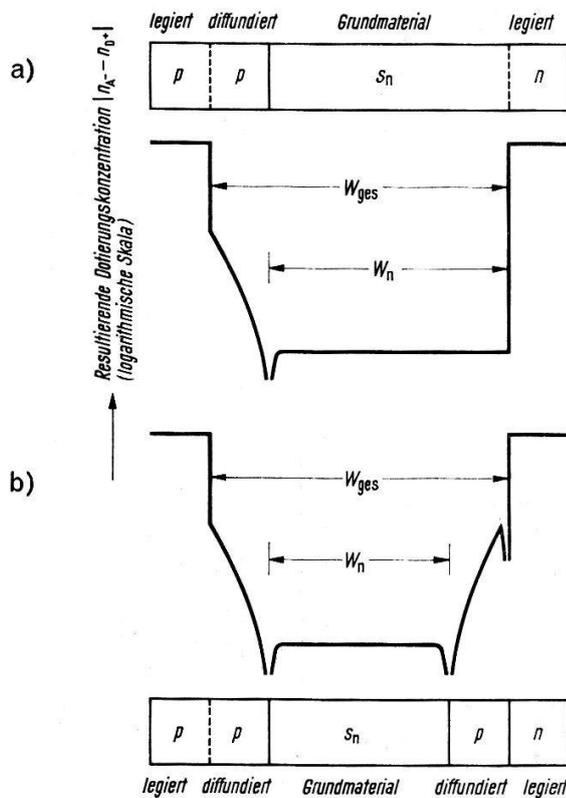
(21. III. 68)

Wie schon der angelsächsische Name «SCR = Silicon controlled rectifier» besagt, sind Thyristoren *steuerbare* Siliziumgleichrichter. Es ist nun nicht unplausibel, dass der Vorteil der Steuerbarkeit mit irgendwelchen Nachteilen in anderer Richtung erkauft werden muss, und in dieser Beziehung fällt auf, dass die Stromtragfähigkeit von Thyristoren erheblich kleiner als die Belastbarkeit vergleichbarer ungesteuerter Gleichrichter zu sein pflegt. Als vergleichbar wird man einen gesteuerten und einen ungesteuerten Gleichrichter dann bezeichnen, wenn die Sperrfähigkeit der beiden

Schaltelemente und ihre effektiven Querschnitte gleich gross sind. Weiter sollen die beiden Elemente bei Umschaltvorgängen gleich schnell reagieren. Wenn nun schon die letzte Bedingung wenig scharf formuliert ist, so ist auch die Strom-Tragfähigkeit oder -Belastbarkeit oder der «Typenstrom» eines Siliziumschaltelements keine physikalische, sondern eine technische Grösse, bei deren Festlegung die Betriebsbedingungen, also vor allem die Kühlung, aber auch die Rücksicht auf kurzzeitige Überlastungsstösse eine entscheidende Rolle spielen.

Zu einer physikalisch scharf definierten Frage kommt man wohl am besten, wenn man Voraussetzung und Kriterium bei dem geplanten Vergleich vertauscht, also nicht die Typenströme von Thyristoren und Dioden gleicher Sperrfähigkeit vergleicht, sondern umgekehrt von einem Thyristor und einer Diode mit gleichen Durchlasskennlinien ausgeht und die in beiden Fällen erreichbare Sperrspannung vergleicht.

Man wird dabei als Kennlinie des Schaltelements den funktionalen Zusammenhang zwischen der Stromdichte und der Spannung betrachten; damit ist das Verhältnis der effektiven Querschnitte der beiden miteinander verglichenen Schaltelemente unwichtig geworden, bzw. bei gleichen Querschnitten, gleichen Kühlbedingungen und gleichen Betriebstemperaturen wird man den beiden Schaltelementen gleiche Stromtragfähigkeit zuschreiben dürfen. Die Voraussetzung gleicher Schnelligkeit bei Umschaltprozessen verlangt gleiche Trägerlebensdauer τ und damit gleiche Diffusionslänge L in den schwach dotierten Mittelgebieten der verglichenen Gleichrichter- und Thyristor-Strukturen (siehe Fig. 1 a und b). Die andere Voraussetzung – nämlich gleiche Durchlasskennlinie – verlangt dann, wie HERLET und RAITHEL [1] gezeigt haben, gleiche Gesamtbreiten W_{ges} in beiden Strukturen.

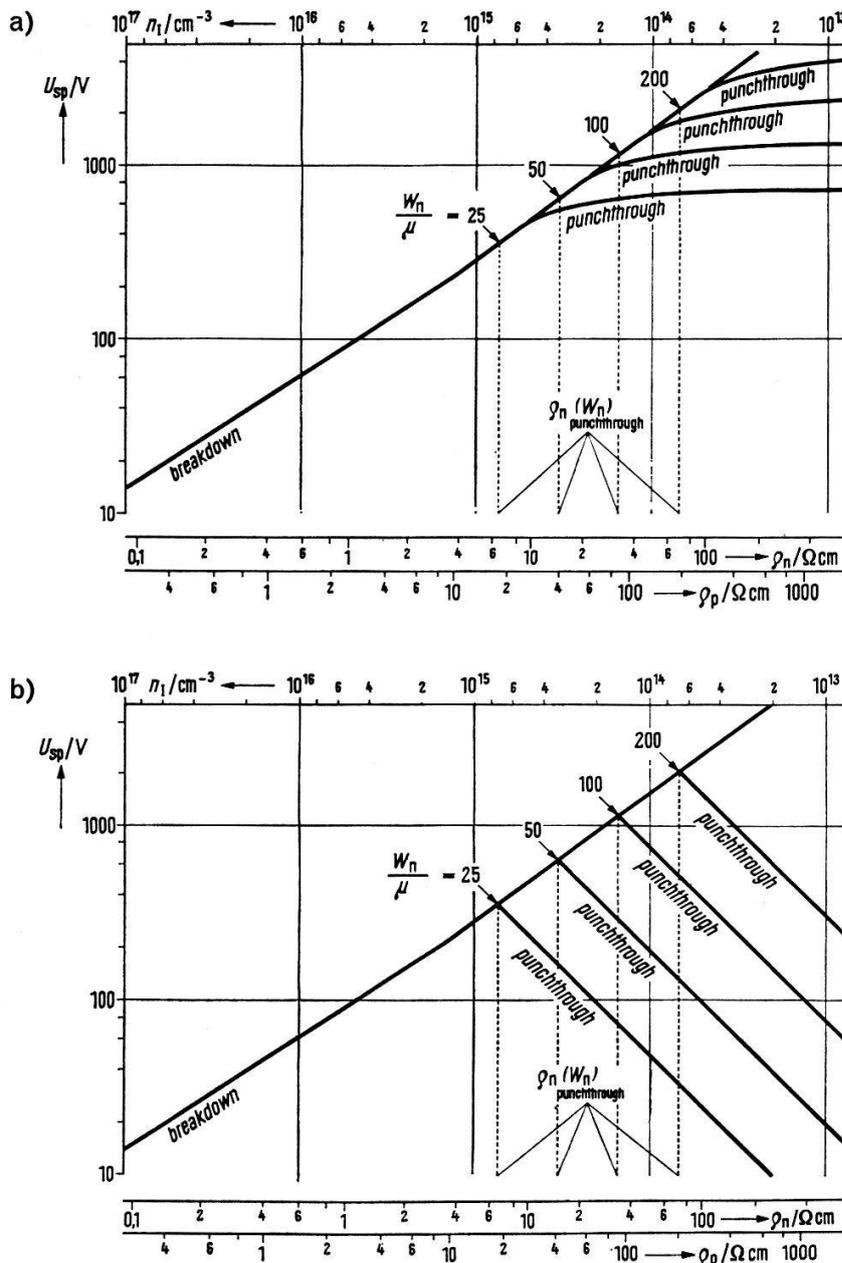


Figur 1 a und b

Gleichrichter- und Thyristor-Struktur mit gleichen Kennlinien bei starker Durchlassbelastung.

Für die Sperrfähigkeit beider Strukturen sind – siehe zum Beispiel [2] – der spezifische Widerstand ρ_n und die Breite W_n der schwach dotierten n -Basisgebiete massgebend (Fig. 2a und b). Bei niedrigen ρ_n -Werten spielt die Breite W_n der n -Basis keine Rolle. Die Sperrfähigkeit U_{Sp} ist durch die «breakdown-Kurve» begrenzt. Die zu Grunde liegenden physikalischen Effekte sind Stossionisation und Lawinenbildung in den starken Feldern des sperrenden pn -Übergangs. Geht man zu Strukturen mit immer grösseren ρ_n -Werten über, also in den Figuren 2a und b nach rechts, so kommt man jeweils nach Überschreiten eines Wertes $\rho_n(W_n)$ zu Kurventeilen, die mit «punchthrough» beschriftet sind.

Zum Phänomen des punchthrough und den dabei auftretenden physikalischen Effekten muss einiges Erläuternde gesagt werden. Vergleicht man nicht mehr wie bisher in den Figuren 2a und b verschiedene Strukturen mit unterschiedlichen ρ_n -

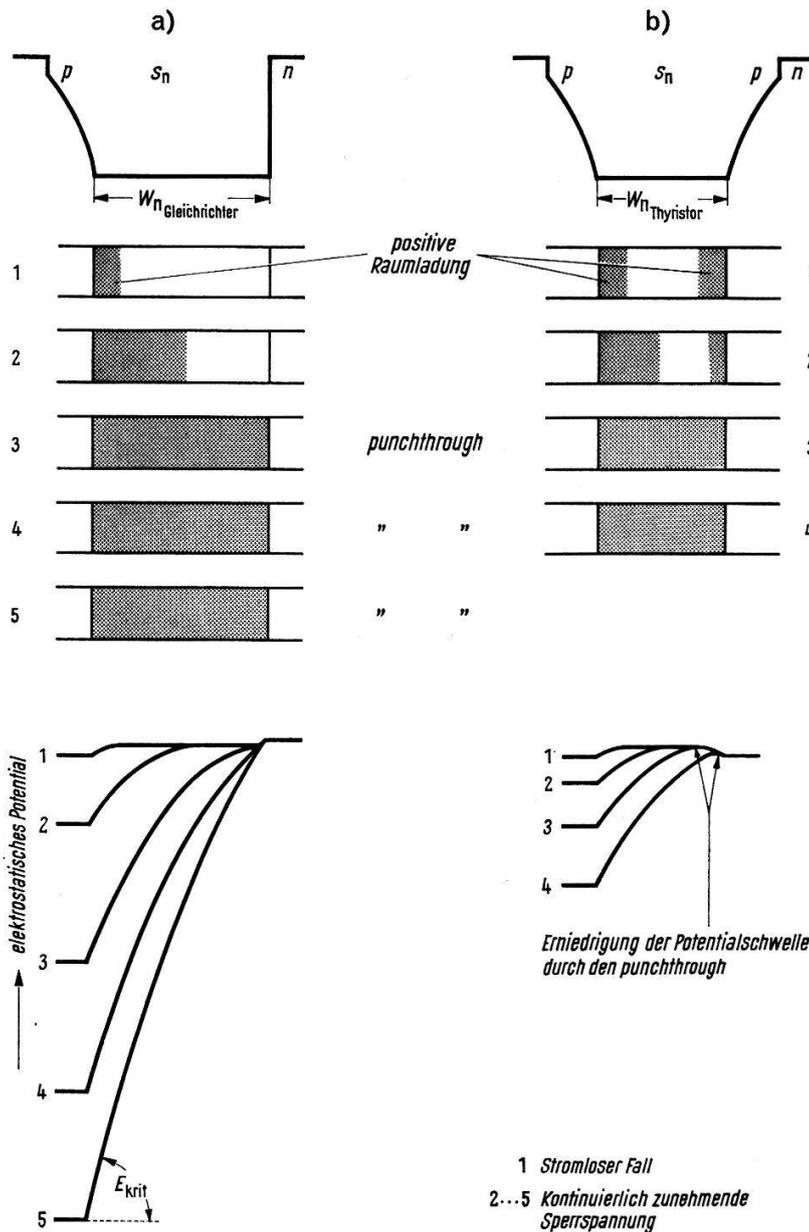


Figur 2a und b

Die Sperrfähigkeit von Gleichrichtern und Thyristoren in Abhängigkeit von der Dotierung ρ_n und der Breite W_n des schwach n -dotierten Basisgebietes.

und W_n -Werten jeweils beim Einsetzen des Sperrstromsteilanstiegs ($U = U_{Sp}$), sondern betrachtet man in den Figuren 3a und b ein und dieselbe Struktur mit gegebenem q_n und W_n bei langsam sich steigender Sperrspannung, so wird die Raumladung um den linken sperrenden pn -Übergang herum immer dicker. Namentlich schiebt sich ihre rechte Front immer weiter nach rechts in die schwach dotierte n -Basis vor und stösst schliesslich gegen die gegenüber liegende Dotierungsgrenze an. Dieses Phänomen nennt man punchthrough.

In einer Gleichrichterstruktur passiert beim Einsetzen des punchthrough im Prinzip¹⁾ gar nichts; ein Steilanstieg des Sperrstromes tritt erst nach weiterer Sperrspannungssteigerung ein und zwar dann, wenn die Feldstärke am sperrenden pn -Übergang einen kritischen Wert erreicht und infolgedessen Stossionisation und Lawi-



Figur 3a und b

Der punchthrough in einer Gleichrichter- und in einer Thyristor-Struktur.

¹⁾ Die Dotierungsgrenze zwischen dem schwach dotierten Mittelgebiet und dem hoch dotierten Randgebiet muss aber fehlerfrei sein. Siehe hierzu auch Fussnote 4.

nenbildung einsetzen²⁾. In einer *Thyristorstruktur* beginnt aber beim Einsetzen des punchthrough sofort ein Steilanstieg des Sperrstromes [3] und zwar auf Grund eines Phänomens, das mit der sogenannten «Schottky-Emission» aus der Glühkathode einer Vakuumröhre [4] manche Ähnlichkeit hat³⁾.

Der punchthrough spielt also in einer Gleichrichter- und in einer Thyristorstruktur eine prinzipiell verschiedene Rolle. Es ist demnach nicht überraschend, dass sich in Figur 2b der punchthrough beim Thyristor viel verhängnisvoller auswirkt als in Figur 2a beim Gleichrichter. Während bei Gleichrichtern vom Einsetzen des punchthrough ab durch weitere Steigerung von ϱ_n die Sperrfähigkeit immer noch um einen Faktor 2 gesteigert werden kann⁴⁾, sinkt die Sperrfähigkeit bei Thyristoren bei Steigerung von ϱ_n jeweils vom Einsatz des punchthrough ab proportional ϱ_n^{-1} .

Beim Gleichrichter ist es also im Interesse möglichst grosser Sperrfähigkeit vorteilhaft, mit ϱ_n möglichst hoch zu gehen. Bei Thyristoren dagegen gibt es – abhängig vom jeweiligen W_n -Wert – einen optimalen ϱ_n -Wert

$$\varrho_n = \varrho_n(W_n)_{\text{punchthrough}},$$

der zum Schnittpunkt der breakdown- und der punchthrough-Geraden gehört.

In beiden Strukturen ist es aber vorteilhaft, mit der Breite W_n der n -Basis möglichst gross zu werden – freilich nur im Interesse der Sperrfähigkeit. Die Durchlass-eigenschaften bei starken Belastungen verschlechtern sich mit zunehmender Gesamtbreite W_{ges} kontinuierlich und diese Verschlechterung nimmt bei Überschreitung der Grenze $W_{ges} \approx 2L$ sogar exponentiellen Charakter an. Man kann also mit W_{ges} kaum über diese Grenze $2L$ hinausgehen und da die Diffusionslänge L eine Materialkonstante ist, die sich nicht beliebig vergrössern lässt, werden wir für das Folgende die Gesamtbreite W_{ges} als eine gegebene Konstante betrachten.

Wir können nun daran gehen, zu untersuchen, welche Sperrfähigkeiten sich in den beiden verglichenen Strukturen – der Gleichrichter- und der Thyristor-Struktur mit gleicher Gesamtbreite W_{ges} – wenigstens grundsätzlich erzielen lassen.

Hierzu ist erstens festzustellen, dass bei gleicher Gesamtbreite W_{ges}

$$W_n_{\text{Thyristor}} < W_n_{\text{Gleichrichter}} \quad (1)$$

²⁾ Natürlich kann das auch schon vor Eintreten des punchthrough passieren. Dann handelt es sich um eine Struktur, für die $\varrho_n < \varrho_n(W_n)_{\text{punchthrough}}$ ist, die in Fig. 2 also links vom punchthrough-Punkt im breakdown-Teil liegt.

³⁾ Wegen Absenkung der Potentialschwelle zwischen n - und p -Basis (s. Fig. 3b) setzt aus der rechten p -Basis eine bei weiterer Spannungssteigerung rasch anwachsende Emission von Defektelektronen ein, die den Strom der bis dahin aus der n -Basis nach links hin abtransportierten Neuerzeugung von Defektelektronen fast sofort bei weitem übertrifft.

⁴⁾ Das setzt aber, wie schon in Fussnote 1 betont, voraus, dass die Dotierungsgrenze zwischen dem schwach n -dotierten Mittelgebiet und dem stark n -dotierten Randgebiet fehlerfrei ist, wobei «Fehler» kein scharf definierter Begriff ist. Wird z. B. das stark n -dotierte Randgebiet durch Legierung hergestellt – wie in Figur 1 angedeutet –, so entstehen nach A. HOFFMANN [5] an drei Stellen der Legierungsfrent scharf ausgeprägte Kanten. An diesen Kanten findet in bekannter Weise eine Feldkonzentration statt, die zur Folge hat, dass hier der breakdown-Wert der Feldstärke früher erreicht wird, als wenn eine völlig homogene und völlig plane Dotierungsgrenze vorliegen würde. In einem solchen Fall lässt sich die Sperrspannung vom Einsetzen des punch through ab nicht um einen vollen Faktor 2 steigern.

sein muss, weil beim Thyristor in der gleichen Gesamtbreite W_{ges} ja noch die p -Basis untergebracht werden muss (siehe Fig. 1). Schon dies allein würde bewirken, dass die erzielbare Sperrfähigkeit U_{Sp} beim Thyristor kleiner sein muss, als bei einem gleich schnellen Gleichrichter mit gleicher Durchlasskennlinie. Zweitens zeigen aber die Figuren 2a und b, dass man beim Thyristor mit der Sperrfähigkeit grundsätzlich nicht über den Schnittpunkt der breakdown- und der punchthrough-Kurve hinauskommt, während beim Gleichrichter noch eine Steigerung um den Faktor 2 möglich ist.

Damit dürfte gezeigt sein, dass die Steuerbarkeit des Thyristors aus prinzipiellen Gründen mit einer gegenüber dem Gleichrichter verminderten Leistungsfähigkeit erkauft werden muss, sei es nun, dass bei gleicher Stromtragfähigkeit die Sperrspannung geringer ist oder dass bei gleicher Sperrfähigkeit der Typenstrom herabgesetzt werden muss.

Zum Abschluss sei bemerkt, dass die in der Praxis vorliegenden Thyristoren und Gleichrichter die in den Figuren 2a und b angegebenen Grenzen noch keineswegs ausschöpfen.

Bei den Thyristoren vermeidet man bei der Dimensionierung den punchthrough. Die Annäherung an den Schnittpunkt breakdown-punchthrough bringt hier bereits theoretisch nicht mehr viel. Genauere Untersuchungen von HERLET [6] zeigen nämlich, dass die Kurven $U_{Sp} = f(\varrho_n) |_{W_n = \text{const}}$ den Übergang von der steigenden breakdown-Kurve zu den fallenden punchthrough-Geraden nur sehr abgerundet durchlaufen. Es kommt hinzu, dass in der Praxis Thyristoren, die in Figur 2b auf Grund ihrer Bemessung in der Nähe der punchthrough-Geraden liegen müssten, häufig eine erheblich niedrigere Sperrfähigkeit aufweisen, als es die Theorie voraussagt.

Bei der Gleichrichterdimensionierung überschreitet man den punchthrough dagegen, vermeidet⁵⁾ allerdings auch die Annäherung an den Endzustand verschwindender Dotierung, in dem vom eigentlichen p - n -Übergang links in Figur 1a ab quer durch das ganze schwach dotierte n -Gebiet hindurch bis zur rechten Dotierungsgrenze (s_n, n) praktisch die breakdown-Feldstärke herrscht.

Die bisherige Praxis zeigt also das Bild, dass man bei Gleichrichtern die mit einer breiteren n -Basis erreichbare grössere punchthrough-Spannung überschreitet, bei den Thyristoren dagegen die zu einer schmälere n -Basis gehörige kleinere punchthrough-Spannung noch nicht einmal erreicht.

Literaturnachweis

- [1] A. HERLET und K. RAITHEL, *Solid-State Electronics* 9, 1089–1105 (1966).
- [2] Siehe z. B. E. SPENKE in: *Festkörperprobleme VII*, herausgegeben von O. MADELUNG, Verlag Friedr. Vieweg und Sohn GmbH., Braunschweig 1967, S. 108–131, insbes. S. 113–122. Dort auch Hinweise auf weitere Literatur.
- [3] W. SHOCKLEY und R. C. PRIM, *Phys. Rev.* 90, 753 (1953).
- [4] W. SCHOTTKY, *Physik. Z.* 15, 872 (1914).
W. SCHOTTKY, H. ROTHE und H. SIMON, *Handbuch der Experimentalphysik* 13, II (Akadem. Verlagsges. Leipzig 1928), S. 253 ff.
- [5] A. HOFFMANN, *Solid-State Electronics* 7, 101–103 (1964).
- [6] A. HERLET, *Solid-State Electronics* 8, 655–671 (1965).

⁵⁾ Wegen der in Fussnote 4 genannten Gründe.