

## Dioden und Transistorkennlinien

Zur intensiveren Auseinandersetzung mit Elementen elektronischer Schaltungen wurden, mit Hilfe des Computers, einige Kennlinien einer Diode und eines Transistors aufgenommen. Der prinzipielle Verlauf dieser Kurven läßt sich in den ermittelten, recht genauen, Graphen sehr gut erkennen.

Die PG 268-III:

Tutor:	Sing,	Cornelia	
	Bednarczyk,	Diana	196230
	Fleischer,	Fabian	197376
	Könnecke,	Rene	197367
	Sturm,	Matthias	194362
	Südmeyer,	Heinrich	197655
	Torabi,	Ramin	197364

# Inhaltsverzeichnis

	Seite
Titelblatt mit Abstract	1
Inhaltsverzeichnis	2
1. Allgemeines	3
2. Theoretische Vorüberlegungen	3
3. Aufbau	7
3.1 Geräteliste	7
3.2 Versuchsaufbau	7
4. Durchführung	9
5. Auswertung	9
6. Resümee	11
7. Literaturverzeichnis	11

## 1. Allgemeines

Halbleiter sind aus der heutigen Welt nicht mehr weg zu denken. Die wichtigsten Halbleiter Bauelemente sind die Dioden, die Transistoren und die Thyristoren, sie werden häufig unkonkret über ihren Widerstand von etwa  $10^{-4}\Omega$  bis  $10^{12}\Omega$  "definiert". Der durch Halbleiter-Bauelemente erzielte Jahresumsatz ließ sich in den letzten Jahrzehnten recht gut durch eine Exponentialfunktion approximieren. Halbleiter-Bauelemente finden in beinahe allen Bereichen Verwendung. Große Bedeutung haben sie vor allen Dingen für die Nachrichtentechnik und die elektronische Datenverarbeitung.

## 2. Theoretische Vorüberlegungen

Zur genauen Beschreibung der Vorgänge in Halbleiterelementen bedient man sich des sogenannten Bändermodells. Die genaue Herleitung des Bändermodells ist sehr mathematisch und würde mehr als nur den Rahmen eines PL Protokolls sprengen, daher werden im Folgenden nur die Prinzipien dargestellt.

Der Ursprung des Bändermodells ist, wie so oft bei quantenmechanischen Modellen, die Schrödingergleichung:

$$\left( -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\vec{r}) \right) \cdot \psi(\vec{r}, t) = \hbar i \cdot \frac{\partial \psi(\vec{r}, t)}{\partial t}$$

Die zeitunabhängige Schrödingergleichung wird dann auf das Coulombpotential eines Protons (Wasserstoffkation) angewendet. Als Lösungen erhält man Lösungen für  $\psi$  sowie vier Konstanten.  $|\psi|^2$  als Lösung der Schrödingergleichung wird immer mit der Aufenthaltswahrscheinlichkeit des betrachteten Teilchens identifiziert. Die kleinsten "Räume" maximaler Aufenthaltswahrscheinlichkeit werden dann als Orbitale und die vier Konstanten  $n$ ,  $l$ ,  $m$  und  $s$  als die Quantenzahlen bezeichnet.

Unter bestimmten Einflüssen sind gewisse Zustände energetisch günstiger, als die "Grundzustände", daher werden Zwischenzustände in vielen Verbindungen gefunden. Man bezeichnet das Atom dann als hybridisiert. Die wichtigsten Elemente der Halbleiterelektronik stehen in der IV. Hauptgruppe, Verbindungen in einem solchen reinen Kristall sind immer hybridisiert; bei den Elementen der IV. Hauptgruppe liegt bei vier Einfachbindungen die sog.  $sp^3$  Hybridisierung vor (da ein sog.  $s$  und drei  $p$  Orbitalen zu vier  $sp^3$  Hybridorbitalen "verschmelzen"). Mathematisch werden diese Orbitale durch eine "gewichtete" Linearkombination der einzelnen Orbitale gebildet. Durch  $sp^3$  Hybridisierung entstandene Strukturen sind immer tetraedrisch.

Wenn sich mehrere Atome zu einem Molekül verbinden, dann hat das natürlich auch Auswirkungen auf die kleinsten Räume maximaler Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Elektronen (die Orbitale). Dies wird durch das Molekülorbitalmodell beschrieben. Molekülorbitale erhält man

als Linearkombination der sich verbindenden Orbitale. Bei diesen Linearkombinationen spielt das Vorzeichen von  $\psi$  eine große Rolle, denn zwei unterschiedliche Vorzeichen können  $|\psi|^2$  verkleinern. Man bezeichnet diesen Zustand dann als antibindend, wenn  $|\psi|^2$  größer wird, so bezeichnet man den Zustand als bindend.

In einem schon eher makroskopischen "Molekül", wie einem Halbleiterkristall verbreitern sich dann die bindenden Energiezustände und die antibindenden aufgrund der Menge an Atomen und der Größe des "Molekülorbitals".

Zwischen dem unteren Energieniveau des antibindenden Niveaus (Leitungsband) und dem oberen Energieniveau des bindenden (Valenzband) ist bei Halbleitern eine Energielücke (Gap) von höchstens ca. 3eV vorhanden. Verbindungen mit einer größeren Energielücke leiten so schlecht, daß sie schon zu den Isolatoren gezählt werden. Verbindungen, bei denen das Leitungs- und das Valenzband überlappen nennt man Metalle. Da keine Energie benötigt wird, um Elektronen aus dem Valenz- ins Leitungsband zu heben, sind sie gute Leiter. Im Grundzustand befinden sich alle Elektronen im Halbleiter im Valenzband, durch thermische Energie oder Lichteinstrahlung kann man Elektron in das Leitungsband "heben". Im Leitungsband sind sie nicht mehr gebunden und können sich quasi frei bewegen; daher tragen sie zur Leitfähigkeit bei.

Eine weitere Möglichkeit, Metalle von Halbleitern zu unterscheiden, ist die Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit. In Metallen wird der elektrische Widerstand bei ansteigender Temperatur immer größer, in Halbleitern immer kleiner.

In der Technik finden reine Halbleiter aber selten Verwendung, sie werden eigentlich immer dotiert. Dotieren bedeutet bei Halbleitern aus der vierten Hauptgruppe, daß man einen geringen Anteil von Atomen mit größerer bzw. kleinerer Hauptgruppenzahl in das Kristallgitter einbringt. Dabei nennt man die Dotierungen z.B. wenn 3-wertige Atome ins Gitter gebracht wurden p-dotiert und bei 5-wertigen Atomen n-dotiert. Durch diese Dotierung ändert man sämtliche Energieniveaus sowohl die des Leitungs-, als auch die des Valenzbandes um denselben Wert; die Energielücke bleibt dabei gleich groß. Bei Halbleitern gibt es also neben der "normalen" Leitung von Elektronen auch die Leitung von "positiven Ladungen" sog. Löchern oder Defektelektronen (z.B. Eigenleitung im p-dotierten Halbleiter).

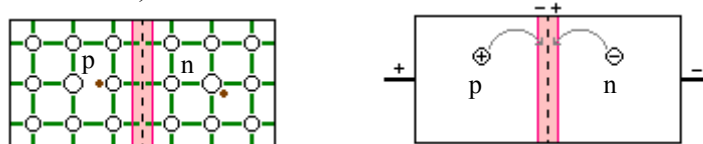


Abb.1a Schemadarstellung eines pn-Überganges und Diode in Durchlaßrichtung

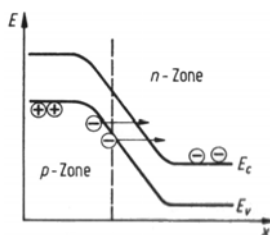


Abb.1b Schema eines PN-Überganges in Bändermodell

Wenn man nun zwei Hälften eines Halbleiters unterschiedlich dotiert, ändert man in dem Halbleiter das Energieniveau unterschiedlich und ein "Gefälle" entsteht. In dem n-dotierten Teil liegt dann ein Überschuß an Elektronen vor und in dem p-dotierten ein Mangel. Diese energetisch ungünstige Aufteilung gleicht sich sehr schnell von alleine aus, wodurch der p-dotierte Teil negativ und der n-dotierte Teil positiv wird. Das elektrische Feld, das dabei ausgebildet wird, begrenzt weitere Ströme. Es hat sich hierbei die sogenannte Raumladungszone (RL-Zone) gebildet. Innerhalb dieser Zone ändert sich das Energieniveau der Bänder proportional zur Spannung. Ein derartiger Halbleiter wird als Diode bezeichnet.

Wenn man nun an der Diode eine Spannung anlegt, dann ändert man die Größe der Raumladungszone. Wird sie kleiner, wird die Diode bei steigender Spannung von einem immer größer werdenden Strom durchflossen; wird sie größer, dann leitet die Diode im Idealfall gar nicht mehr.

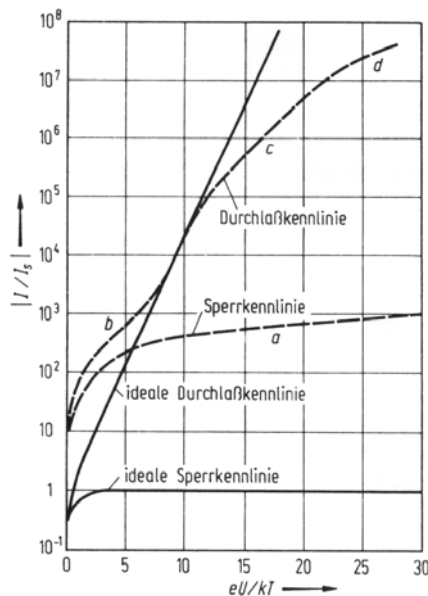


Abb.2 ideale und theoretische Kennlinien einer Si-Diode

Anders ist dies bei der hier verwendeten Zenerdiode, sie weist eine ziemlich hohe Dotierungsdichte auf, weshalb Elektronen in Sperrichtung aus dem Valenzband der p-dotierten Seite ins Leitungsband der n-dotierten Seite tunneln können.

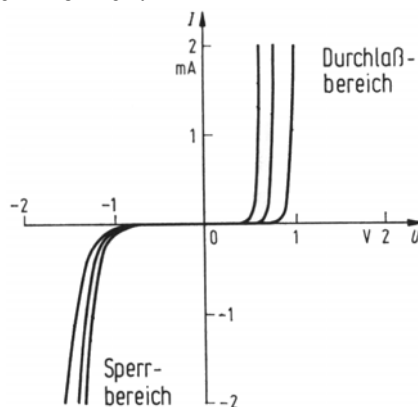


Abb.3 Kennlinien einer Zehnerdiode

Ein Transistor (Beschränkung hier auf einen npn-Transistor) weist drei unterschiedlich dotierte Bereiche auf. Beim npn-Transistor ist ein p-dotierter Bereich zwischen zwei n-dotierten. Die beiden n-dotierten unterscheiden sich dabei entscheidend in der Anzahl der Dotierungsatome pro Volumenelement. Daher unterscheidet man beim Transistor zwischen drei Anschlüssen dem Kollektor, der Basis und dem Emitter. Der Kollektor weist eine um Größenordnungen höhere Dotierungsdichte auf als der Emitter. Die Basis ist p-dotiert.

Nach dem Bändermodell bedeutet dies, daß das Energieniveau des Kollektors unter allen anderen liegt, und das der Basis (die zwischen Emitter und Kollektor sitzt) das höchste ist. Damit von Kollektor zu Emitter ein Strom fließen kann, muß das Energieniveau der Basis gesenkt werden. Dies tut man, indem man dort eine positive Spannung anlegt.

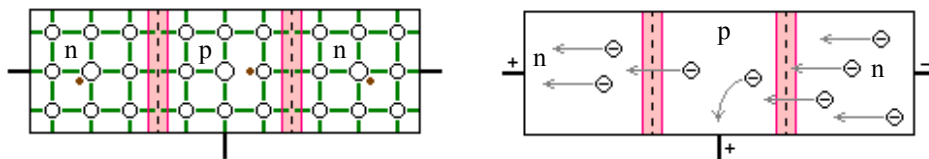


Abb.4 Schemadarstellung eines npn-Transistors und des Stromflusses in diesem.



Abb.5 Schaltsymbol eines npn- Transistors

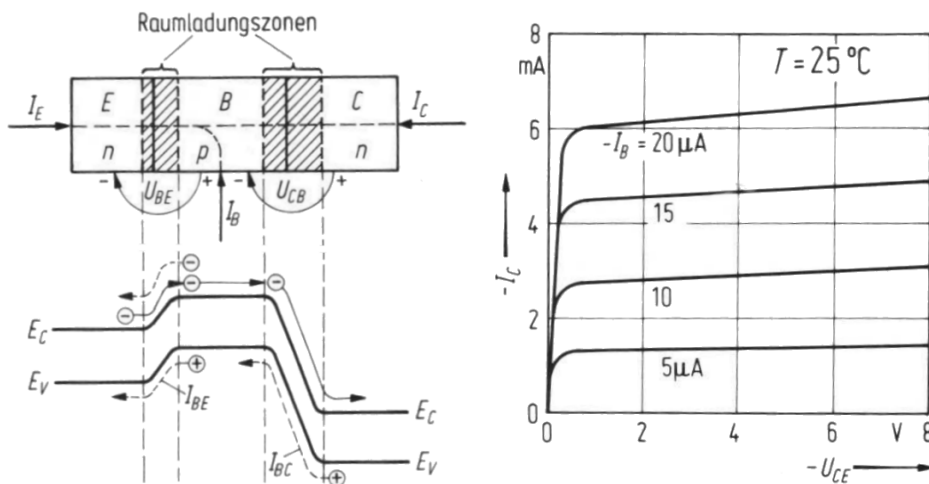


Abb.6 Der npn-Transistor im Bändermodell (links) und 1. Quadrant der Transistorkennlinien (rechts)

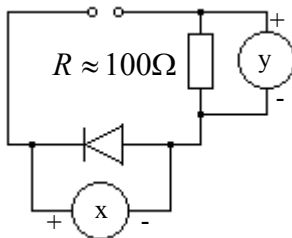
### 3. Aufbau

#### 3.1 Geräteliste

PL-Inventarnummer:

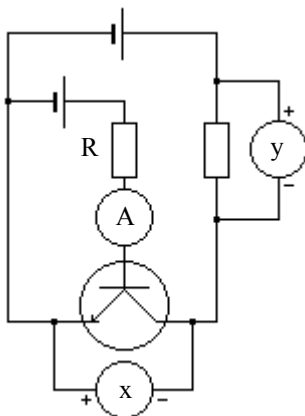
1. Leistungstransistor (npn-dotiert)	Typ: 2N3055	211b
2. Zenerdiode (1V) für Steckbretter		233
3. Netzgerät [30V, 2.5A] (EA 7030-025)		014b
4. Netzgerät [30V, 10A] (EA 7030-100)		015b
5. Digitales Multimeter (FLUKE)		034b
Kabel, Widerstände, Adapter und der Computer		

#### 3.2 Versuchsaufbau



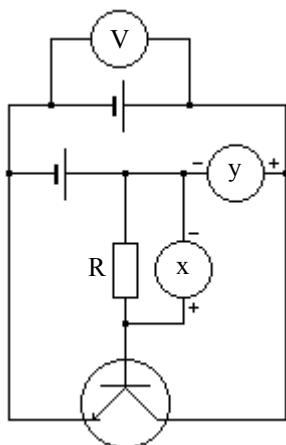
Die nebenstehende Abbildung entspricht unserem Aufbau für die Diodenkennlinien. Die mit x, bzw. y gekennzeichneten Geräte sind "Voltmeter", die auf die x, bzw. y Achse des Kennliniendiagramms gegeben wurden. Konkret wurden die beiden Kabel, an denen die zu messende Potentialdifferenz anlag, an die Meßkarte des Computers angeschlossen

und die Kennliniendiagramme sofort mit LabView aufgezeichnet und dargestellt. Wie in der Durchführung erwähnt, ist darauf zu achten, daß die beiden negativen Anschlüsse der PC-Karte verbunden und geerdet sind, also daher auch im Versuchsaufbau so angeschlossen werden sollten, daß sie das selbe Potential besitzen.



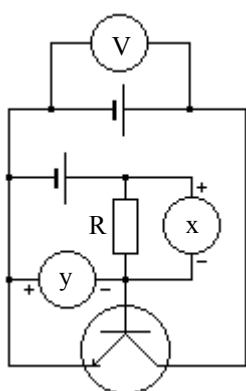
Im ersten Quadranten des Transistor-kennliniendiagrammes ist  $I_C$  über  $U_{CE}$  in Abhängigkeit einiger  $I_B$  aufgetragen. Zur Messung von  $I_B$  wurde das Multimeter verwendet, die anderen beiden Größen wurden mit dem Computer aufgezeichnet.

(Indizes: C = Kollektor, E = Emitter, B = Basis)

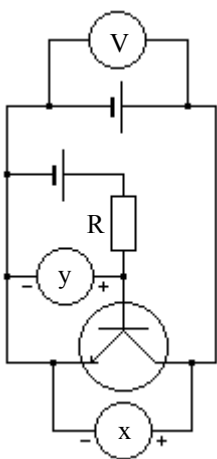


Dies ist der Aufbau, mit welchem wir die Kennlinien im zweiten Quadranten gemessen haben. Im zweiten Quadranten wird  $I_C$  über  $I_B$  in Abhängigkeit der angelegten Spannung gemessen. Zur Spannungsmessung verwendeten wir das Multimeter, die beiden Stromstärken wurden über Widerständen abgegriffen und auf dem Computer aufgezeichnet. Leider ist dieser Aufbau nicht geeignet, um die Abhängigkeit der Kennlinien von der angelegten Spannung zu messen, da für  $I_C$  der Widerstand auf der Kollektor-Basis-Strecke verwendet wurde. Somit wurde

immer die selbe Kurve um eins nach unten verschoben gemessen.



Im dritten Quadranten haben wir  $U_{EB}$  über  $I_B$  in Abhängigkeit von der angelegten Spannung aufgenommen.



Für den vierten Quadranten haben wir  $U_{EB}$  über  $U_{CE}$  in Abhängigkeit von der angelegten Spannung gemessen.



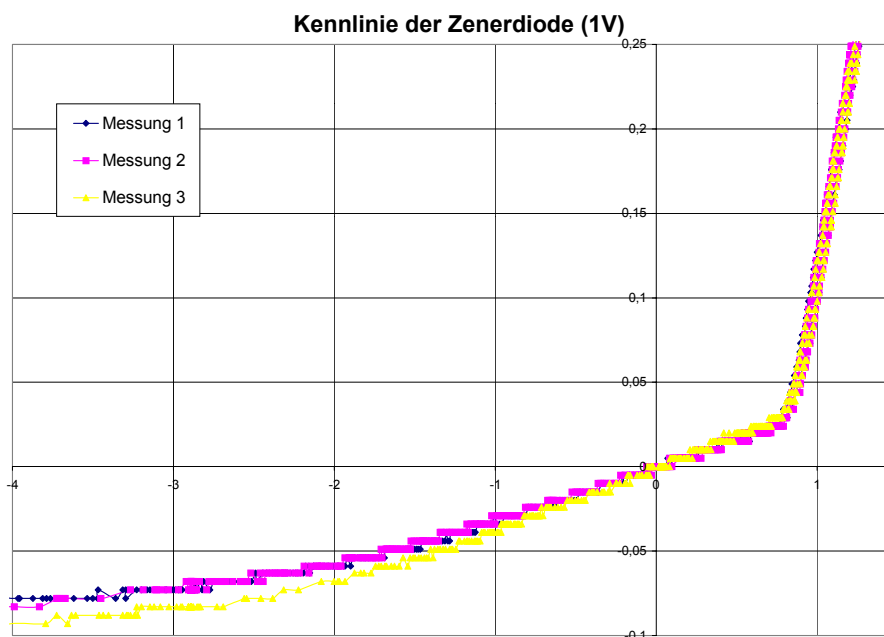
## 4. Durchführung

Wenn man die oben dargestellten Aufbauten für diesen Versuch verwendet, dürfte es eigentlich keine größeren Probleme geben. Man muß sie nur aufbauen, einschalten (auf dem Computer die richtige Software starten) und einmal die Spannung an der oberen Spannungsquelle langsam hoch und dann langsam wieder runter regeln, damit hat man die entsprechende Kennlinie auf dem Monitor.

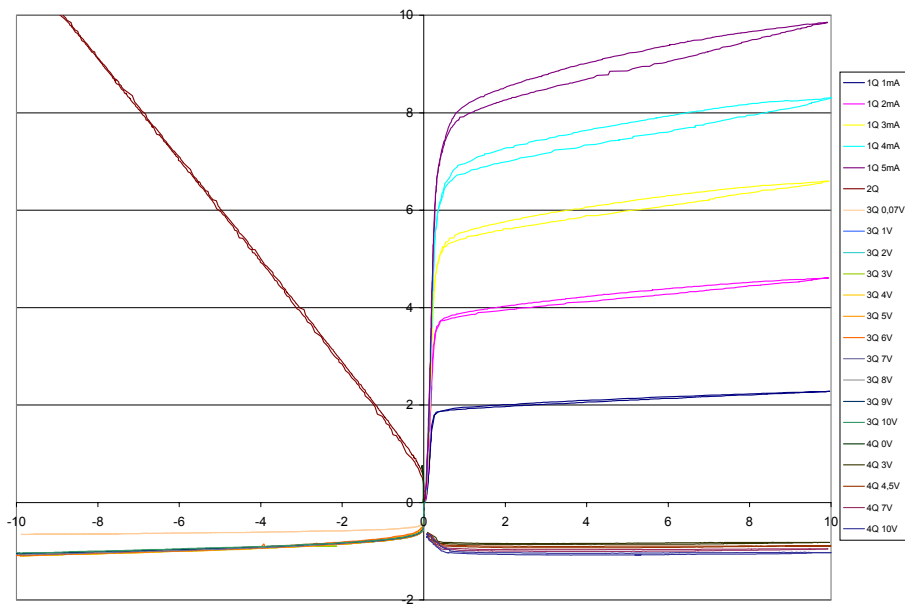
In unserer Gruppe gab es dennoch enorme Probleme bei der Wahl des korrekten Aufbaus, da ständig "unerwartete" Effekte auftraten. Dies lag ganz einfach daran, daß bei der verwendeten PC-Karte alle negativen Anschlüsse miteinander verbunden und geerdet sind und wir somit häufig Kurzschlüsse hatten. Nachdem dieses Problem aber bekannt war, gelang es sehr einfach und schnell viele Kurven aufzunehmen. Dieses Problem sorgte dafür, daß wir zwei Versuchstage mit den Kennlinien beschäftigt waren. Am ersten Versuchstag hatten wir noch eine Germanium- und eine Siliziumdiode durchgemessen, allerdings ergaben sich als Kennlinien jedesmal Ursprungsgeraden in beiden Meßbereichen, was eigentlich nur auf einen Fehler im Aufbau zurückzuführen sein kann. Ob dieser Effekt bei Beachtung der richtigen Polung des Computers auch auftritt ist allerdings nicht sicher, da wir diesen Fehler erst am zweiten Versuchstag bemerkt haben und da nur noch den Transistor durchgemessen haben.

Außerdem ist es wegen des Computerproblems nicht möglich, alle Messungen der entsprechenden Quadranten auch im richtigen Quadranten abzubilden, dazu muß man sich eine entsprechende Invertierung der Meßwerte per Software vornehmen, da man durch einfaches Umpolen der Meßkabel oben erwähnten Kurzschluß verursacht.

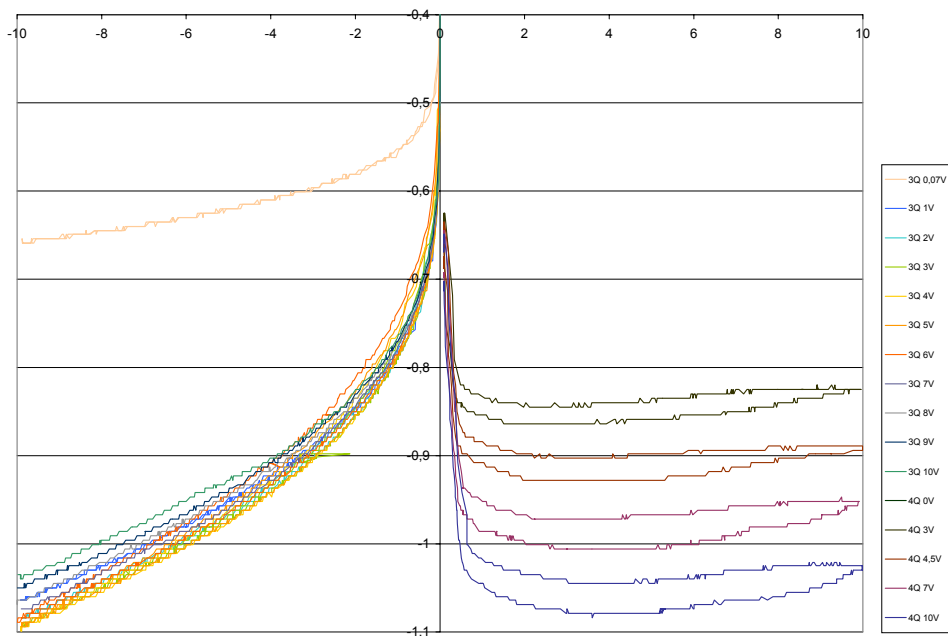
## 5. Auswertung



In obigem Diagramm sind drei Messungen der Kennlinie der Zenerdiode (1V) in Durchlaß- sowie in Sperrichtung dargestellt. Leider ist die Auflösung der PC-Karte in dem hier dargestellten Bereich nicht allzu hoch, daher kann man einige Abstufungen erkennen.



Zur besseren Darstellung wurden hier die Quadranten III und IV gespreizt:



In diesem Diagramm sind einige Kennlinien aller Quadranten aufgetragen. Wie bereits in Aufbau erwähnt, waren alle Graphen im zweiten Quadranten identisch, bis auf eine Verschiebung nach unten um die angelegte Spannung.

Im ersten Quadranten kann man recht gut erkennen, daß bei jeder Messung die Spannung einmal auf und wieder ab gedreht wurde und die entsprechenden Werte nicht immer identisch sind.

Obwohl es normalerweise üblich ist, Meßwerte anzugeben, wird hier darauf verzichtet, da bei diesem Versuch mehr als 1Megabyte ASCII-Meßwerte anfielen.

Außerdem erkennt man recht schnell, daß die Spannungsabhängigkeit im dritten und vierten Quadranten relativ uninteressant ist.

## **6. Resümee**

Eigentlich ein recht einfacher Versuch, aber dennoch hatten wir bei den Transistorkennlinien ziemliche Probleme mit dem Aufbau, da die Messung mit der PC-Karte die Schaltung verändern kann. Wie so oft kann man hier mal wieder sagen, daß eine ganze PL-Gruppe an nur einem Aufbau sicherlich recht unterfordert wirkt.

## **7. Literaturverzeichnis**

Müller, Rudolf; Grundlagen der Halbleiter-Elektronik; Springer-Verlag; 1991; 6. Aufl.  
Müller, Rudolf; Bauelemente der Halbleiter-Elektronik; Springer-Verlag; 1991; 4. Aufl.