

# Modellparameter - Extraktion und Einfluß auf die Modellgüte

Lutz Göhler, Henry Güldner\*

Universität der Bundeswehr München, Werner-Heisenberg-Weg 39, 85577 Neubiberg

\*Technische Universität Dresden, Mommsenstraße 13, 01069 Dresden

## 1 Inhalt

In den letzten Jahren wurde große Mühe auf die Erstellung von Modellen für leistungselektronische Bauelemente verwandt. Das umfangreiche Gebiet der Parameterbestimmung einschließlich der Wechselwirkung zwischen Modellniveau, Extraktionsaufwand und erreichbarer Genauigkeit erfuhr hingegen weniger Beachtung. Das Ziel dieses Beitrages ist die Darlegung einer Systematik der vorhandenen Bauelementemodelle, der wesentlichen Parameterextraktionsverfahren und der erreichbaren Genauigkeit. Betrachtungen anhand eines Leistungsdiodenmodells und eines Thyristormodells präzisieren die Aussagen.

## 2 Einleitung

Vor dem Hintergrund eines immer höheren Kostendruckes sehen sich die Hersteller leistungselektronischer Systeme zunehmend gezwungen, Simulationen zum Entwurf und zur Analyse einzusetzen. Als Vorteile lassen sich beispielsweise bezüglich Spannungs-, Strom- und Temperaturverläufen an verschiedenen Punkten hochgetakteter Schaltungen genauere Vorhersagen als mit den klassischen Handrechnungen verzeichnen.

Der Forderung nach Rechneinsatz entsprach die Entwicklung von Modellen für leistungselektronische Bauelemente. Bedingt durch die begrenzte Verarbeitungsgeschwindigkeit der verfügbaren *hardware*-Plattformen trieb man die Entwicklung in mehrere Richtungen voran, da die im allgemeinen angewandte rechenzeitsparende Unterteilung einer Simulationsaufgabe in *device*-, Schaltungs-, und Systemsimulation jeweils spezielle Modellierungsansätze erfordert.

Bei *device*-Simulationen löst ein numerischer Algorithmus - meist unter Verwendung der Methode der finiten Elemente - die Halbleitergrundgleichungen, so daß nicht nur das Klemmenverhalten, sondern auch interne Größen, wie z. B. Ladungsträgerkonzentrationen, beobachtbar sind. Schaltungs- und Systemsimulationen benötigen dagegen schnelle Modelle, die meist nur noch das Klemmenverhalten richtig wiedergeben können. Interne Prozesse treten demgegenüber in den Hintergrund. Während die Bauelementesimulation vorwiegend physikalische oder technologische Parameter verlangt, benötigen Modelle zur Schaltungs- und Systemsimulation Eingabewerte, die nicht in jedem Fall unmittelbar aus der Physik oder dem Herstellungsprozeß folgen. Es stellt sich somit das Problem der effizienten Parameterbestimmung. In dem interessanten Spannungsfeld Bauelementemodellierung für Schaltungs- und Systementwurf - Parameterbestimmung - Modellgenauigkeit sind die folgenden Ausführungen angesiedelt.

### 3 Modellbildung

Die Modellierung von Bauelementen für die Schaltungssimulation umfaßt im wesentlichen drei Gruppen: *Tabellenmodelle*, *Makromodelle* und *physikalische Modelle*.

**Tabellenmodelle.** Für diesen Modelltyp werden viele Messungen unter statischen und dynamischen Verhältnissen bei verschiedenen Temperaturen durchgeführt und die Daten im Rechner in Matrixform hinterlegt [2]. Zur Laufzeit berechnet ein entsprechender Algorithmus die Klemmengrößen über mehrdimensionale Interpolation. Der Rechenzeitaufwand nimmt folglich mit der Anzahl der Dimensionen der Matrix zu. Weiterhin sind numerische Stabilität und Stetigkeit der Ausgangsgrößen meist unbefriedigend. Derartige *table look-up*-Modelle kommen heute kaum noch zum Einsatz.

**Makromodelle.** Hier spielt ausschließlich das Klemmenverhalten eine Rolle. Mittels zweckmäßiger Gleichungen erfolgt die Beschreibung des Bauelements als  $n$ -Pol mit Ladungsspeicherung [8]. Die Parameter eines Makromodells sind normalerweise nicht physikalisch interpretierbar.

**Physikalische Modelle.** Physikalische Modelle stellen Vereinfachungen (z. B. Eindimensionalität, Homogenität der einzelnen Zellen) der Halbleitergrundgleichungen dar. Die ambipolare Diffusionsgleichung, die die Ladungsträgerverteilung örtlich und zeitlich beschreibt, wird entweder numerisch in einem Unterprogramm (hybride Methode [3], [10]) oder mittels Näherungen gelöst (*Galerkin*-Methode [6], Reihenansatz [7], *Laplace*-Transformation [11]).

Die wohl wichtigste Eigenschaft dieses Modelltyps besteht in der physikalischen Interpretierbarkeit der Parameter. Dadurch ist es dem Schaltungsentwickler in gewissem Umfang möglich, in den Bauelementeentwurf einzugreifen.

Vergleicht man physikalische und Makromodelle, so fällt auf, daß bei gleicher Genauigkeit erstere mehr Gleichungen, letztere aber mehr (physikalisch nicht interpretierbare) Parameter aufweisen. Daraus erklärt sich der größere Rechenzeitbedarf physikalischer Modelle.

Im Idealfall, wenn nur wenige Näherungen vorgenommen wurden, sind die Parameter eines physikalischen Modells orthogonal zueinander, was die Parametrierung etwas vereinfacht. Auch bezüglich der Extrapolationseigenschaften, d. h. dem Betrieb außerhalb des durch die Parametrierung erfaßten Arbeitsbereiches, erbringen physikalische Modelle bessere Ergebnisse.

Die Domäne physikalischer Modelle liegt folglich in einer relativ genauen Analyse einzelner Schaltvorgänge in kleineren Schaltungen, während Makromodelle eher bei der Simulation großer Schaltungen über viele Schaltzyklen hinweg mit vergleichsweise geringeren Genauigkeitsanforderungen ihre Stärken ausspielen können.

Generell steigen Rechenzeit und Anzahl der Parameter mit der Genauigkeit der Beschreibung. Dadurch wird insbesondere die Extraktion komplizierter und erfordert einen größeren zeitlichen Aufwand. Es sollten deshalb nur die Effekte in einem Modell Berücksichtigung finden, die für die Simulationaufgaben relevant sind.

Es sei noch erwähnt, daß die aufgeführten Grundtypen Grenzfälle darstellen, die in verschiedenen Kombination auftreten können.

## 4 Parameterbestimmung

Prinzipiell existieren zwei Arten der Extraktion: *modellspezifische Parameterbestimmung* und *Parameteroptimierung*.

**Modellspezifische Parameterbestimmung.** Modellspezifisch heißt, daß bestimmte Meßbedingungen gefunden werden müssen, unter denen sich die Modellgleichungen soweit vereinfachen, daß der gesuchte Parameter extrahiert werden kann. Dies muß nicht immer mit der Isolation dieses Wertes einhergehen. Häufig sind Ausgleichsrechnungen anzuwenden, um zum Ziel zu gelangen.

Zur Realisierung einer Ausgleichsrechnung verwendet man entweder Gradientenverfahren (z. B. *Levenberg-Marquardt*-Methode im kommerziellen Programm *TableCurve*) oder, wenn die Summe der Fehlerquadrate nur gering vom gesuchten Wert abhängt, *randomizing*-Verfahren.

Die Schwierigkeit bei dieser Methode besteht offenbar in der Ableitung entsprechender Meßbedingungen. Weiterhin sind die Verfahren - wie der Name andeutet - meist nicht übertragbar. Eine Ausnahme bilden physikalische Modelle, bei denen infolge identischer Parameter einige Extraktionsverfahren für verschiedene Beschreibungen genutzt werden können (z. B. Bestimmung der Minoritätsträgerlebensdauer in der  $n$ -Basis einer Leistungsdiode bzw. eines konventionellen Thyristors aus dem Ausschaltverhalten).

**Parameteroptimierung.** Bei der Parameteroptimierung erfolgt die Extraktion über die Definition geeigneter Startwert mit anschließender Optimierung. Offensichtlich besteht hier eine wichtige Aufgabe darin, geeignete Startwerte zu finden.

In der Praxis wird man weder die eine noch die andere Methode ausschließlich anwenden, vielmehr besteht der optimale Weg in der Kombination beider Verfahren. Die Gründe dafür liegen auf der Hand: ausschließlich modellspezifische Vorgehensweise erbringt keine optimalen Ergebnisse, da alle Extraktionsgleichungen nur Näherungen sein können, wohingegen ausschließliche Optimierung unter den Unzulänglichkeiten multidimensionaler numerischer Extremwertsuche leidet.

Ein kommerzielles Programme, das dieser Philosophie Rechnung trägt, ist beispielsweise *IC-CAP*. Einerseits werden Rechenroutinen für die Lösung benutzerdefinierter Extraktionsgleichungen bereitgestellt, andererseits kann die *software* Optimierungen unter Einbeziehung des Schaltungssimulators *SABER* ausführen.

Von Seiten der Anwender werden meist drei Parametersätze gefordert, und zwar für ein repräsentatives und ein jeweils an der oberen bzw. unteren technologischen Grenze liegendes Bauelement. Es handelt sich dabei allerdings nicht um die sogenannten *worst case*-Parametersätze, denn diese sind stets schaltungsabhängig.

Schließlich sei noch darauf hingewiesen, daß sich die Parameterbestimmung in wachsendem Maße zum Bauelementehersteller verlagert. Für ihn wird die Extraktion aufgrund der Technologiekenntnisse (z. T. durch zerstörende Messungen) zwar wesentlich vereinfacht, die Modellvielfalt stellt allerdings gegenwärtig noch ein ernstes Problem dar, das nur entsprechende internationale Normungen aus der Welt schaffen können.

## 5 Beispiele

Im folgenden erläutern zwei Beispiele die Vorgehensweise bei der Parameterbestimmung. Während im ersten Fall ein gemischtes Verfahren (modellspezifisch und Optimierung) Verwendung findet, stellt das zweite Extraktionsschema eine rein modellspezifische Variante dar.

### 5.1 Diodenmodell

Leistungsdiodenmodelle sind die einfachsten aber zugleich grundlegenden Bauelementemodelle in leistungselektronischen Simulationen. Im Mittelpunkt soll das Diodenmodell nach *Lauritzen* und *Ma* [9] stehen, das leicht verbessert wurde, um die Sperrverzugszeit-Anodenstrom-Charakteristik auch für schnelle Dioden nachbilden zu können. [5] beschreibt eine automatisierte Parameterbestimmung, die weiter unten etwas näher dargestellt wird.

Die Ableitungen in [9] basieren auf dem Ladungsknotenmodell nach *Linville*, d.h. der Unterteilung der schwachdotierten  $n$ -Basis in einzelne Bereiche. Im speziellen Fall stellt die Mitte der  $\nu$ -Zone per Definition die Symmetrieachse dar. Der grundlegende Ansatz ist physikalischer Natur, die oben erwähnten Zusätze entstammen teils physikalischen, teils verhaltensorientierten Überlegungen. So wird beispielsweise die Sperrcharakteristik nur über eine entsprechend programmierte Stromquelle wiedergegeben.

Das Gleichungssystem zeichnet sich durch sehr geringen Rechenaufwand aus und kann deshalb auch in größeren Schaltungen eingesetzt werden. Probleme der Eigenerwärmung werden nicht berücksichtigt, so daß mit verschiedenen Parametersätzen, entsprechend den verschiedenen Temperaturen, gerechnet werden muß.

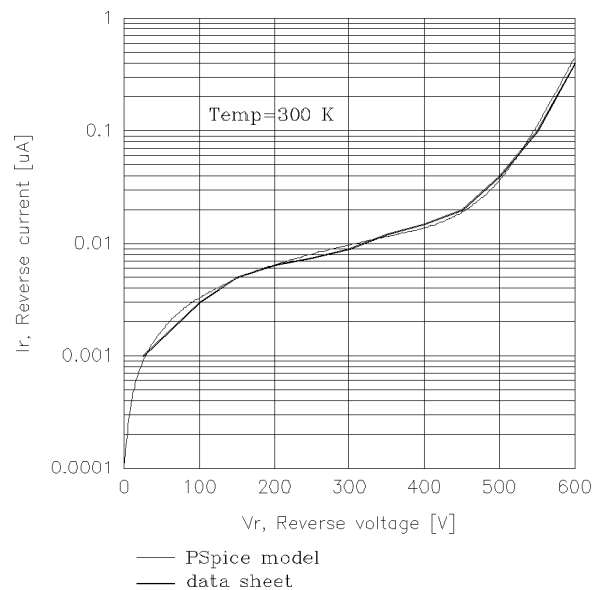
Die Parameterbestimmung, die vollautomatisch abläuft und als Eingabewerte Datenblattangaben und optional die Messung der  $DC$ -Charakteristik sowie einiger Ein- und Ausschaltvorgänge für verschiedene Anodenströme verlangt, verläuft in den folgenden Schritten:

- Schritt 1: Bestimmung der Lebensdauer und der Diffusionszeit durch die halbe  $\nu$ -Zone aus dem Ausschaltvorgang unter Nutzung von aus dem Modell abgeleiteten Gleichungen
- Schritt 2: Anpassung der Vorwärtskennlinie durch Ausgleichsrechnung (*randomizing*-Verfahren)
- Schritt 3: Anpassung der Rückwärtskennlinie über Programmierung einer Stromquelle
- Schritt 4: Bestimmung einer Lebensdauer als Korrekturwert für schnelle Dioden mittels numerischer Integration des gesamten Gleichungssystems und Iteration, bis Spannungsnachlaufzeit und Rückstromfallzeit mit der Messung übereinstimmen
- Schritt 5: Bestimmung des Widerstandes des  $\nu$ -Zone über numerische Integration des Gleichungssystems und Iteration, bis die Einschaltspannungsüberhöhung mit entsprechenden Messungen übereinstimmt

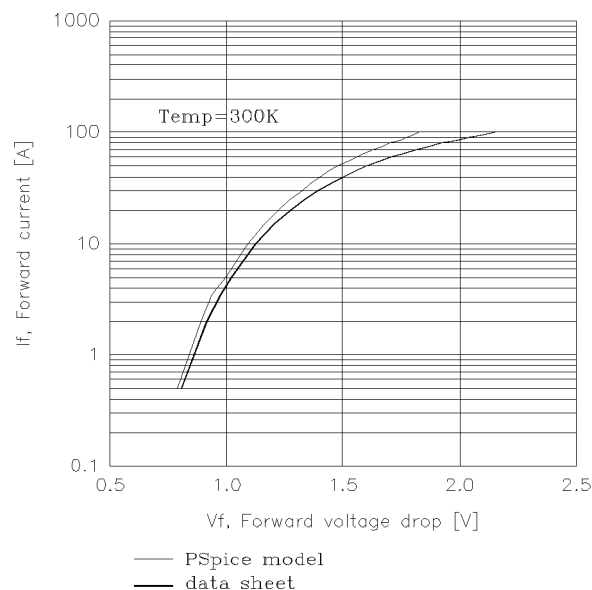
- Schritt 6: Nochmalige Anpassung der Vorwärtskennlinie (wegen des veränderten Wertes für den Widerstand der  $\nu$ -Zone)
- Schritt 7: Nochmalige Bestimmung der Korrektur-Lebensdauer (wegen der geänderten übrigen Parameter).

Modellspezifische (Schritte 1, 2, 3 und 6) und Optimierverfahren (Schritte 4, 5 und 7) treten offensichtlich in Kombination auf.

Die schnelle Leistungsdiode *RURP 1540* demonstriert im folgenden die erreichbaren Ergebnisse. Bild 1 zeigt die erwartungsgemäß gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Datenblattangabe, da die Werte zur Parametrierung den Herstellerangaben entnommen wurden.



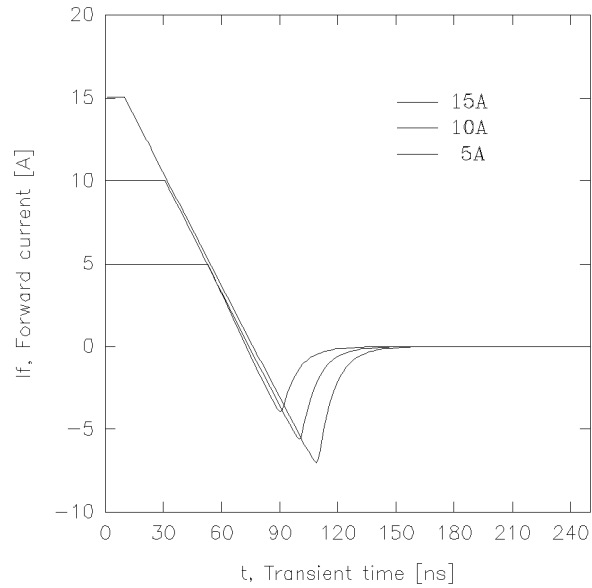
**Bild 1** Simuliertes und gemessenes Sperrverhalten



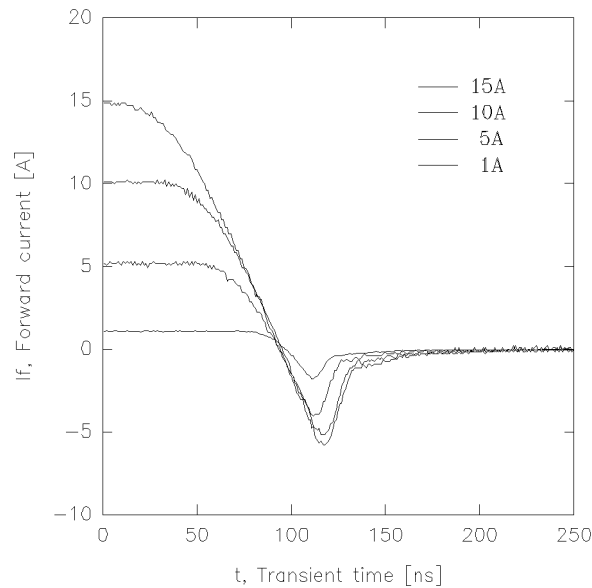
**Bild 2** Simuliertes und gemessenes Durchlaßverhalten

Im Vorwärtsverhalten (Bild 2) beobachtet man eine Abweichung zwischen Datenblattangabe und Simulation. Ursache ist hier, daß die Parametrierung mit Meßdaten erfolgte, während die Datenblattangabe ein repräsentatives Bauelement verkörpert. Die Abweichung in der Spannung  $U_F$  bei  $I_F = 15\text{A}$  beträgt etwa 5% und steht somit für die Produktionsstreuung. Diese kann natürlich in Wirklichkeit größer sein (Erhöhung der Probenanzahl notwendig).

Das gleiche Vorgehen läßt sich auch für das Ausschaltverhalten anwenden. Bild 3 zeigt die Simulation, Bild 4 die Messung. Als Abweichung in der Rückstromspitze verzeichnet man etwa 10%.



**Bild 3** Simuliertes Ausschaltverhalten



**Bild 4** Gemessenes Ausschaltverhalten

## 5.2 Thyristormodell

Als zweites Beispiel soll ein streng physikalisches Modell für einen konventionellen Thyristor mit Kathoden-*shorts* nach [1] bzw. [4] dienen. Den Kern der Beschreibung stellt die dynamische Ladungsbeschreibung nach *Kraus* [6] dar.

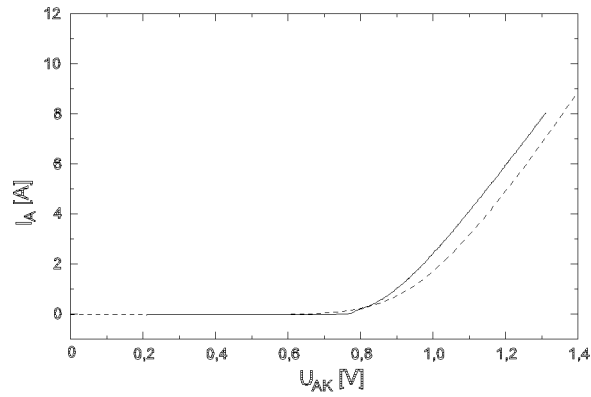
Dieses Modell berücksichtigt alle wesentlichen Effekte, wie z. B. auch die Eigenerwärmung. Dadurch und wegen der insgesamt komplizierteren Struktur muß eine im Vergleich zum Diodenmodell größere Rechenzeit in Kauf genommen werden. Sie liegt bei etwa einer Minute pro Schaltvorgang (Workstation *Sparc 20*).

In [4] wird die Parameterbestimmung beschrieben, die hier in den folgenden Schritten abläuft:

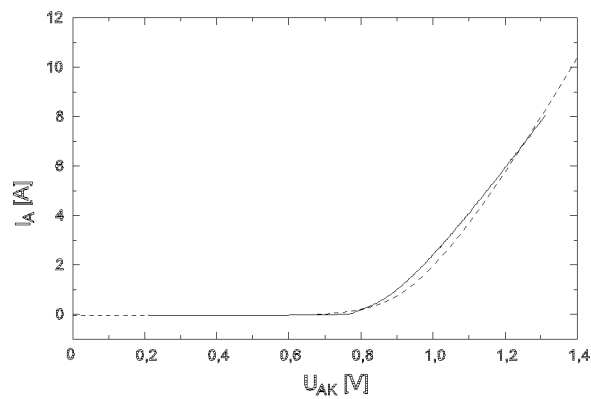
- Schritt 1: Extraktion der Querschnittsfläche, Dotierungen und Weiten, mit Ausnahme der Weite der schwachdotierten  $n$ -Basis, unter Verwendung von Sperrschichtkapazitätsmessungen.
- Schritt 2: Bestimmung der Durchbruchspannung der Gate-Anoden-Strecke
- Schritt 3: Bestimmung der Minoritätsträgerlebensdauer in der  $n$ -Basis aus dem Ausschaltverhalten
- Schritt 4: Bestimmung der  $n$ -Basisweite z. B. über das Kleinsignalverhalten
- Schritt 5: Rechnerische Bestimmung der Minoritätsträgerlebensdauer in der  $p$ -Basis
- Schritt 6: Bestimmung des Kurzschlußwiderstandes und zweier charakteristischer Größen, die das Verhalten der Emitter beschreiben, aus der  $I_A(U_{GK})$ -Kennlinie.

Es handelt sich damit um eine rein modellspezifische Extraktion, die durch den physikalischen Charakter des Modells aber z. B. auch auf Leistungsdioden übertragbar ist.

Als Beispielbauelement soll ein Thyristor kleiner Leistung dienen (*BT 151*,  $I_{TAV} = 7,5\text{A}$ ). Die Simulation der  $DC$ -Kennlinie mit extrahierten Parametern im Vergleich mit einer entsprechenden Messung zeigt Bild 5. Eine Abweichung von ca. 15% bei  $I_A = I_{TAV}$  läßt sich beobachten, die man z. B. durch Optimierung von Hand schnell zum Verschwinden bringen kann (Bild 6). Es wird somit deutlich, daß - wie eingangs erwähnt - die Kombination von modellspezifischen und Optimierverfahren bessere Ergebnisse hervorbringt als nur eine Verfahrensgruppe allein, insbesondere wenn die Parameter physikalischer Natur sind und sich dadurch auf elektrischem Wege (zerstörungsfrei) nur mit begrenzter Genauigkeit bestimmen lassen. Eine nachträgliche Optimierung bereitet allerdings wenig Aufwand, da die endgültigen Werte meist schon sehr gut getroffen werden.

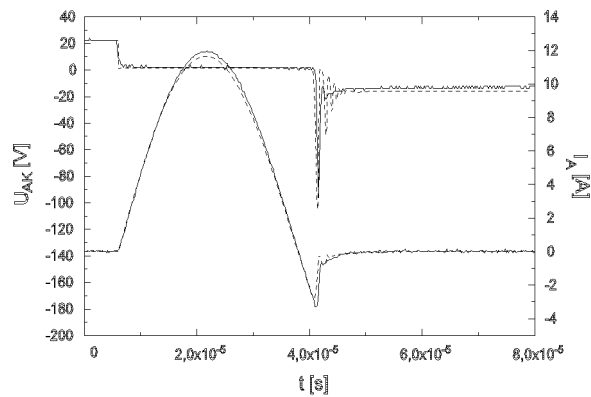


**Bild 5** DC-Kennlinie mit extrahierten Parametern



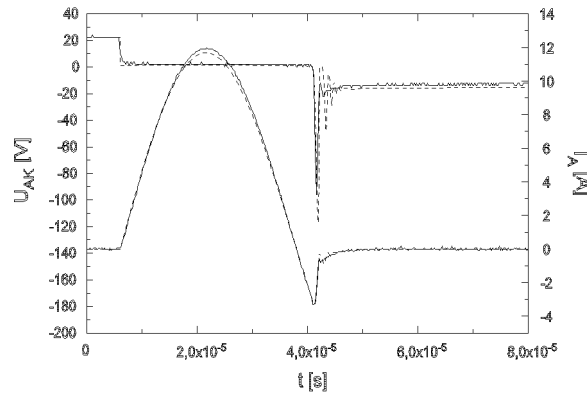
**Bild 6** DC-Kennlinie mit extrahierten Parametern nach Optimierung

Ein ähnliches Resultat ergibt der Vergleich der Ausschaltvorgänge in der Simulation und Messung, wenn zuerst die extrahierten, dann die nachträglich optimierten Parameter Verwendung finden. Die Abweichung in der Rückstromspitze verringert sich von ca. 15% in Bild 7 auf etwa Null in Bild 8.



**Bild 7** Ein- und Ausschaltvorgang mit extrahierten Parametern





**Bild 8** Ein- und Ausschaltvorgang mit extrahierten Parametern nach Optimierung

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Der Beitrag stellte nach einem Überblick über die gängigen Simulationstechniken heute verfügbare Bauelementemodelltypen vor. Die Bemerkungen zur Wechselwirkung zwischen Modelltyp, Parameterbestimmung und Genauigkeit wurden allgemein und an zwei Beispielen erläutert. Eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf verschiedene Leistungshalbleiterbauelemente, so auch auf den *IGBT*, ist damit gegeben. Speziell im Fall physikalischer Modelle für diese Struktur kann eine komplett modellspezifische Parameterbestimmung hinsichtlich Geometrie- und Technologiekenngößen durchaus Schwierigkeiten aufwerfen, so daß man auf den Einsatz von Optimierungsverfahren häufig nicht gänzlich verzichten kann.

Die Zunahme der Rechengeschwindigkeit und der Güte numerischer Simulationsalgorithmen wird es einerseits erlauben, größere Schaltungen zu simulieren, andererseits können Modelle um wichtige Effekte erweitert werden (z. B. Alterung, dynamischer *SOA*). Auf dem Gebiet der Parameterbestimmung werden sicherlich noch viele vollautomatisierte Lösungen gefunden, die allerdings fast ausschließlich beim Bauelementehersteller zum Einsatz gelangen.

## 7 Literatur

- [1] M. Bayer, R. Kraus, "A New Analytical SCR-Model for Circuit Applications"; Proceedings of SPEC '94, 1994, pp. 45-47
- [2] M. E. Clarke, S. Rahim, "A nonquasi-static empirical model of the power PIN diode for circuit simulation"; Int. J. for Computation and Mathematics in Electrical and Electron. Eng., vol. 13, no. 4, Dec. 1994
- [3] H. Göbel, "Hybridverfahren zur Modellierung Leistungselektronischer Bauelemente"; Fortschrittsberichte VDI, Reihe 21, Nr. 143, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1993
- [4] L. Göhler, "Thyristormodellierung"; Dissertation, Universität der Bundeswehr München, 1997

- [5] H. Güldner, K. Lehnert, B. Arlt, L. Göhler, "Adaptation of a Power Diode Model to PSPICE"; PCIM '95
- [6] R. Kraus, K. Hoffmann, H. J. Mattausch, "A precise model for the transient characteristics of power diodes"; Proc. of PESC '92
- [7] P. Leturq, "A Study of Distributed Switching Processes in IGBTs and Other Power Bipolar Devices"; Proc. of PESC '97
- [8] Y. Liang, V. J. Gosbell, "Diode Forward and Reverse Recovery Model for Power Electronics Spice Simulations"; IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 5, no. 3, Jul. 1990
- [9] C. L. Ma, P. O. Lauritzen, "A Simple Power Diode Model With Forward And Reverse Recovery, Proc. of PESC '91
- [10] D. Metzner, "Netzwerkmodelle abschaltbarer Leistungshalbleiterbauelemente"; Dissertation, Technische Universität München, 1994
- [11] A. G. M. Strollo, "A New IGBT Circuit Model for SPICE Simulation"; Proc. of PESC '97