

# Quantenmechanik, Tunneleffekt und ein NRO

Unternehmen Sie mit mir eine Reise in die phantastische Welt der Quantenmechanik, lernen Sie Schrödingers Katze kennen und bauen Sie einen besonders frequenzstabilen und oberwellenarmen Negative Resistance Oscillator!

## Schrödingers Katze

Der Physiker Erwin Schrödinger erhielt 1933 zusammen mit Paul Dirac den Nobelpreis für seine Wellenmechanik, eine Interpretation der Quantenmechanik. Sie wurde zur Grundlage aller modernen Naturwissenschaften und ist die wohl aufregendste Disziplin unserer Zeit. Ohne die Quantenmechanik gäbe es keine Laser und keine Halbleiter, keine Supraleiter und keine Molekularbiologie. Transistorradio, Digitaluhr, Mikrocomputer, Walkman oder Handy, nichts davon wäre existent. Die Gründe für den radioaktiven Zerfall und die Vorgänge in der Sonne lägen ohne sie noch immer im Dunkeln.

In der klassischen Physik hat jeder Körper einen bestimmten Ort. In der Welt der kleinsten Teilchen jedoch gelten deren Gesetze nicht mehr – die Vorgänge werden durch Wahrscheinlichkeiten bestimmt. Die Quantenmechanik beschreibt Verhalten und Eigenschaften mikrophysikalischer Systeme. Danach besitzt ein Partikel, beispielsweise ein Elektron, sowohl Teilcheneigenschaften (Energie und Impuls) als auch Welleneigenschaften (Frequenz) und wird so zur Materiewelle. Dabei kann es sich an mehreren Orten gleichzeitig aufhalten, sozusagen als Wolke über den Raum verteilt. Schrödingers Wellenfunktion beschreibt die Wahrscheinlichkeit, das Teilchen an einem bestimmten Ort anzutreffen.

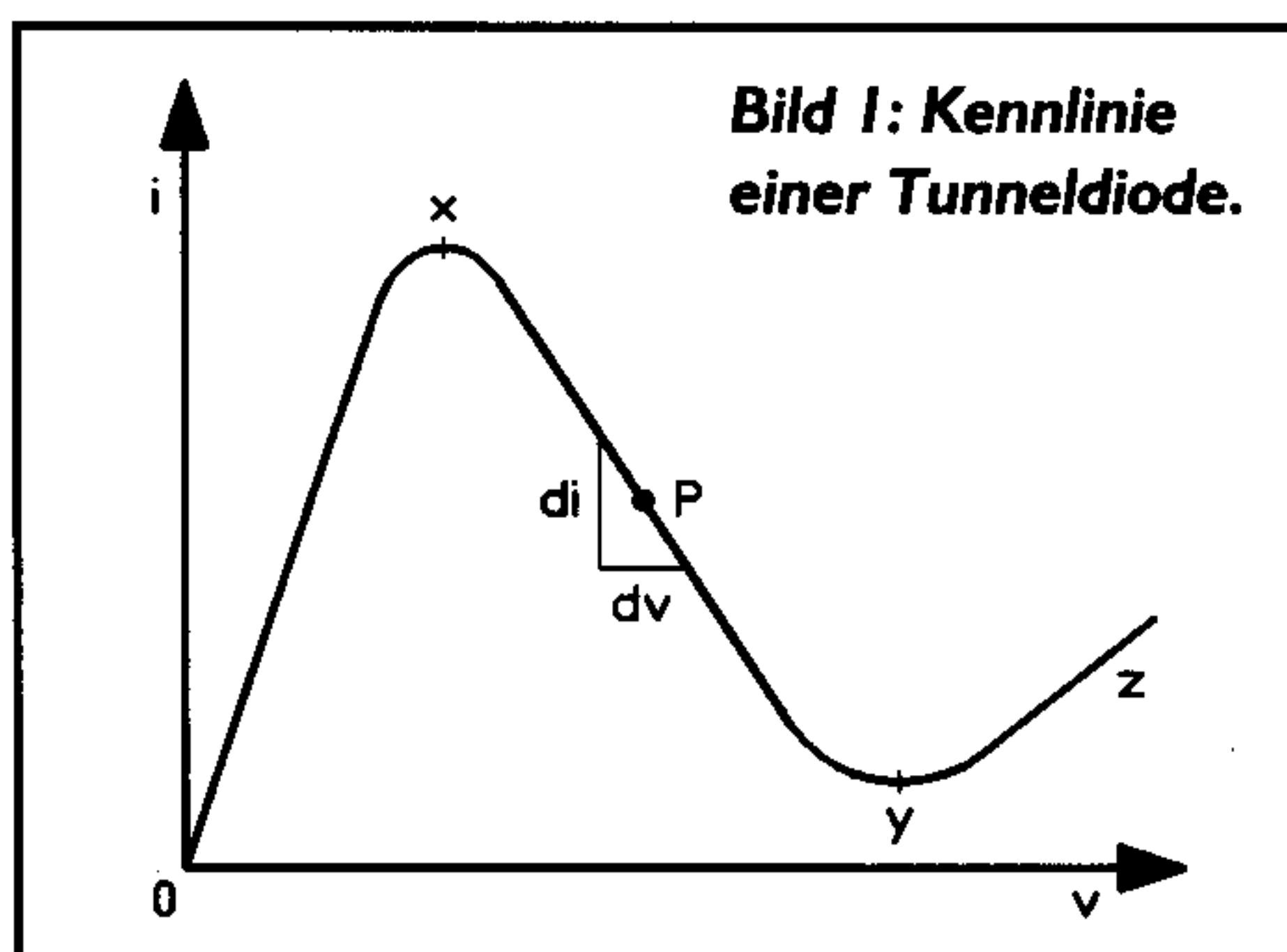


Bild 1: Kennlinie einer Tunneldiode.

Um dieses Phänomen der Nicht-Lokalität perfekt zu machen, scheint sich das Teilchen überhaupt erst dann für einen zufälligen Ort zu entscheiden, wenn wir feststellen wollen, wo es sich gerade aufhält. Eine Welt also, die sich all ihre Wahrscheinlichkeiten solange wie möglich als Option offen hält und schließlich einzig durch die Tatsache der Beobachtung gezwungen wird, eine dann zur Realität werdende Variante zu wählen.

Nach den Gesetzen der Quantenmechanik scheinen aber auch große Körper gleichzeitig mehrere Zustände annehmen zu können, solange niemand diesen Zustand misst. Schrödinger selbst war über die Konsequenzen so beunruhigt, dass er das als „Schrödingers Katze“ bekannte Paradoxon ersann, um die ganze Tragweite zu verdeutlichen. Danach könnte eine Katze gleichzeitig tot und lebendig sein und erst dann in einen eindeutigen Zustand übergehen, wenn sie von jemandem beobachtet wird. So scheint es also in der Quantenwelt keine eigentliche Wirklichkeit, sondern viele mögliche Realitäten zu geben, keine von ihnen mehr oder weniger real als diejenige, die sich schließlich offenbart.

Nicht nur Schrödinger war beunruhigt. „Gott würfeln nicht“, soll Albert Einstein, der die Existenz solcher willkürlicher Quantenwelten nicht akzeptieren wollte, geäußert haben. Und von Niels Bohr, dessen ursprünglich unzulängliches Atommodell erst durch die Quantenmechanik anwendbar wurde, stammt die Aussage „Wer über die Quantentheorie nicht entsetzt ist, der hat sie nicht verstanden“.

## Zeitreise ohne Rückfahrkarte

Doch wohin verschwinden die alternativen Realitäten bei der Messung? Viele Deutungsversuche beschäftigen sich mit dieser Frage, unter anderem die Viele-Welten-Theorie von

Hugh Everett. Demzufolge verschwinden sie überhaupt nicht, sondern Schrödingers Katze ist gleichzeitig lebendig und tot, aber eben in zwei verschiedenen Welten. Vor eine Entscheidung gestellt, hätte sich somit das Universum im Augenblick der Beobachtung eines Quantenprozesses in zwei Kopien seiner selbst aufgespalten, die zu diesem Zeitpunkt mit Ausnahme der Katze in jeder Hinsicht identisch sind, von da an aber getrennte Wege gehen. Gibt es also womöglich neben unserer Realität unzählige andere Welten, die sich seit dem Urknall wie eine Baumstruktur laufend voneinander trennen, zeitlich nebeneinander existieren, aber nicht miteinander verbunden sind?

In solch einem System von Paralleluniversen wäre damit auch theoretisch eine Zeitreise in die Vergangenheit ohne das bekannte Paradoxon denkbar, dass man nachträglich sein eigenes Schicksal verändern könnte. Da alle irgendwie möglichen Dinge in irgendeinem Zweig wirklich geschehen werden, deren Verbindung im Moment einer zukunftsrelevanten Entscheidung jedoch unwiderruflich gekappt wird, kann niemals ein Paradoxon entstehen. Diese Zeitreise wäre übrigens eindeutig, da es nur einen Weg in der Baumstruktur zurück gibt. Der Weg zurück in die ursprüngliche Gegenwart, also die „richtige“ Zukunft, wäre jedoch versperrt, da sich unermesslich viele Wege und somit Versionen der Zukunft bieten und die Wahrscheinlichkeit, auf den richtigen zurückzufinden, gegen 0 geht. Es gibt also keine Rückfahrkarte aus der Vergangenheit!

## Der Tunneleffekt

Eines der faszinierendsten Phänomene der Quantenmechanik ist der mit den Gesetzen der klassischen Physik nicht erklärbare Tunneleffekt: Ein Teilchen, beispielsweise ein Elektron, ist mit kleiner, jedoch endlicher Wahrscheinlichkeit in der Lage, ein Hindernis in Form einer Energie- oder Materiebarriere zu überwinden, obwohl seine kinetische Energie dazu nicht ausreicht. Anstatt die Barriere zu überspringen, „durchtunnelt“ es diese. Um die Sensation perfekt zu machen, bewegt sich das transmittierte Elektron dabei scheinbar mit Überlichtgeschwindigkeit, folglich muss es den Tunnel verlassen, noch bevor es in diesen eintritt. Für einen kurzen Zeitraum scheinen also zwei identische Elektronen zu existieren!

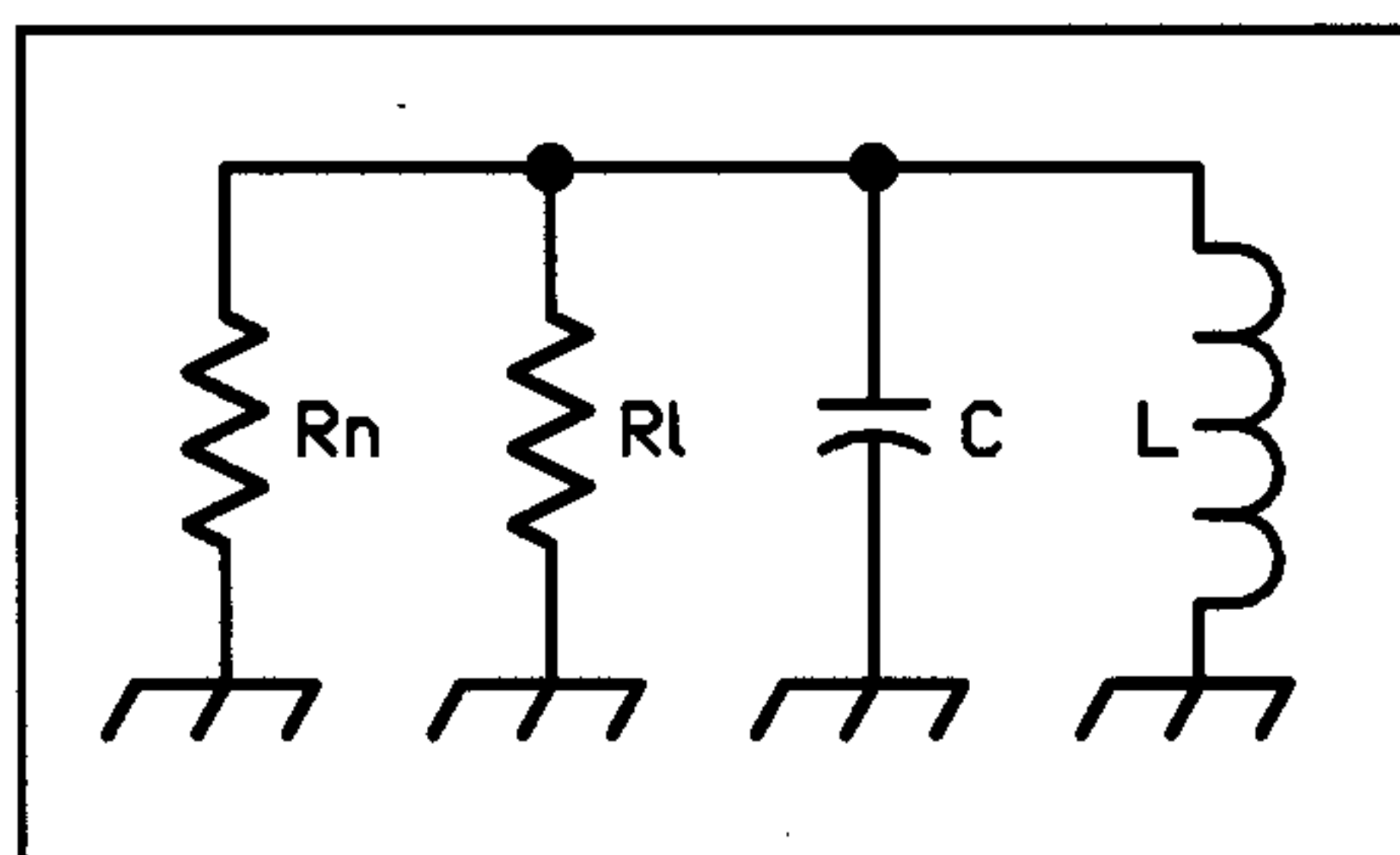


Bild 2: Dem Schwingkreis liegen zwei Widerstände parallel.



Dies lässt sich korrigieren, indem man sich bei Erscheinen des zweiten Elektrons am Tunnelausgang ein drittes daraus entstandenes Elektron aus Antimaterie denkt, das sich nun im Tunnel rückwärts bewegt, um schließlich am Eingang mit dem eintretenden ersten Elektron zu verschmelzen. Auf diese Weise existiert effektiv zu jedem Zeitpunkt nur ein einziges Elektron, das plötzlich auf der anderen Seite des Tunnels erscheint, ohne diesen offensichtlich je selbst räumlich durchquert zu haben. Jedenfalls scheint es auf seinem Weg durch den Tunnel negative kinetische Energie zu besitzen, und es verlässt diesen mit derselben Energie, die es beim Eintritt besaß.

Nach Einsteins spezieller Relativitätstheorie ist Überlichtgeschwindigkeit unmöglich, und dieses Postulat sorgt zumindest bezüglich physikalischer Prozesse für eine logisch gefügte Welt, da überall im Universum unabhängig vom Beobachter Einigkeit über die Reihenfolge von Ursache und Wirkung herrscht. Überlichtgeschwindigkeit hieße beispielsweise, eine Botschaft erreicht den Empfänger, noch bevor sie abgeschickt wird. Folglich könnten wir Nachrichten aus der Zukunft empfangen. Denken Sie ruhig über die möglichen Konsequenzen nach, bevor Sie weiterlesen! Und vergessen Sie nicht, dass es womöglich viele mögliche Versionen der Zukunft gibt!

Die experimentellen Ergebnisse hinsichtlich Überlichtgeschwindigkeit beim Tunneleffekt selbst sind kaum umstritten, jedoch ihre Interpretation. So dürfen in Konformität mit der Relativitätstheorie bestimmte Geschwindigkeiten, wie beispielsweise die Phasen- oder Gruppengeschwindigkeit, die Lichtgeschwindigkeit durchaus überschreiten. Die Geschwindigkeit des Signalanfangs jedoch, also des ersten Anzeichens dafür, dass überhaupt eine Welle kommt, muss immer kleiner sein als die Lichtgeschwindigkeit. Und in keinem Experiment lag diese gemessene Frontgeschwindigkeit bisher über der Lichtgeschwindigkeit. Die Relativitätstheorie wird also durch den Tunneleffekt nicht widerlegt.

Lassen Sie uns von der kurzen aber spannenden Exkursion in die Quantenwelt zurückkehren in die Realität der Funktechnik und zwar mit einem wertvollen Souvenir im Gepäck ...

## Die Erfindung von Leo Esaki

Falls Sie das alles für unmöglich halten und dabei eher an Science Fiction denken, möchte ich Sie nun mit einem real existierenden elektronischen Bauteil bekannt machen, das auf dem Tunneleffekt basiert.

1957 gelang dem Japaner Leo Esaki bei den Sony Research Laboratories eine revolutionäre Erfindung: das erste Halbleiterbauteil, das den Tunneleffekt ausnutzt, eben die Tunnelodiode. Esaki erhielt dafür 1973 zusammen mit zwei Kollegen den Nobelpreis.

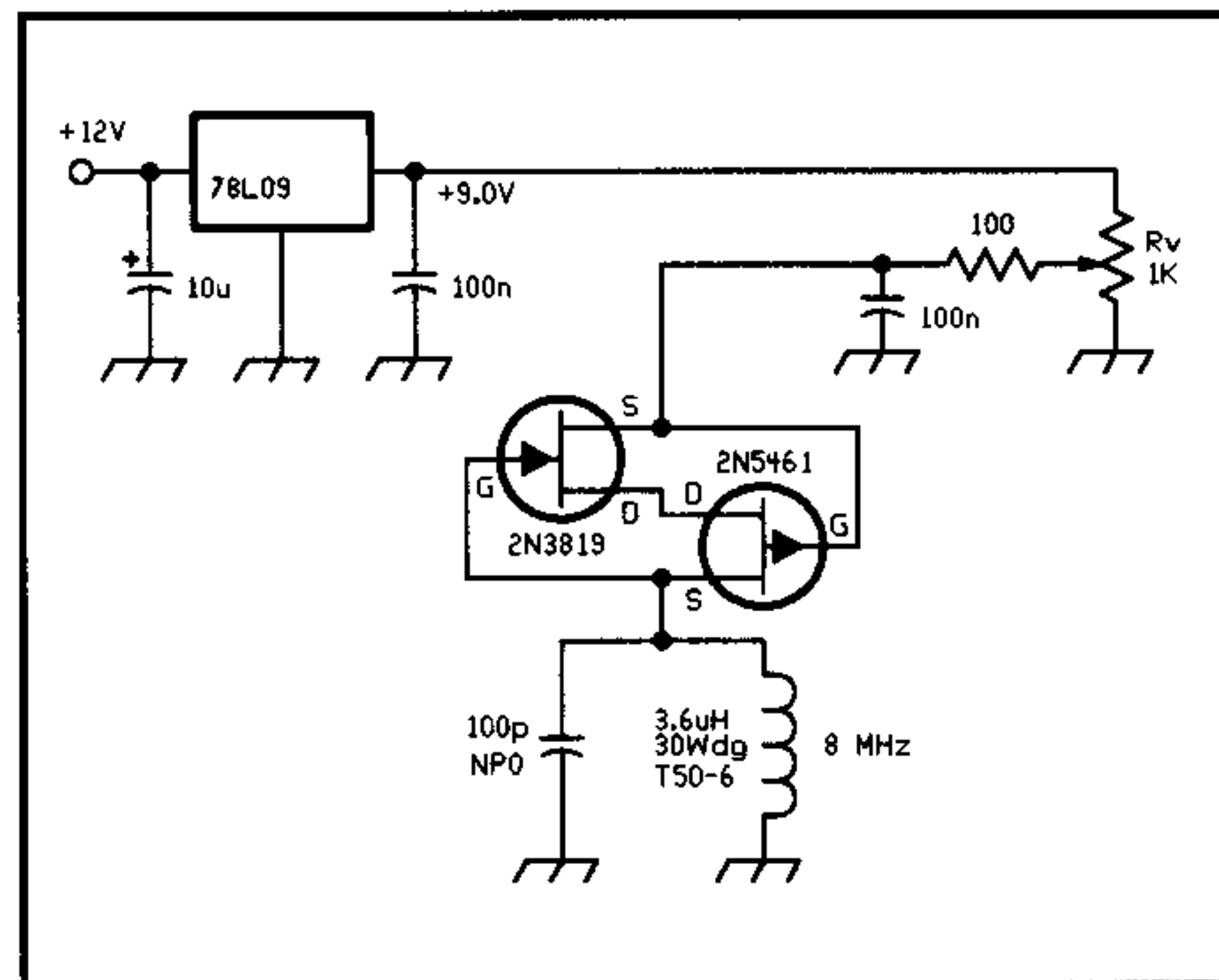


Bild 3: Schaltung des NROs mit zwei FETs.

Die Tunnelodiode besteht aus hochdotiertem pn-Material mit sehr schmaler Sperrschicht. Sie besitzt keine Gleichrichtereigenschaften, präsentiert aber durch den quantenmechanischen Effekt einen negativen differentiellen Widerstand. Um das zu verstehen, betrachten wir in Bild 1 ihre typische Kennlinie. Der Gleichstromwiderstand  $R_s = v/i$  ist immer positiv, daher absorbiert die Diode bei jeder Gleichspannung Gleichleistung. Der differentielle Widerstand entsprechend dem Differentialquotienten  $R_d = dv/di$ , also der Kennliniensteigung, ist positiv in den Bereichen 0-x und y-z, jedoch negativ im Bereich x-y. Somit nimmt dort bei Erhöhung der Spannung der Strom ab. Dies ist die wichtigste und am meisten genutzte Eigenschaft der Tunnelodiode, die damit sehr vielseitig als Verstärker, Oszillator oder Schalter eingesetzt werden kann. Anwendungen auf sehr hohen Frequenzen sind möglich, da der Tunneleffekt extrem schnell ist.

## Ein ungewöhnlicher Oszillator

Wird die Diode durch entsprechende Wahl der Betriebsspannung  $v$  im Arbeitspunkt P betrieben, stellt sich der Ruhestrom  $i$  ein.  $R_d$  ist hier negativ und soll daher  $R_n$  heißen. Ein an die Diode angeschlossener Resonator „sieht“ einen negativen Widerstand – die Diode arbeitet somit als Verstärker.

Unter bestimmten Voraussetzungen können sich nun ungedämpfte Schwingungen entwickeln, und aus dem Verstärker wird ein Oszillator.

Hierzu wird ein Parallelschwingkreis aus C und L über die Diode ( $R_n$ ) gelegt. Der Schwingkreis-Verlustwiderstand  $R_l$  wird durch die Parallelschaltung von  $R_s$  mit  $R_u$  gebildet ( $R_s = v/i =$  Gleichstromwiderstand der Diode,  $R_u = 6,28 \times f \times L \times Q_u =$  Resonanzwiderstand des Schwingkreises).

Bild 2 zeigt das durch Zusammenschaltung von Diode und Schwingkreis entstandene Ersatzschaltbild. Es repräsentiert den elementaren Negative Resistance Oscillator, kurz NRO. Der Realteil R ist die Parallelschaltung von  $R_n$  und  $R_l$ . Durch thermisches Rauschen werden gedämpfte Schwingungen angestoßen. Ist  $R_n$

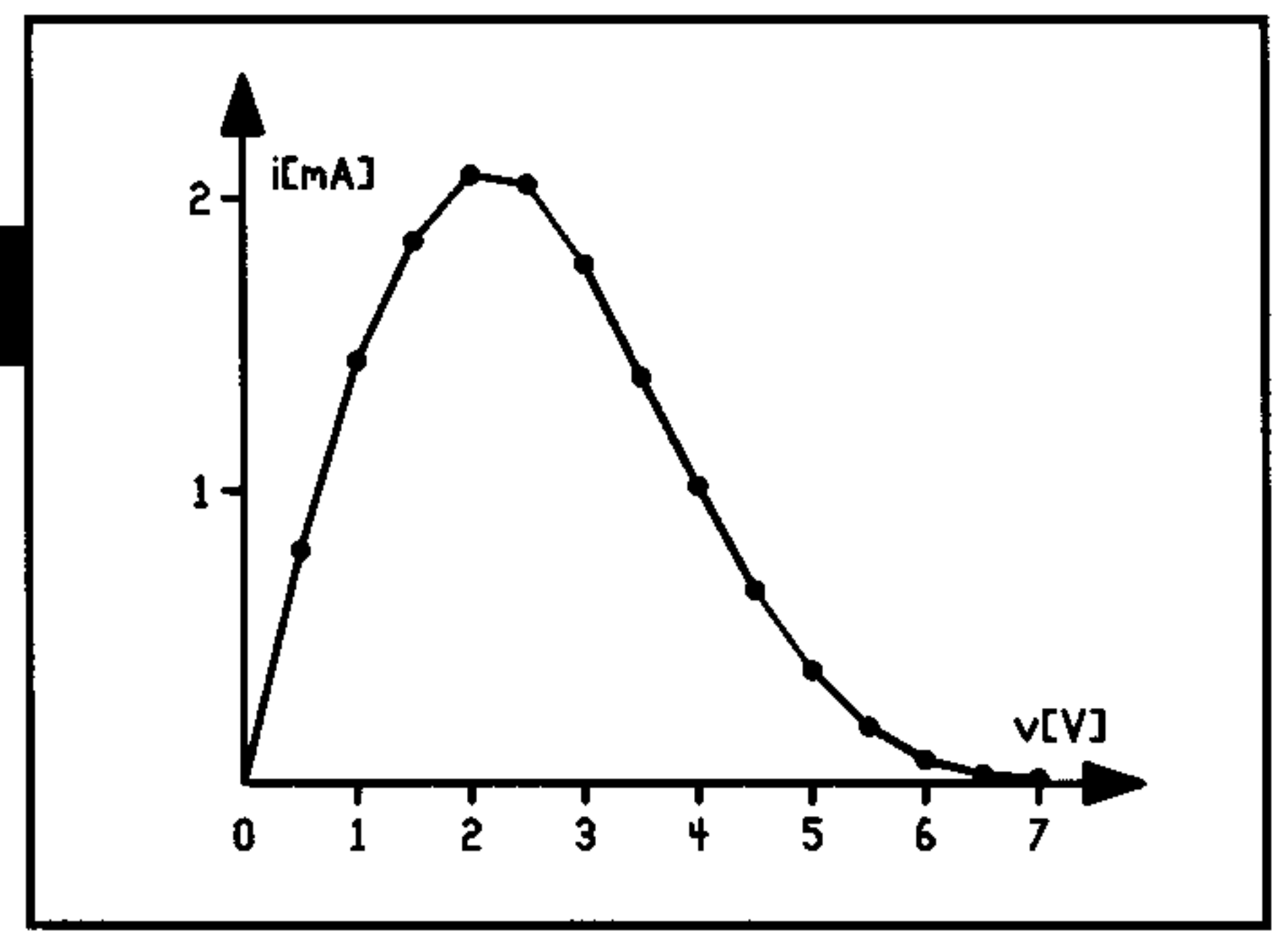


Bild 4: Strom-Spannungs-Kennlinie der Lambdadiode.

Wertetabelle				
U in V	f in kHz	U <sub>HF</sub> in V <sub>SS</sub>	df in Hz	OI dB
2,5	8.038	2	+600	29
5	8.082	4,5	+130	35
7	8.104	6	+120	39
9	8.119	8	+145	42

betragsmäßig kleiner als  $R_l$ , so ist R negativ, und es entstehen ungedämpfte Schwingungen.

Bemerkenswert ist, dass die Tunnelodiode als Verstärker einen Zweipol darstellt, Ein- und Ausgang folglich an einem Port kombiniert sind. Daher wird auch keine Rückkopplungs(schaltung) benötigt.

Bei konsequenter Anwendung dieses Modells müsste bei ständig wachsender Amplitude auch die im Resonator zirkulierende Energie anwachsen, was natürlich dauerhaft unmöglich ist. Wie also wird die Amplitude begrenzt?

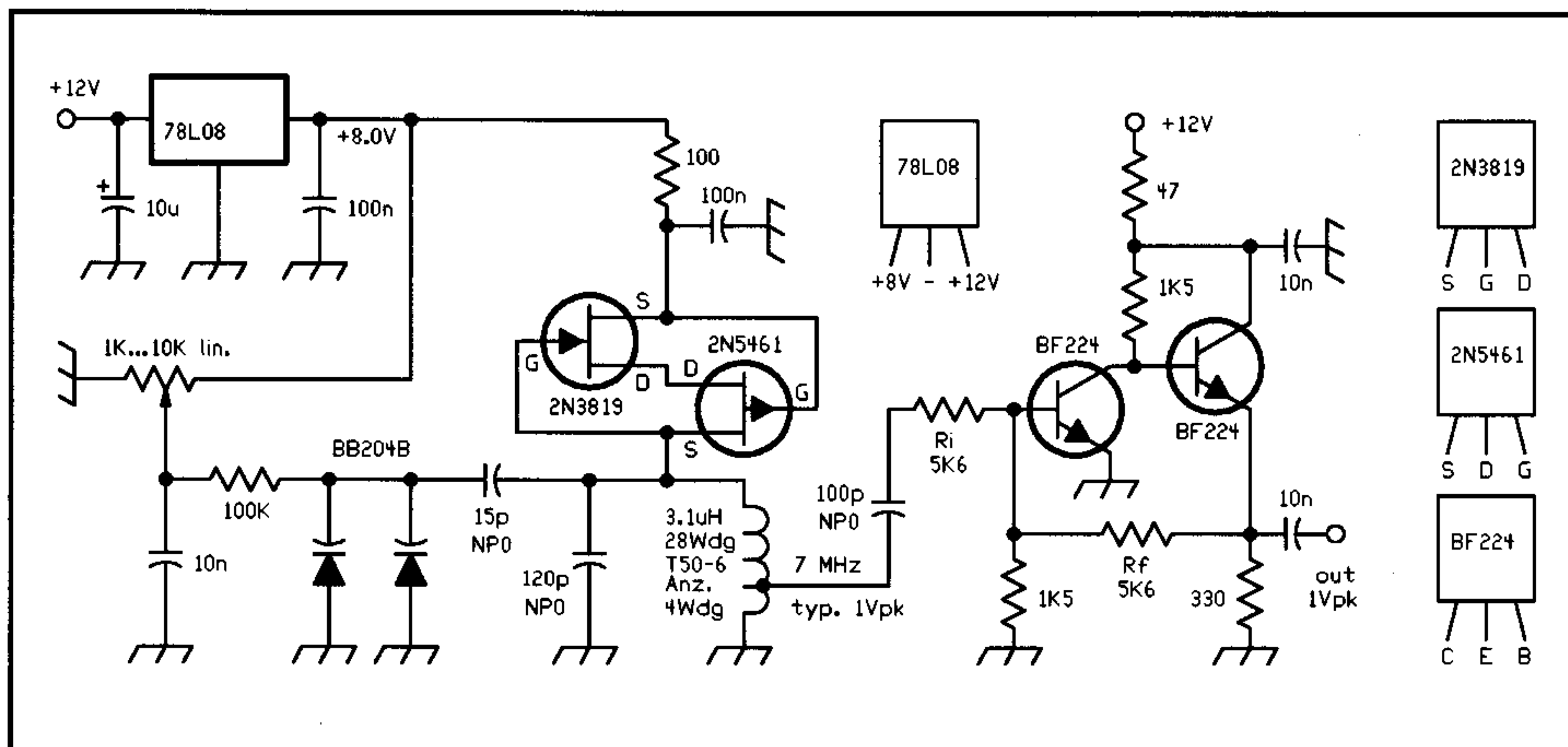
Die Diode liefert zunächst mehr Leistung als absorbiert wird, und daher steigt die Amplitude. Dabei nähern sich jedoch die Signalspitzen immer weiter den Punkten x und y, wo die negative Steigung der Kennlinie gegen 0 geht. Mit gleichzeitig steigendem Betrag von  $R_n$  jedoch sinkt die gelieferte Leistung. Außerhalb des Bereiches negativen Widerstands wird wieder Leistung absorbiert. Die Amplitude steigt also, bis ein Gleichgewicht zwischen zugeführter und in den einzelnen Verlustwiderständen absorbiert Leistung herrscht und bleibt dann stabil. Also auch hier wieder ein genial-einfacher Prozess! Daher liefert der NRO automatisch immer nur gerade soviel Energie, wie zur Aufrechterhaltung der Schwingungen benötigt wird. Frequenzdrift und Oberwellengehalt sind somit wesentlich geringer als bei herkömmlichen (begrenzenden) Oszillatoren.

Auf Klärung wartet allerdings noch die Frage, wie stark die Rauschseitenbänder im Vergleich zu konventionellen Oszillatoren ausgeprägt sind und welches der prinzipiell rauschärmere Oszillatortyp ist. Vielleicht finden sich interessierte Leser mit geeigneten Messmitteln, die sich dieser Aufgabe stellen wollen.

## NRO mit Lambdadiode

Tunnelioden wurden inzwischen durch modernere und leistungsfähigere Halbleiterbauteile, wie Gunn- und IMPATT-Dioden, abgelöst. Heute sind sie kaum noch erhältlich und werden teilweise schon als Raritäten gehan-





**Bild 5: Eine einfache VFO-Schaltung mit überraschend guten Daten.**

delt. Übrigens hatte Heathkit in den 60er Jahren ein Dip-Meter im Programm, das mit einer Tunnelodiode im Oszillator arbeitete.

Eine negative Widerstandskennlinie lässt sich jedoch auch durch die Kombination von p- und n-Kanal-Sperrschicht-FETs realisieren, wobei die Drains miteinander und das Gate jeweils mit der Source des anderen verbunden sind. Diese Schaltung erschien bereits im März 1963 in den „IEEE Transactions on Circuit Theory“. G3MYM hat 1980 in „The Short Wave Magazine“ die Schaltung eines NROs mit dieser sogenannten Lambdadiode publiziert. Sie absorbiert extrem wenig Verlustleistung, und folglich wirken sich die Temperaturkoeffizienten der FETs kaum aus. Deshalb eignet sie sich hervorragend zum Aufbau eines sehr einfachen und trotzdem besonders frequenzstabilen und oberwellenarmen Oszillators.

G3MYM beschreibt die Funktion der Lambda-Diode folgendermaßen: Gate und Source beider FETs liegen parallel über der Betriebsspannung, ihre Kanäle liegen dabei in Serie, und folglich muss der Strom durch beide gleichgroß sein. Lässt man die Betriebsspannung von 0 ansteigen, dominiert zunächst die ebenfalls steigende Drain-Source-Spannung, und der Strom steigt. Schließlich wird die sinkende Leitfähigkeit des Kanals zum signifikanten Faktor, und eine weitere Erhöhung der Betriebsspannung führt zu sinkendem Strom (negativer Widerstand), bis dieser faktisch 0 wird. Die mathematische Analyse zeigt, dass der negative Widerstand bei einer Betriebsspannung von etwa  $(|V_{p1}| + |V_{p2}|)/3$  beginnt und bei  $|V_{p1}| + |V_{p2}|$  endet. Dabei steht  $V_p$  für die Pinch-off- bzw. Abschnür-Spannung des jeweiligen FETs.

Bild 3 zeigt meine Version dieses NROs. Zur Aufnahme der Kennlinie (Bild 4) wurde zunächst die Spule überbrückt, damit der Oszillator nicht anschwingen kann. Bei 2 V über der Lambdadiode liegt das Strommaximum 2,1 mA, rechts davon erstreckt sich der Bereich negativen Widerstands. Bei 7 V fließen nur noch 400 nA. Jetzt wird auch klar, wie der

Name entstand: wegen der Ähnlichkeit der Kennlinie mit dem griechischen Buchstaben  $\lambda$ .

## Einstellung des Arbeitspunkts

Je höher die Belastung des Schwingkreises wird, umso mehr sinkt die Betriebsgüte, und umso mehr Verlustleistung (Wärme) wird freigesetzt. Das schadet der Frequenzstabilität zumindest in der Einlaufphase. Daher sollten die Induktivität hohe Güte und nachfolgende Stufe hohen Eingangswiderstand haben.

Auch der Arbeitspunkt wirkt sich auf die Belastung des Schwingkreises aus. Im Gegensatz zur Tunnelodiode geht der Strom für hohe Spannungen gegen 0 und die Verstärkung gegen 1. Legt man den Arbeitspunkt in diesen flach auslaufenden Bereich, wird zumindest während der positiven Halbwelle der Schwingkreis nicht belastet. Daher extrem niedrige Verlustleistung und hohe Frequenzstabilität. Mit ansteigender negativer Halbwelle wird der Betrag von  $R_n$  kleiner, die Diode liefert Leistung an den Schwingkreis. Ab hier wirken sich nun auch die FET-Temperaturkoeffizienten auf die Frequenz aus. Wird schließlich der Bereich positiven Widerstands erreicht, gibt der Schwingkreis Leistung an die Diode ab, die jetzt als niederohmige Last wirkt. Beim Durchfahren der gesamten Kennlinie wäre, da ihre Flanken fast symmetrisch sind, die Leistungsbilanz ziemlich ausgeglichen. Bei kleiner zusätzlicher Belastung ist daher zu erwarten, dass die Schwingung die Betriebsspannung fast vollständig pro Halbwelle ausnutzt.

Je weiter man den Arbeitspunkt nach rechts legt, umso kürzer wird der Tankkreis von der Diode belastet und umso besser müsste die Frequenzstabilität werden. Dabei steigt jedoch auch die Signalamplitude, quadratisch hierzu also die Wärmeleistung. Dieser Faktor wird irgendwann dominant, und die Stabilität nimmt wieder ab. Die unlineare Kennlinie erzeugt umso mehr Verzerrungen, je höher der Gradient der Kennliniensteigung, also der Wert ihrer zweiten Ableitung. Dies ist der Bereich der

Kuppe, also der Übergang vom negativen in den positiven Widerstand. Je weiter rechts der Arbeitspunkt auf der Kennlinie liegt, umso kürzer wird dieser Bereich durchfahren und umso niedriger ist der Oberwellengehalt. Man wird also die Betriebsspannung auf maximale Frequenzstabilität abgleichen. Der Oberwellengehalt könnte dann durch Erhöhen der Spannung noch weiter abgesenkt werden, allerdings auf Kosten der Stabilität.

## Die Startphase

Die von der Lambdadiode gelieferte Leistung geht also mit steigender Betriebsspannung gegen 0. Legt man den Arbeitspunkt zu hoch, kann daher keine Schwingung entstehen.

In der Mitte der nach rechts abfallenden Flanke der Kennlinie ist der Betrag des negativen Widerstands am kleinsten, also die von der Diode gelieferte Energie am größten. Betreibt man das System für kurze Zeit in diesem Bereich, entwickelt sich eine Schwingung, deren Amplitude sich schnell stabilisiert. Jetzt kann man den Arbeitspunkt weiter nach rechts schieben, da die Schwingung durch ihre große Amplitude eine entsprechend große „Reichweite“ hat und sich bei jeder negativen Halbwelle aus dem Bereich kleinen negativen Widerstandes mit genügend Energie versorgen kann, um sich selbst zu erhalten. Die Amplitude wächst mit der Betriebsspannung bis zum Maximalwert. Das RC-Glied 100 Ohm/100 nF hat also eine wichtige Aufgabe zu erfüllen: Durch seine Zeitkonstante steigt die Spannung über der Diode langsam an.

## Der NRO auf dem Prüfstand

Der NRO wurde für folgende Messungen im Testaufbau nur mit provisorischer Abdeckung betrieben. Die Spannung wurde mit  $R_v$  langsam hochgedreht. Der Schwingungseinsatz erfolgt abrupt bei 2,5 V. Die Tabelle zeigt die Ergebnisse bei vier Betriebsspannungen (U) mit Startfrequenz (f), HF-Spannung über dem Schwingkreis ( $U_{HF}$ ), Frequenzdrift zwischen zehnter Sekunde und zehnter Minute (df) und Unterdrückung der ersten Oberwelle (O1). Optimale Frequenzstabilität wird bei etwa 7 V erreicht. Die Spitzenspannung über dem Schwingkreis ist dabei weitgehend unabhängig von den Komponenten und liegt etwas unter der Betriebsspannung. Durch diese ungewöhnlich hohe Amplitude kann die Anzapfung sehr tief gelegt werden, und die nachfolgende Stufe belastet den Schwingkreis nur unwesentlich.

Übrigens kann man dank der hervorragenden Amplitudenregelung den Tastkopf des Oszilloskops direkt auf das „heiße“ Ende des Schwingkreises legen, ohne dass sich die Kurvenform maßgeblich ändert.

Die überschlägige Rechnung ergibt Folgendes: Der Ringkern Amidon T 50-6 wird



mit  $Q = 250$  bei 8 MHz spezifiziert, der Resonanz- bzw. Verlustwiderstand beträgt also  $6,28 \times f \times L \times Q = 45 \text{ k}\Omega$ . Der statische Widerstand, gemittelt über eine Schwingung, liegt bei hoher Betriebsspannung im Megaohmbereich und ist daher vernachlässigbar.

Trotz einfachstem Aufbau ist das Ausgangssignal außerordentlich stabil und sauber. Der NRO ist damit eine ideale Basis für den Bau hochwertiger VFOs.

### Vom NRO zum NRVFO

Bild 5 zeigt die Schaltung eines 7-MHz-VFOs für einen QRP-Transceiver.

Versuche haben ergeben, dass die Kennlinie der Lambdadiode gut reproduzierbar ist. Daher wurde auf die Möglichkeit der Einstellung des Arbeitspunkts verzichtet. Das FET-Paar 2N3819/2N5461 arbeitet sehr frequenzstabil und oberwellenarm. Es können auch andere HF-taugliche FETs eingesetzt werden, die ähnliche Abschnürspannungen besitzen.

Will man das Optimum herausholen, ist eine spezifische Anpassung der Betriebsspannung unerlässlich.

Dem Oszillator folgt ein „Feedback-Buffer“, der sich wie ein Operationsverstärker verhält und von Wes Hayward, W7ZOI, publiziert wurde. Zur Funktionsweise nur so-

viel: Der Eingangswiderstand ist gleich  $R_i$  und damit praktisch unabhängig von den Transistorparametern. Die Spannungsverstärkung ist gleich  $-R_f/R_i$ . Für linearen Betrieb darf der Spitzensignalstrom nicht größer sein als der Ruhestrom des zweiten Transistors. Dieser ist auf 10 mA eingestellt, somit ergibt sich für 100 Ohm Lastwiderstand maximal 1 V Spitzenspannung. Der Innenwiderstand ist sehr klein. Damit dieser Puffer ordentlich arbeitet, müssen unbedingt „echte“ HF-Transistoren verwendet werden. Die Betriebsspannung sollte halbwegs stabil sein.

Die Frequenzeinstellung erfolgt über ein lineares Zehngang-Präzisionspoti 1 bis 10 kOhm. Der Koppelkondensator bestimmt zusammen mit der Diodenkapazität den Frequenzbereich, hier 7.000-7.050 kHz. Beide bilden einen Spannungsteiler und der Quotient ihrer Werte sollte weit unter 1 liegen. Damit liegt nur ein Bruchteil der HF-Spannung über der Varicap, was Verzerrungen verringert, und es wird eine Temperaturkompensation der Varicap unnötig. Ihre Einzeldioden haben hier eine mittlere Kapazität von ca. 40 pF ( $15 \text{ pF}/80 \text{ pF} = 0,19$ ).

Folgende Punkte sollten beim Aufbau des VFOs unbedingt beachtet werden:

- auf hohe mechanische Stabilität achten
- nur erstklassige Bauteile verwenden

- VFO-Gehäuse möglichst gut wärmeisolieren
- Mit NP0 (Kennfarbe Schwarz) gekennzeichneten Cs sind hochwertige Styroflex-, Glimmer-, oder Keramikttypen.
- Induktivität einlagig mit möglichst starkem Kupferlackdraht auf einen Amidon-Ringkern Mix 6 (gelb) wickeln
- $X_L$  sollte ca. 150 Ohm betragen.
- Niemals Trimmer verwenden! Sie sind meist mechanisch instabil und haben ein schlechtes Temperaturverhalten. Besser zwei Lötstifte für Kombination kleiner Keramik Kondensatoren vorsehen.

**Karl Fischer, DJ5IL**  
E-Mail: [DJ5IL@aol.com](mailto:DJ5IL@aol.com)

#### Literatur

- [1] John Gribbin: Auf der Suche nach Schrödingers Katze – Quantenphysik und Wirklichkeit, Serie Piper, 1999
- [2] R. W. Micklewright, G3MYM: The Lambda Diode VFO, The Short Wave Magazine, Sep. 1980, S. 421
- [3] P. Hawker, G3VA: The lambda-diode nro, RadCom (RSGB), Nov. 1980, S. 1.156f
- [4] Krauss, Bostian, Raab: Solid State Radio Engineering, John Wiley & Sons, 1980
- [5] Wes Hayward, W7ZOI: Radio Frequency Design, ARRL 1994
- [6] The ARRL Handbook for Radio Amateurs 1991
- [7] Radio Communication Handbook, 5th edition, RSGB, 1984