

Halbleiterdiode

Aufgabenstellung

1. Messtechnische Ermittlung der Strom-Spannungscharakteristik einer Gleichrichterdiode.
 - a) in Durchlassrichtung
 - b) in Sperrrichtung
2. Automatisierte Aufnahme der Strom-Spannungscharakteristik einer Zenerdiode in Durchlass- und Sperrrichtung.
3. Messtechnische Untersuchung von Spannungs- und Stromverläufen in einer Einweg-Gleichrichterschaltung mit unterschiedlichen Glättungskondensatoren und Belastungswiderständen
4. Option: Messtechnische Untersuchung von Spannungsverläufen in einer Spannungsverdoppler-Schaltung.

Hinweise

Die Außenleiter (Schirmung) der BNC-Eingangsbuchsen eines Oszilloskops sind in der Regel intern miteinander und mit der Schutzerde des Netzanschlusses verbunden. Dies gilt auch für BNC-Buchsen eines Funktionsgenerators. In den Schaltbildern ist dies durch strichpunktisierte Linien und dem Erdungszeichen PE gekennzeichnet. Da es in den Schaltungen nur **ein** Bezugspotential – jenes mit dem Symbol 0V – gibt, ist dieses durch eine Leitung mit PE zu verbinden – siehe **rot punktierte Kennzeichnung** in den Schaltplänen.

Verwenden Sie für die Messungen mit dem Oszilloskop Laborkabel und BNC-4mm-Bananenbuchsen-Adapter. Die oben erwähnte Verbindung des Außenleiters der BNC-Eingangsbuchse mit dem Bezugspotential der Schaltung erfolgt über die schwarze Buchse **eines** Adapters. Bei Verwendung von Tastköpfen mit den aufgesteckten Prüf-Clips zur leichteren Umfassung der Bauteilanschlüsse kann diese Verbindung über **eine** Erdklammer **eines** Tastkopfes erfolgen.

Die mit dem Oszilloskop zu messenden Größen sollen als „single-shot“ gespeichert und über die USB-Schnittstelle als ASCII-Datenfile (.csv) in ein Speichermedium (USB-Stick) übertragen werden. Die Auswertung soll mit einem geeigneten Programm (z. Bsp. Excel oder QtiPlot) erfolgen.

Falls erforderlich oder auch nur für Dokumentationszwecke können „screen-shots“ der gespeicherten Messungen angefertigt und in gleicher Weise als Bild (.bmp oder .png) in ein Speichermedium übertragen werden.

Als Signalquelle dient bei den Aufgaben 2 bis 4 die Sekundärwicklung eines Standard-Transformators TR1. Diese liefert eine Nennspannung von ca. 12V_{eff} und ist durch eine zusätzliche Leistungselektronik vor Überlastung und Kurzschluss geschützt. Der maximale Strom wird dadurch auf ca. 500 mA_{Spitze} begrenzt.

Ein Kondensator verliert nach dem Abstecken bzw. Ausschalten der elektrischen Versorgung seine zuletzt gespeicherte Ladung mitunter nur langsam (Entladezeitkonstante τ). Zur Vermeidung einer lange vorhandenen Restspannung zwischen den Elektroden ist er in diesem Fall mit einem 100Ω-Widerstand manuell zu entladen.

Bei dieser Übung werden Elektrolyt - Kondensatoren verwendet. Achten Sie auf die **Polarität**

der Elektroden (**Pluspol = rote Klemme**) bei der Verwendung in der Schaltung!
Achtung – Explosionsgefahr!

Widerstandswerte: $10R = 10\Omega$, $15R = 15\Omega$, $100R = 100\Omega$, $1k5 = 1500\Omega$,
 $1M0 = 1000000\Omega = 1,0M\Omega$

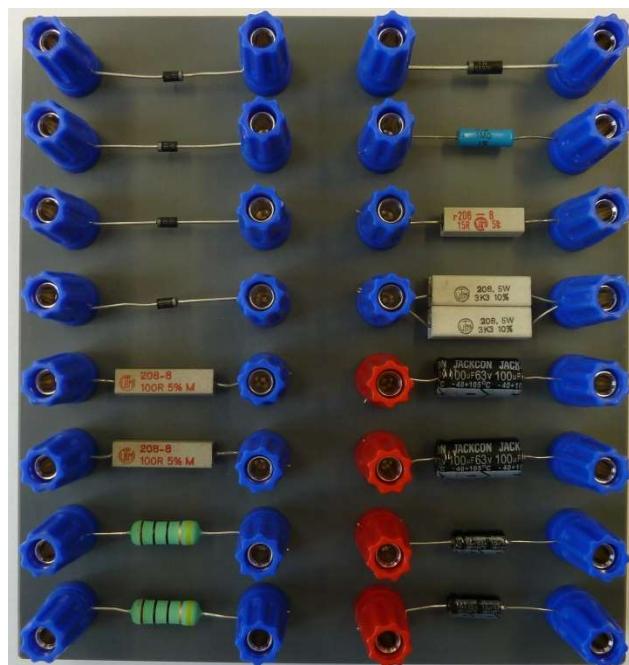
Achten Sie auf die Toleranzangaben in Abbildung 1!

Die **Katode** der in dieser Übung verwendeten **Dioden** ist mit einem **silbernen Farbring** am Gehäuse gekennzeichnet.

Gleichrichterdioden
1N4007

Widerstände
 $100\Omega \pm 5\%$

Widerstände
 $10\Omega \pm 5\%$



Zenerdiode
1N5337
 $1000000\Omega \pm 1\%$
 $15\Omega \pm 5\%$
 $1500\Omega \pm 5\%$

Elektrolyt-Kondensatoren
 $100\mu F \pm 20\%$

Elektrolyt-Kondensatoren
 $10\mu F \pm 20\%$

Abbildung 1: Steckbrett mit Bauteilen und 4mm-Buchsen

Protokollführung

Es gelten die Richtlinien der Protokollführung aus der Lehrveranstaltung „Einführung in die physikalischen Messmethoden“, LV-Nr.: PHY.D10_2, UNT.032_2 und PHA.04204UB

Danksagung

Ich danke Herrn Klaus Leo Irgang für die „Testung“ und kritische Diskussion dieses Übungsbeispiels.

Versuchsanleitung

zu 1.

- a) Aufbau gemäß Abbildung 2.

Als Signalquelle dient ein einstellbarer Ausgang des Hameg *HM8040-2(3)* Dreifach-Netzgerätes im Bereich zwischen 0 und ca. 20Vdc. R1 begrenzt den Durchlassstrom auf max. ca. 200mA. Wählen Sie für die Aufnahme der Durchlasskennlinie ca. 12-15 Messpunkte für UE. Der flache Teil der Kennlinie ist „spannungsgeführ“t, d.h. in Spannungs-Schritten, der steile Teil „stromgeföhrt“, d.h. in Stromschritten, zu ermitteln. Messen und dokumentieren Sie die relevanten Werte für Durchlassstrom I_F und Durchlassspannung U_F der Diode. **Achten Sie auf die Polung der verwendeten Geräte!**

Gesucht: Strom-Spannungskennlinie der Si-Gleichrichterdiode D1 in Durchlassrichtung.

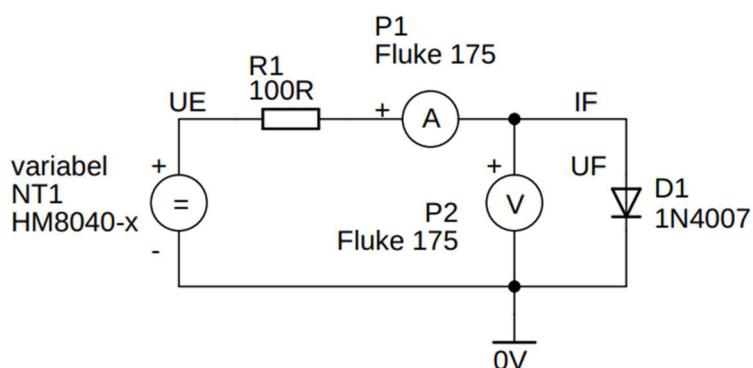


Abbildung 2: Aufnahme Durchlasskennlinie Gleichrichterdiode

b) Aufbau gemäß Abbildung 3.

Als Signalquelle dient die Serienschaltung zweier einstellbarer und potentialfreier Ausgänge des Hameg *HM8040-2(3)* Dreifach-Netzgerätes im Bereich zwischen 0 und ca. 40Vdc. Wählen Sie für die Aufnahme der Sperrkennlinie ca. sechs bis acht Messpunkte für UE. Die Kennlinie ist „spannungsgeführ“ zu ermitteln. Der sehr kleine Sperrstrom ist indirekt durch Messung des Spannungsabfalls an einem hochohmigen Serienwiderstand R2 und nachfolgender Anwendung des Ohm'schen Gesetzes zu ermitteln. Messen und dokumentieren Sie die relevanten Werte für „Sperrstrom-Spannung“ U_{IR} und Sperrspannung U_R der Diode.

Achten Sie auf die Polung der verwendeten Geräte!

Gesucht: Strom-Spannungskennlinie der Si-Gleichrichterdiode D1 in Sperrrichtung.

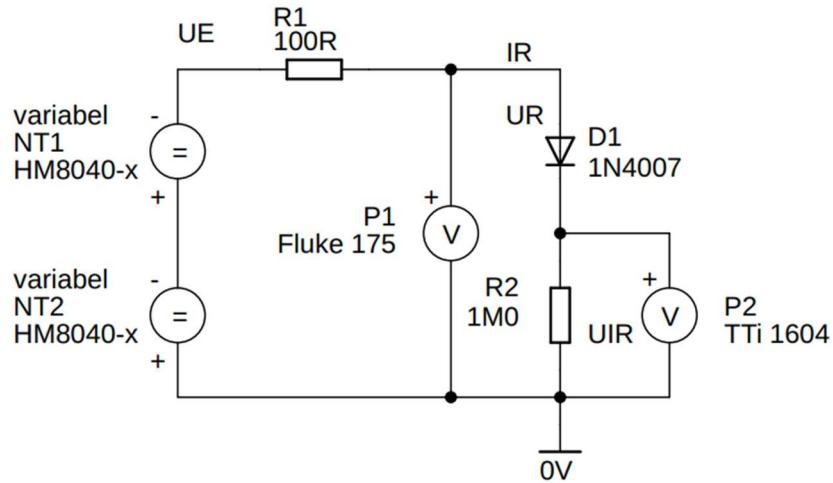


Abbildung 3: Aufnahme Sperrkennlinie Gleichrichterdiode

zu 2.

Aufbau gemäß Abbildung 4.

Als Signalquelle dient der potentialfreie Ausgang des Trafos TR1. Wählen Sie die Zeitbasis für die Messung so, dass mindestens eine vollständige Periode der Signalverläufe am Bildschirm dargestellt wird. Dokumentieren Sie den zeitlichen Spannungsverlauf des Eingangssignals U_E und des Signals an der Zenerdiode UD_1 mit zwei Kanälen eines Agilent DSO-X 2004A Oszilloskops als „single-shot“ im Speicherbetrieb. Speichern Sie die Messung sowohl als Datenfile als auch als Bild ab. Achten Sie für die einfachere Interpretation des „screen-shots“ auf die gleichen Einstellungen an den Oszilloskop-Eingängen und **legen Sie die Nulllinien übereinander in die Mitte des Bildschirmes!**

Gesucht: Strom-Spannungskennlinie der Zenerdiode D1 (Durchlass- und Sperrrichtung).

Hinweis: Berechnen Sie den Strom I_D aus dem Spannungsabfall an R_1 !

Es gilt: $U_{R1} = U_E - U_{D1}$

Option: Implementieren Sie bei Messungen über mehrere Perioden einen numerischen Tiefpassfilter durch Mittelwertbildung bei der Berechnung des Stromes.

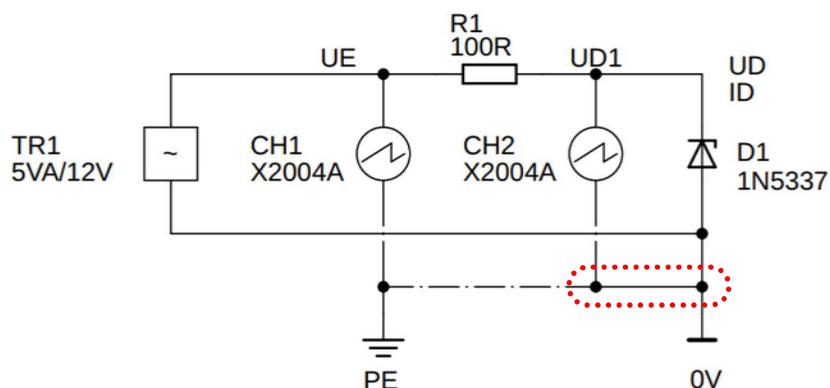


Abbildung 4: Aufnahme Kennlinie Z-Diode

zu 3.

Aufbau gemäß Abbildung 5.

Dokumentieren Sie den zeitlichen Spannungsverlauf des Eingangssignals U_E , des Signals zwischen Vorwiderstand R_1 und TR_1 , am Serienwiderstand R_2 im Kondensatorpfad und am Lastwiderstand R_3 mit vier Kanälen eines Agilent DSO-X 2004A Oszilloskops als „single-shot“ im Speicherbetrieb. Speichern Sie die Messungen sowohl als Datenfile als auch als Bild ab. Führen Sie diese Messungen im Leerlauf ($R_3 = \infty$), mit $R_3 = 1500\Omega$ und $R_3 = 100\Omega$ jeweils mit einer Kapazität $C_1 = 10\mu F$ und $C_1 = 100\mu F$ durch. Messen und dokumentieren Sie für alle $U_{R3} = U_{CH4}$ sowohl den Effektivwert der überlagerten Wechselspannung als auch den Betrag des Gleichspannungsanteils (siehe Absatz **Welligkeit** auf Seite 17).

Gesucht: grafische Darstellung der Spannungs- und Stromverläufe als Funktion der Zeit über mehrere Perioden. Erklärung der Vorgänge in der Schaltung. Bewertung der Glättungsfunktion mit Hilfe der Welligkeit.

Hinweis: Achten Sie auf die **Einstellung der Nulllinien** und legen Sie sie **übereinander** in die Mitte des Bildschirmes! Führen Sie die Messungen mit einer **dc-Kopplung** an den Oszilloskop-Eingängen durch! **Invertieren** Sie für die **vorzeichenrichtige Messung** des Spannungsabfalls an R_1 den **Kanal CH1**! Berechnen Sie die Ströme aus den Spannungsabfällen an den von ihnen durchflossenen Widerständen!

$$\text{Es gilt: } U_{D1} = U_{CH2} - U_{CH4} \quad I_{C1} = U_{CH3} / R_2 \quad I_{R3} = U_{CH4} / R_3 \quad I_{R1} = I_{D1} = U_{CH1} / R_1$$

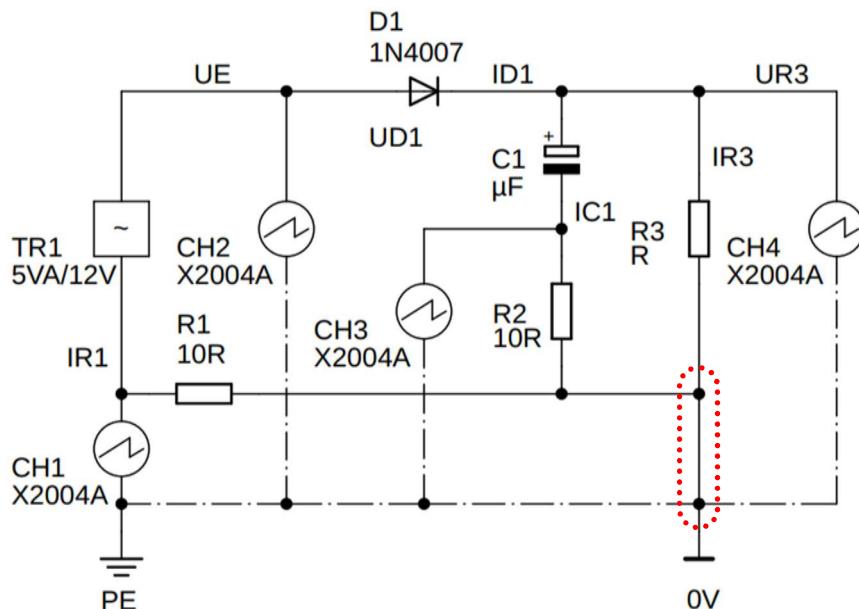


Abbildung 5: Einweg-Gleichrichter

zu 4.

Aufbau gemäß Abbildung 6.

Dokumentieren Sie den zeitlichen Spannungsverlauf des Eingangssignals U_E , des Signals nach der ersten Spannungsstufe (Knoten C1-D1-D2) und des Ausgangssignals (Knoten C2-D2) der unbelasteten Greinacher-Schaltung mit drei Kanälen eines Agilent DSO-X 2004A Oszilloskops als „single-shot“ im Speicherbetrieb. Versuchen Sie, den Einschwingvorgang beim Einschalten durch entsprechende Triggerung am Bildschirm darzustellen. **Speichern Sie die Messungen sowohl als Datenfile als auch als Bild ab.** Führen Sie die den Versuch im Leerlauf ($R_1 = \infty$) und mit $R_1 = 1500\Omega$ durch.

Gesucht: grafische Darstellung der Spannungsverläufe an den Bauteilen als Funktion der Zeit über mehrere Perioden für beide Belastungsfälle. Erklärung der Vorgänge in der Schaltung.

Hinweis: Achten Sie auf die **Einstellung der Nulllinien** und legen Sie sie **übereinander** in die Mitte des Bildschirms! Führen Sie die Messungen mit einer **dc-Kopplung** an den Oszilloskop-Eingängen durch! Verwenden Sie die **10:1-Tastköpfe** und berücksichtigen Sie dies bei den Einstellungen am Oszilloskop! Schalten Sie die Invertierung des Kanals CH1 wieder aus!

$$\text{Es gilt: } U_{C1} = U_{CH1} - U_{CH2} \quad U_{D2} = U_{CH2} - U_{CH3}$$

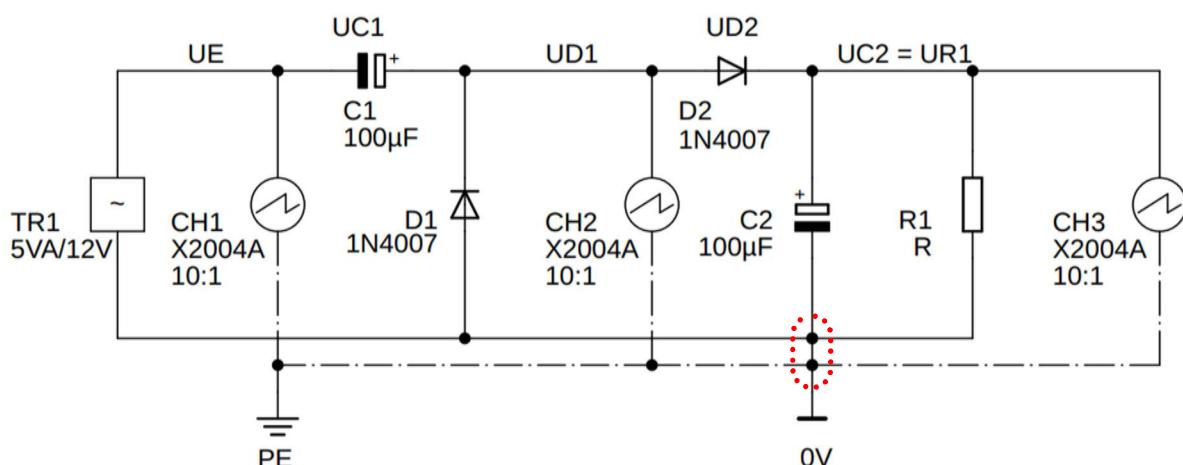


Abbildung 6: Greinacher-Schaltung

Grundlagen

Halbleiter und Leitfähigkeit

Halbleiter sind kristalline Feststoffe, deren elektrische Leitfähigkeiten zwischen jener von Leitern und Nichtleitern liegt. Der ideale Halbleiterkristall besitzt praktisch keine freien Ladungsträger und ist somit elektrisch nicht leitfähig. Es lässt sich aber sehr wohl eine gewisse Oberflächenleitfähigkeit nachweisen, welche durch das Fehlen von Partneratomen an Grenzflächen und dem damit verbundenem Auftreten von „Defektelektronen“ hervorgerufen wird. Ein ähnlicher Effekt tritt im Inneren des Kristalls an Stör- bzw. Bruchstellen auf. Diese Effekte tragen zur Eigenleitfähigkeit eines Halbleiters bei.

Das **Bändermodell** ist ein quantenmechanisches Modell, mit dessen Hilfe man die Leitfähigkeit von Leitern, Halbleitern und Isolatoren beschreiben kann. Das Modell besteht aus zwei Energiebändern (Valenz- und Leitungsbands) und der Bandlücke. Die als Ladungsträger dienenden Valenzelektronen befinden sich im Valenzband; das Leitungsbands ist im Grundzustand nicht mit Elektronen besetzt. Zwischen den beiden Energiebändern befindet sich die Bandlücke – ein „verbotener Bereich“.

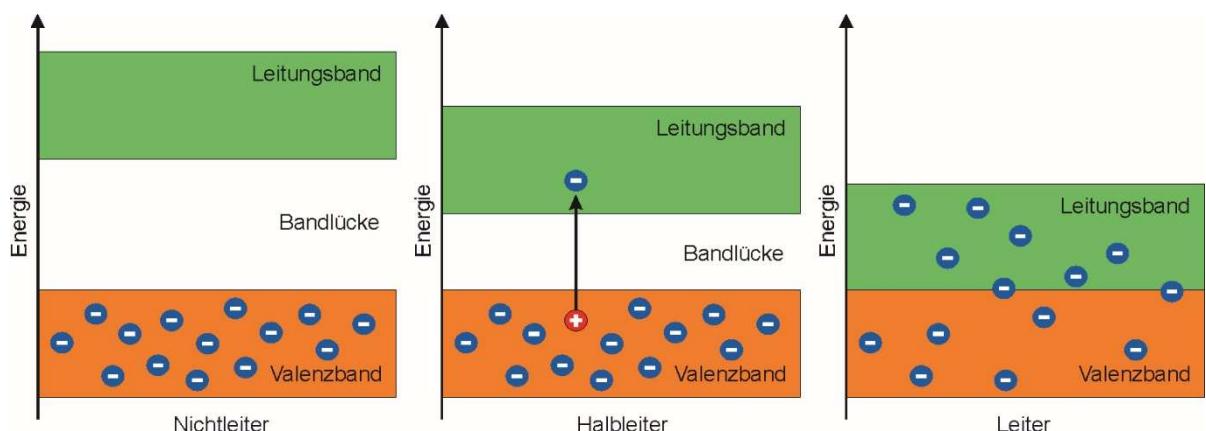


Abbildung 7: Bändermodell allgemein

Bei **elektrischen Leitern** ist das Valenzband entweder nicht voll mit Elektronen besetzt, oder das gefüllte Valenzband überlappt sich mit dem leeren Leitungsbands. In der Regel treffen beide Zustände gleichzeitig zu, sodass sich die Elektronen im nur teilweise besetzten Valenzband oder in den beiden sich überlappenden Bändern bewegen. Die Bandlücke existiert bei elektrischen Leitern nicht.

Bei **Isolatoren** (elektrische Nichtleiter) ist das Valenzband voll mit unbeweglichen, da zwischen den Atomen „eingesperrten“ Elektronen besetzt. Um leiten zu können, müssten die Elektronen aus dem Valenzband in das Leitungsband gelangen. Das verhindert die zwischen Valenz- und Leitungsband liegende Bandlücke. Falls es überhaupt möglich ist, kann nur mit sehr großem Energieaufwand diese Lücke überwunden werden.

Diese Bandlücke ist bei **Halbleitern** im Vergleich zu Isolatoren aber so klein, dass bereits bei Raumtemperatur Elektronen aus dem Valenzband in das Leitungsband gelangen. Da sich die Elektronen hier frei bewegen können, stehen sie als Ladungsträger zur Verfügung. Jedes in das Leitungsband gelangte Elektron hinterlässt ein Loch im Valenzband, welches dort von anderen Elektronen besetzt werden kann. Die so im Valenzband entstehenden wandernden

Löcher können als positive Ladungsträger angesehen werden. Es treten immer Elektron-Loch-Paare auf - somit gibt es ebenso viele negative wie positive Ladungen. Der Halbleiterkristall ist insgesamt elektrisch neutral.

Da die Elektronen immer den energetisch günstigsten Zustand annehmen, fallen sie ohne Energiezufuhr wieder in das Valenzband zurück und rekombinieren mit den Löchern. Bei einer bestimmten Temperatur stellt sich ein Gleichgewicht zwischen angehobenen und zurückfallenden Elektronen ein. Mit zunehmender Temperatur erhöht sich die Anzahl der Elektronen, die die Bandlücke überspringen können.

Die Eigenleitfähigkeit von verwendeten Halbleiterelementen wie Silizium ist technisch gesehen nicht verwertbar. Um sie dennoch gezielt beeinflussen zu können, werden geeignete Fremdatome in das Kristallgitter implementiert und damit die Ladungsträgerkonzentration verändert.

Dotierung

Unter **dotieren** versteht man das Einbringen von Fremdatomen in einen Halbleiterkristall zur gezielten Veränderung der Leitfähigkeit. Zur Dotierung von Silizium (4-wertig mit vier Valenzelektronen) können zum Beispiel 3-wertige Elemente wie Bor, Aluminium und Indium oder 5-wertige Elemente wie Phosphor, Arsen und Antimon verwendet werden.

n-Dotierung: Das 5-wertige Dotierelement besitzt ein Außenelektron mehr als die Siliziumatome. Vier Außenelektronen können sich mit je einem Siliziumatom binden, das fünfte ist frei beweglich und dient als Ladungsträger. Damit dieses ungebundene Elektron vom Valenzband in das Leitungsband gehoben werden kann, ist sehr viel weniger Energie nötig als bei den die Eigenleitfähigkeit des Siliziums verursachenden Elektronen. Man spricht hier von einer „Elektronenleitung“.

Das Dotierelement, welches ein Elektron abgibt, wird einfach positiv geladen und als Elektronendonator (*donare*, lat. = geben) bezeichnet. Da die elektrische Leitfähigkeit auf der Beweglichkeit der Elektronen basiert, bezeichnet man diese Halbleiter als n-leitend oder n-dotiert. Die freien Elektronen stellen hier die Majoritäts-, die Löcher die Minoritätsladungsträger dar.

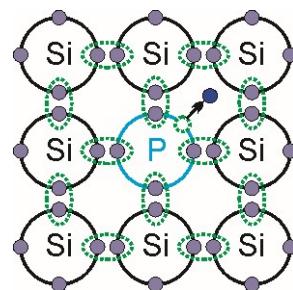


Abbildung 8: n-dotiertes Silizium

p-Dotierung: Das 3-wertige Dotierelement besitzt ein Valenzelektron weniger als das Siliziumatom. Somit kann das Dotierelement ein zusätzliches Außenelektron aufnehmen. Dadurch entsteht ein Loch im Valenzband der Siliziumatome und die dort positionierten Elektronen werden beweglich. Die Löcher, welche als positive Ladungsträger betrachtet werden, bewegen sich in entgegengesetzter Richtung zu den Elektronen („Löcherleitung“).

Das Dotierelement wird durch die Aufnahme eines Elektrons einfach negativ geladen; man nennt diese Fremdelemente auch Elektronenakzeptor (*acceptare*, lat. = aufnehmen). Da die elektrische Leitfähigkeit auf der Beweglichkeit der positiv geladenen Löcher basiert, bezeichnet man diese Halbleiter als p-leitend oder p-dotiert. Die Löcher stellen hier die Majoritäts-, die freien Elektronen die Minoritätsladungsträger dar.

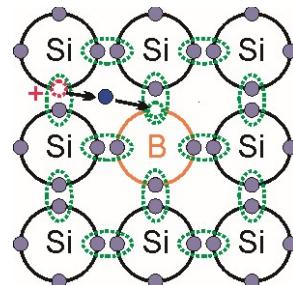


Abbildung 9: p-dotiertes Silizium

Bändermodell bei dotierten Halbleitern: Bei n-dotierten Halbleitern steht durch das Einbringen eines 5-wertigen Dotierelements ein ungebundenes Elektron im Kristall zur Verfügung, das mit vergleichsweise geringer Energie in das Leitungsband gehoben werden kann. Bei n-dotierten Halbleitern befindet sich ein Donator-Niveau nahe der Leitungsbandkante. Durch das Einbringen eines Dotierelements mit drei Außen elektronen steht bei p-dotierten Halbleitern eine Leerstelle zur Verfügung, die schon mit verhältnismäßig geringem Energieaufwand von einem Elektron aus dem Valenzband besetzt werden kann. Somit findet man bei p-dotierten Halbleitern ein Akzeptor-Niveau nahe der Valenzbandkante. In beiden Varianten ist die zu überwindende Bandlücke sehr klein.

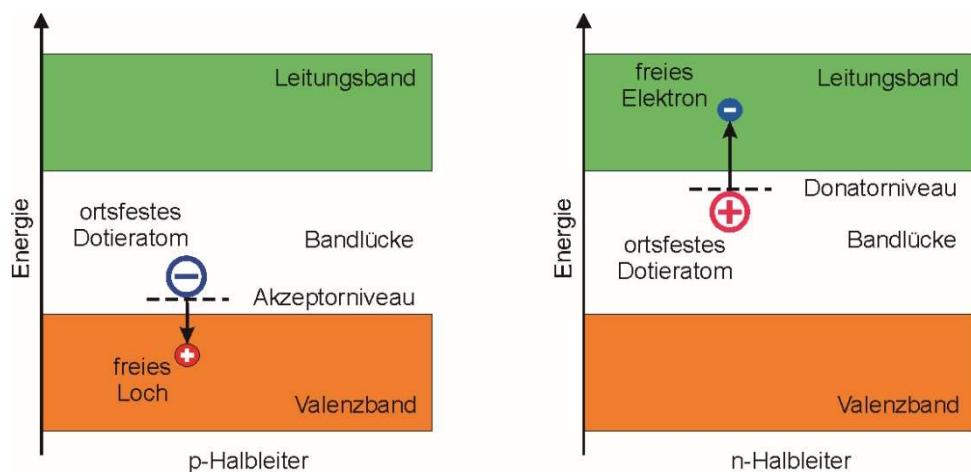


Abbildung 10: Bändermodell bei dotierten Halbleitern

pn-Übergang

Der pn-Übergang ist der Übergangsbereich aneinander liegender unterschiedlich dotierter Halbleiterkristalle. Durch Diffusion wandern die Majoritätsladungsträger in den jeweils anders dotierten Halbleiterkristall und re kombinieren mit den lokalen Majoritätsladungsträgern – Elektronen des n-Kristalls wandern in den p-Kristall und rekombinieren mit den dort vorhandenen Löchern, Löcher des p-Kristalls wandern in den n-Kristall und

rekombinieren mit den dort vorhandenen Elektronen. Auf Grund dieser Diffusions- und Rekombinationsvorgänge gibt es in diesem Grenzbereich keine freien Ladungsträger, sie sind in der jeweils anderen Halbleitergrenzschicht elektrisch gebunden. Zurück geblieben sind die dazugehörigen ortsfesten Donator-Atome, die nun nicht mehr elektrisch neutral erscheinen. Diese erzeugen ein elektrisches Feld, welches eine Kraft auf die verbleibenden freien Ladungsträger ausübt. Dadurch entsteht eine der durch die Diffusion verursachten Bewegung entgegen gerichtete Driftbewegung. Die Bewegungen kommen bei Erreichung des Gleichgewichtszustandes zum Stillstand.

Es bildet sich eine ladungsträgerfreie Raumladungszone (RLZ) aus, deren elektrisches Feld die verbleibenden freien Ladungsträger zurückdrängt. Der positive Pol des Feldes wird durch die Ionen im n-Kristall, der negative Pol durch die Ionen im p-Kristall gebildet. Die entstehende Potentialdifferenz wird Diffusionsspannung genannt und hängt von Dotierungsgrad und Material ab. Für Silizium liegt sie typischerweise bei 0,6 bis 0,7V. Diese Diffusionsspannung muss von den Ladungsträgern überwunden werden, damit sie in den jeweils anderen Teil des Halbleiters gelangen können. Ohne Energiezufuhr von außen kommen hier die Diffusions- und Rekombinationsvorgänge zum Erliegen. Abbildung 11 zeigt Verlauf von Raumladungsdichte, Feldstärke und elektrischem Potential im Halbleiter in Abhängigkeit von der Ortsvariablen x. Als Berechnungsgrundlage für den abrupten pn-Übergang dient das Schottky-Modell der RLZ.

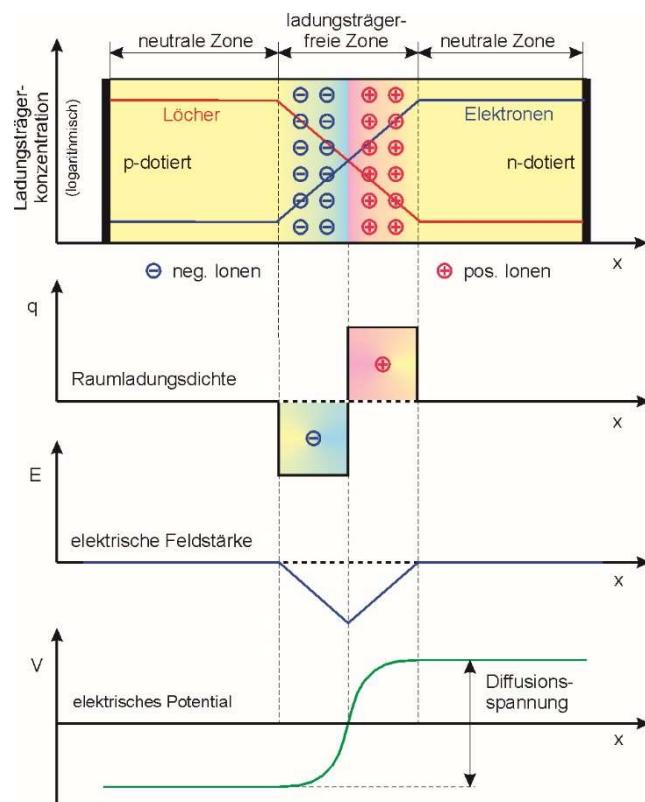


Abbildung 11: pn-Übergang im Gleichgewicht

Bändermodell eines pn-Überganges: Da das Fermi-Niveau (entspricht Akzeptor-Niveau = Donator-Niveau) konstant bleiben muss, ergibt sich beim pn-Übergang eine Verbiegung der Bänder. Diese kennzeichnet die RLZ, welche sich durch die abgewanderten Majoritätsladungsträger und der verbleibenden festen Dotieratomrumpfen ergibt. Die

entstehende Potentialschwelle verhindert im Gleichgewichtszustand ohne Energiezufuhr von außen eine weitere Diffusion von Elektronen und Löchern in den jeweils anderen Kristall.

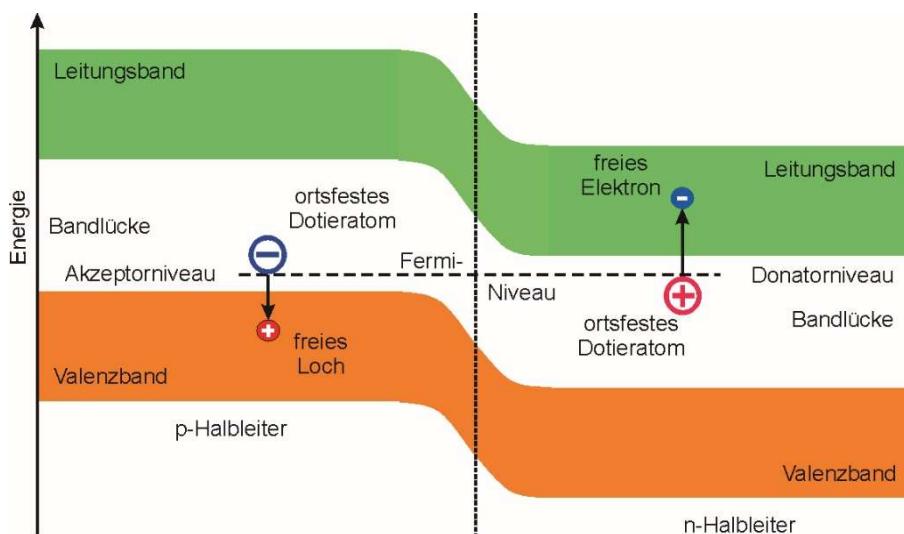


Abbildung 12: Bändermodell des pn-Überganges

pn-Übergang mit Spannungsquelle

Wird ein pn-Übergang mit einer Spannungsquelle elektrisch verbunden, so ergeben sich je nach Polarität unterschiedliche Zustände.

pn-Übergang in Sperrrichtung: Hier wird der Minus-Pol der Spannungsquelle mit der p-dotierten Zone, der Plus-Pol mit der n-dotierten Zone des Halbleiterkristalls verbunden. Über den Minus-Pol werden Löcher aus der p-Zone abgesaugt, welche negativ geladene Ionen hinterlassen. Umgekehrt betrachtet werden Elektronen in die p-Zone gedrückt. Diese fallen in die offenen Bindungen der Akzeptor-Atome und lassen diese so zu negativ geladenen Ionen werden. Die Auffüllung der offenen Bindungen erfolgt unter dem Einfluss des von der angelegten Spannung erzeugten elektrischen Feldes vor allem in der Nähe der durch Ladungsträgerdiffusion entstandenen RLZ. Somit verbreitert sich der negative geladene Bereich dieser Zone.

Der Plus-Pol der Spannungsquelle hingegen saugt Elektronen aus der n-dotierten Zone ab. Die zu den Elektronen gehörigen Donator-Atome werden zu positiv geladenen Ionen. Auch hier erfolgt diese Ionisierung unter dem Einfluss des elektrischen Feldes vor allem in der Nähe der RLZ. Somit verbreitert sich der positive Bereich dieser Zone.

Die Ladungsbilanz in der RLZ ist stets ausgeglichen. Ist die Spannung der RLZ gleich der angelegten Spannung, kommt die Bewegung der Ladungsträger und damit die Verbreiterung der RLZ zum Stillstand. Das im Inneren der RLZ herrschende elektrische Feld verdrängt und sperrt bewegliche Ladungsträger. Die RLZ wird daher auch „Sperrsicht“ genannt, es sollte kein elektrischer Strom fließen.

Dies gilt aber nur für Majoritätsladungsträger. In Folge von Wärmeschwingungen entstehen Elektron-Loch-Paare. Somit sind im p-Halbleiter einige freie Elektronen, im n-Halbleiter einige Löcher als Minoritätsladungsträger vorhanden. Gelangen diese in das elektrische Feld der Sperrsicht, so werden sie durch die Kraftwirkung dieses Feldes durch die Sperrsicht hindurch in die neutrale Zone des gegenüber liegendem Halbleiter getrieben. Minoritätsträger

können die Sperrsicht durchqueren.

Die zum Betrieb in Sperrrichtung angelegte äußere Spannung U_{ext} addiert sich zur Diffusionsspannung U_D . Somit liegt am pn-Übergang die Potentialdifferenz U_{pn} .

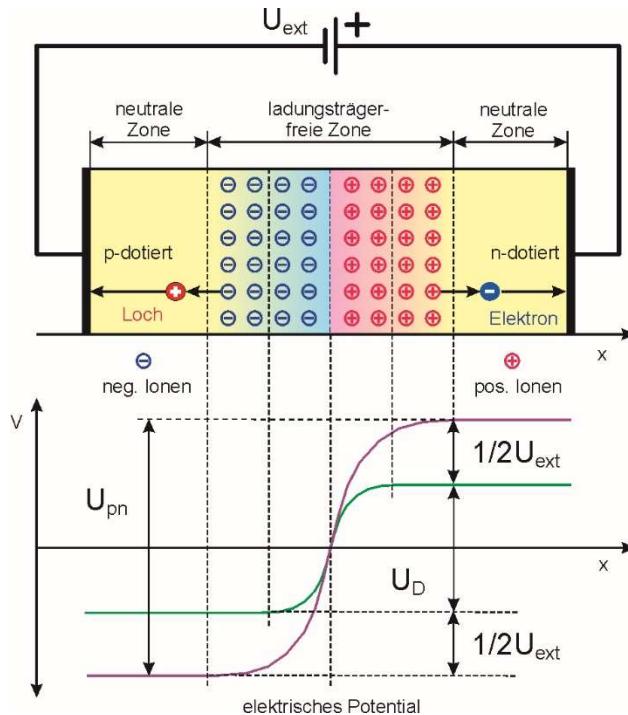


Abbildung 13: pn-Übergang in Sperrrichtung

pn-Übergang in Durchlassrichtung: Hier wird der Minus-Pol der Spannungsquelle mit der n-dotierten Zone, der Plus-Pol mit der p-dotierten Zone des Halbleiterkristalls verbunden. Über den Minus-Pol werden Elektronen in die n-Zone gedrückt, welche die Ladungsbilanz der durch Ladungsträgerdiffusion entstandenen positiven Ionen wieder ausgleichen. Somit verringert sich der positive Teil der RLZ.

Der Plus-Pol der Spannungsquelle hingegen drückt Löcher in die p-Zone bzw. saugt Elektronen aus ihr ab. Die ionisierten Akzeptor-Atome verlieren ihre negative Ladung. Somit verringert sich der negative Teil der RLZ.

Durch die Überschwemmung des Halbleiterkristalls mit Elektronen/Löchern wird die durch Ladungsträgerdiffusion entstandene RLZ abgebaut. Durch die Kristallstrecke fließt elektrischer Strom. Da sie sehr niederohmig wird, ist in der hier verwendeten Schaltung ein ohmscher Serienwiderstand R zur Strombegrenzung vorgesehen.

Die zum Betrieb in Durchlassrichtung angelegte äußere Spannung U_{ext} baut die von der Diffusionsspannung U_D gebildete Potentialdifferenz U_{pn} am pn-Übergang ab. Der durch den fließenden Strom bedingte Spannungsabfall U_R am Serienwiderstand R muss bei diesen Überlegungen berücksichtigt werden.

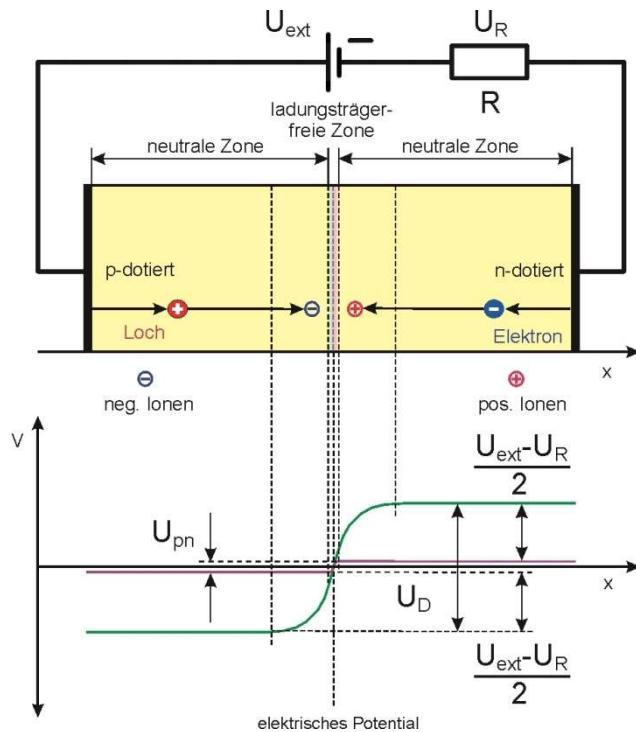


Abbildung 14: pn-Übergang in Durchlassrichtung

Anwendungen

Diode: Werden der p- und n-dotierte Halbleiterkristall mit dem dazwischen liegenden pn-Übergang mit Anschlüssen (Elektroden) versehen und in ein geeignetes Gehäuse verpackt, erhält man eine Diode – ein wichtiges Halbleiterbauelement. In Anlehnung an die beschriebenen Schaltungsvarianten kann eine Diode als elektronisches Ventil eingesetzt werden, da der nennenswerte Stromfluss nur in einer Richtung – eben der Durchlassrichtung – stattfinden kann. Diese Ventileigenschaft findet im Schaltsymbol der Diode Ausdruck.



Abbildung 15: Schaltsymbol und Ansicht einer Diode

Die Diodenkennlinie beschreibt die Strom-Spannungscharakteristik dieses Bauelements. Der Durchlassbereich im ersten Quadranten weist mit der Knie-, Schleusen- oder Schwellenspannung eine typische Kenngröße auf. Als Spannung zwischen Anode und Katode gibt sie jenen Spannungswert an, bei dem ein verglichen mit dem Sperrstrom nennenswert größerer Durchlassstrom fließt (z. Bsp. $I_F = 1\text{mA}$). Sie liegt für Siliziumdioden bei ca. 0,7 V. Der nutzbare Bereich der Kennlinie im Durchlassbereich ist durch die maximal zulässige statische Verlustleistung P_{tot} begrenzt.

Der Sperrbereich im dritten Quadranten ist gekennzeichnet durch einen in Relation zum Durchlassstrom um Größenordnungen kleineren Sperrstrom. Bei Überschreiten der maximal

zulässigen Sperrspannung $U_{R\max}$ als weitere Kenngröße steigt der Sperrstrom sehr stark an. Die verwendete Si-Standard-Gleichrichterdiode vom Typ 1N4007 weist eine maximal zulässige Sperrspannung $U_{R\max}$ von 1000V auf.

Maßgeblich dafür ist der so genannte **Zener-Durchbruch**, der sich aus zwei Effekten zusammensetzt. Beim **Lawinen-Effekt** (engl. *avalanche*) werden die Ladungsträger des Sperrstromes durch das elektrische Feld so stark beschleunigt, dass sie mit einem Stoß ein anderes Valenzelektron als Ladungsträger verfügbar machen (Stoßionisation), danach aber nicht mehr rekombinieren und im Leitungsband verbleiben. Dadurch steigt die Anzahl der freien Ladungsträger lawinenartig exponentiell an. Beim **Zener-Effekt** kommt es durch die anliegende Spannung zu einer Verschiebung der Energiebänder von p- und n-dotierten Bereich. Mit dieser Verschiebung können unbesetzte Zustände im Leitungsband das gleiche Energieniveau aufweisen wie besetzte Zustände im Valenzband. Dadurch kann es Elektronen gelingen, ohne weitere Energiezufuhr vom Valenz- in das Leitungsband zu gelangen.

Dieser Stromanstieg kann zum Wärmedurchbruch führen. Die umgesetzte Verlustleistung führt zu einer unzulässigen Erhöhung der Kristalltemperatur, damit zur Verringerung der Sperreigenschaft und in weiterer Folge zur Zerstörung des Halbleiters.

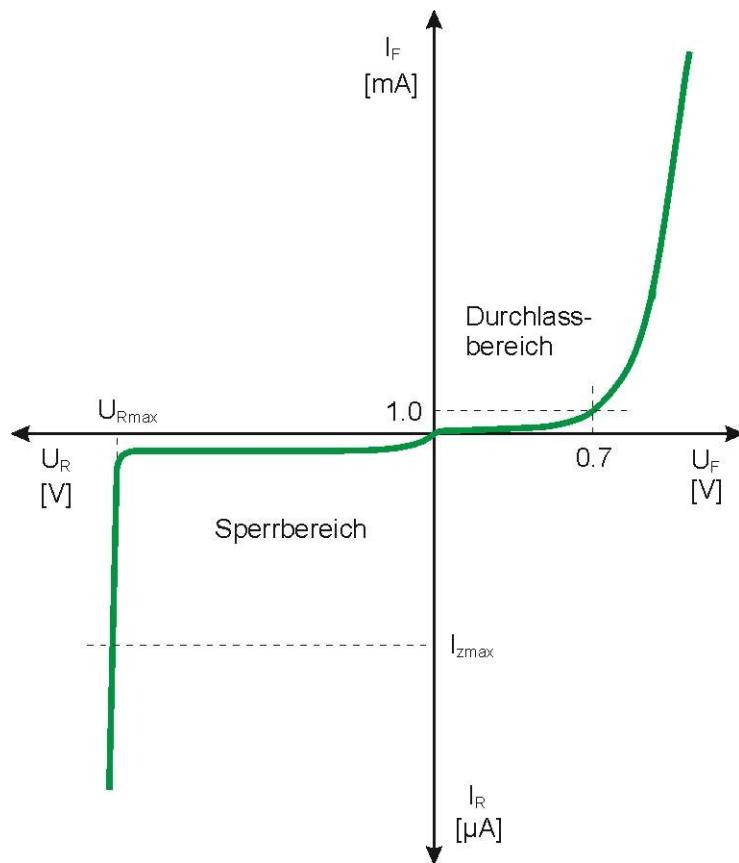


Abbildung 16: typische Strom-Spannungskennlinie einer Si-Kleinsignal-Diode

Bei **Zenerdioden** macht man sich den Zener-Durchbruch zu Nutze. Man begrenzt den fließenden Strom (meist mit einem geeignet dimensionierten Vorwiderstand) und bewegt sich im steilen Bereich der **Sperrkennlinie**. Unter Berücksichtigung der maximal zulässigen Werte für Strom (I_{zmax}) und Verlustleistung (P_{tot}) verwendet man dieses Bauteil zur

Spannungsbegrenzung oder –konstanthaltung. Durch unterschiedliche Dotierungen können Dioden mit verschiedenen Durchbruchsspannungen $U_{R\max}$, welche man hier als Zenerspannung U_z bezeichnet, im Bereich zwischen zwei und einigen hundert Volt erzeugt werden.



Abbildung 17: Schaltsymbol und Ansicht von Zener-Dioden

Anmerkung: Wie alle Halbleiterbauelemente zeigt auch die Diode in ihren unterschiedlichen Bauformen eine mehr oder weniger stark ausgeprägte Abhängigkeit ihrer Eigenschaften bzw. Kennwerte von der Temperatur. Die Auswirkungen dieser Temperaturabhängigkeit wurden in den obigen Ausführungen nicht berücksichtigt.

Glättung: Bei der Erzeugung von Gleichspannung aus einer (sinusförmigen) Wechselspannung durch Gleichrichtung entsteht immer eine Mischspannung, bestehend aus Gleich- und Wechselanteil. Eine einfache Möglichkeit zur Verringerung des Wechselanteils besteht in der Verwendung von Glättungskondensatoren. Glättungsdrösseln werden für höhere Leistungen verwendet und sollen im Rahmen dieser Übung nicht berücksichtigt werden.

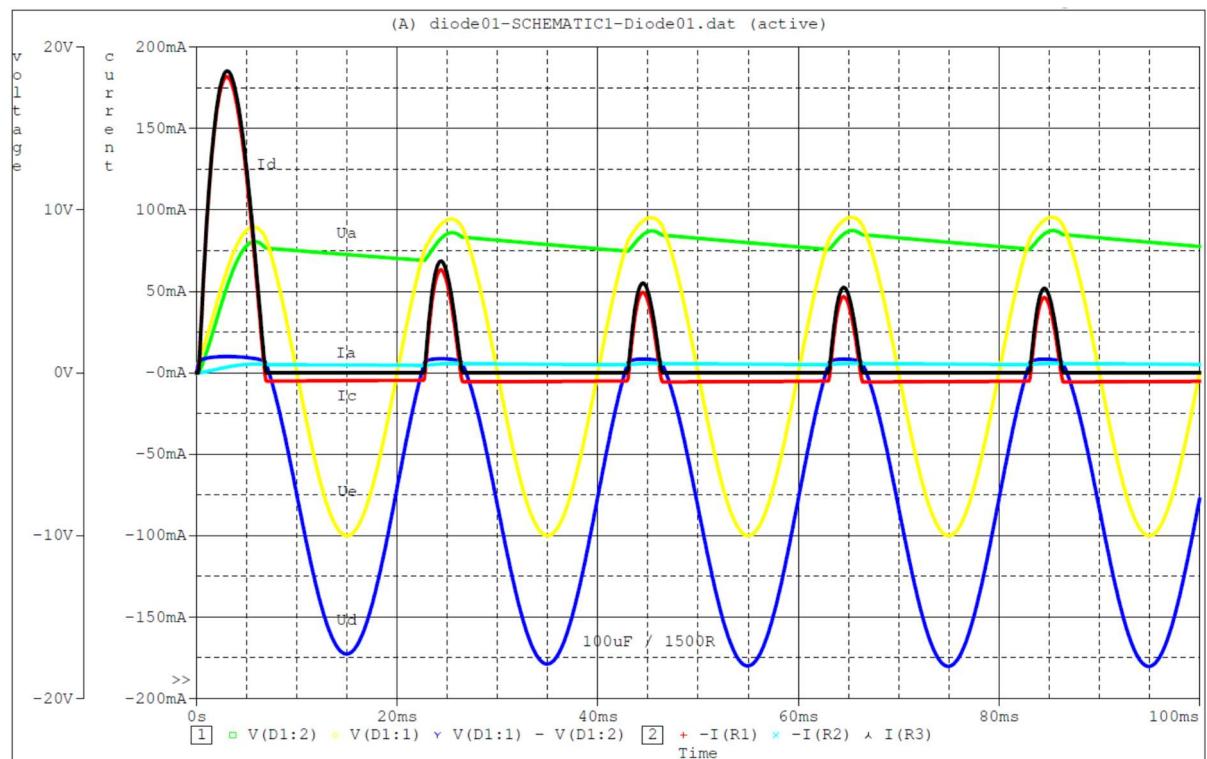


Abbildung 18: Simulation Gleichrichterschaltung mit Lastwiderstand

Der der Last parallelgeschaltete Kondensator wird aufgeladen, solange der Gleichrichter im Durchlassbetrieb arbeitet und speichert somit Energie. Diese wird im Sperrbetrieb des Gleichrichters wieder an den Verbraucher abgegeben und sorgt an diesem für einen geringeren Spannungseinbruch – eine „geglättete“ Spannung.

Welligkeit: Zur quantitativen Beschreibung dieser Mischspannung wird nach DIN 41755-1 „Überlagerungen auf einer Gleichspannung“ die **Welligkeit w** definiert. Sie ist das Verhältnis des Effektivwertes der überlagerten Wechselspannung zum Betrag der Gleichspannung:

$$w = \frac{U_{\sim}}{|U_-|}$$

w ... Welligkeit
 U_{\sim} ... Effektivwert Wechselspannungsanteil
 $|U_-|$... Betrag Gleichspannungsanteil

Der Effektivwert der überlagerten Wechselspannung kann mit dem Oszilloskop im Menüpunkt „measure“ und „AC RMS-VB“ gemessen werden. Der Betrag der Gleichspannung entspricht dem „vorzeichenlosen“ Mittelwert des Signals und kann mit dem Oszilloskop Menüpunkt „measure“ und „Mittelwert-VB“ gemessen werden.

Stabilisierung: Durch eine geeignete Schaltung versucht man, die Welligkeit der zur Verfügung zu stellenden Spannung unter allen Betriebsbedingungen so klein wie möglich zu halten – die Spannung zu stabilisieren. Eine einfache Möglichkeit ist es, von einer ausreichend hohen, welligen Spannung nur einen kleineren Gleichspannungsanteil zu verwenden. Die sich aus der verbleibenden Spannungsdifferenz und dem fließenden Strom ergebende elektrische Leistung über die Zeit wird z. Bsp. in einem Widerstand in Wärme umgewandelt. Stabilisierungsschaltungen mit Z-Dioden arbeiten nach diesem Prinzip.

Spannungsverdoppler: Mit Hilfe von Dioden und Kondensatoren kann eine Art Ladungspumpe realisiert werden, die aus einer Wechselspannung eine Gleichspannung erzeugt, welche betragsmäßig höher als der Scheitelwert der Wechselspannung ist. Dabei werden mit der ersten Halbwelle des Eingangssignals bestimmte Kondensatoren aufgeladen. Mit der zweiten Halbwelle werden sie durch die geänderte Polarität des Eingangssignals in Serie geschaltet, wodurch eine höhere Ausgangsspannung erreicht wird. Die Dioden übernehmen hier die Funktion eines potentialgesteuerten Schalters.

Die im Übungsbeispiel zu untersuchende Greinacher-Schaltung ist eine Weiterentwicklung der Villard-Schaltung. Durch die Verwendung einer zweiten Diode und einem zusätzlichen Kondensator als Speicher wird die Welligkeit des Ausgangssignal verringert. Das Ausgangssignal beträgt im unbelasteten Fall:

$$\hat{U}_A = 2\hat{U}_E - 2U_D$$

\hat{U}_A ... Scheitelwert Ausgangssignal
 \hat{U}_E ... Scheitelwert Eingangssignal
 U_D ... Durchlassspannung Diode

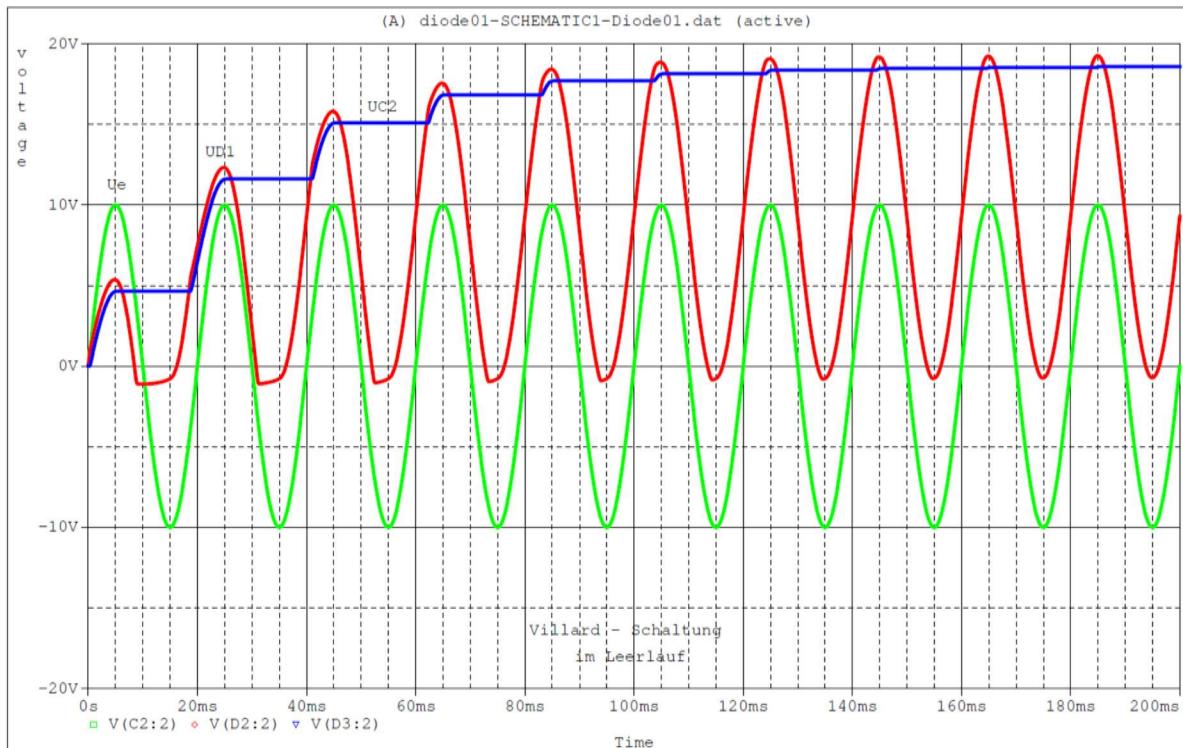


Abbildung 19: Simulation Greinacher-Schaltung im Leerlauf

Mit einer kaskadierten Ausführung der einzelnen Dioden-Kondensatorkombinationen wird die Schaltung zum **Spannungsvervielfacher**. Mit solch einer Hochspannungskaskade können Gleichspannungen von mehreren Millionen Volt erzeugt werden.

Abbildungsverzeichnis:

Abbildung 1: Steckbrett mit Bauteilen und 4mm-Buchsen	2
Abbildung 2: Aufnahme Durchlasskennlinie Gleichrichterdiode.....	3
Abbildung 3: Aufnahme Sperrkennlinie Gleichrichterdiode	4
Abbildung 4: Aufnahme Kennlinie Z-Diode	5
Abbildung 5: Einweg-Gleichrichter.....	6
Abbildung 6: Greinacher-Schaltung	7
Abbildung 7: Bändermodell allgemein	8
Abbildung 8: n-dotiertes Silizium.....	9
Abbildung 9: p-dotiertes Silizium.....	10
Abbildung 10: Bändermodell bei dotierten Halbleitern.....	10
Abbildung 11: pn-Übergang im Gleichgewicht	11
Abbildung 12: Bändermodell des pn-Überganges	12
Abbildung 13: pn-Übergang in Sperrrichtung	13
Abbildung 14: pn-Übergang in Durchlassrichtung	14
Abbildung 15: Schaltsymbol und Ansicht einer Diode.....	14
Abbildung 16: typische Strom-Spannungskennlinie einer Si-Kleinsignal-Diode	15
Abbildung 17: Schaltsymbol und Ansicht von Zener-Dioden	16
Abbildung 18: Simulation Gleichrichterschaltung mit Lastwiderstand.....	16
Abbildung 19: Simulation Greinacher-Schaltung im Leerlauf	18

Kontrollfragen

- Was ist ein Halbleiter? (Kristallstruktur, Bändermodell, Leitfähigkeit)
- Was versteht man unter Dotieren?
- Beschreiben Sie einen p- bzw. n-dotierten Halbleiter. (Kristallstruktur, Bändermodell)
- Was versteht man unter „Paarbildung“ und „Rekombination“?
- Was versteht man unter „Löcher-“ bzw. „Elektronen-Leitung“?
- Was ist ein pn-Übergang?
- Beschreiben Sie das Verhalten eines pn-Überganges mit einer Spannungsquelle bei Polung in Sperrrichtung.
- Beschreiben Sie das Verhalten eines pn-Überganges mit einer Spannungsquelle bei Polung in Durchlassrichtung.
- Kann man die Diffusionsspannung mit einem Voltmeter messen?
- Warum fließt bei Polung in Sperrrichtung ein Sperrstrom?
- In welcher Größenordnung bewegt sich das Verhältnis von Durchlass- zu Sperrstrom einer Siliziumdiode?
- Warum reicht bei Polung einer Siliziumdiode in Durchlassrichtung eine angelegte Spannung von weniger als einem Volt für das Zustandekommen eines großen Durchlassstromes aus?
- Skizzieren und erklären Sie die U/I-Charakteristik einer Siliziumdiode.
- Beschreiben Sie die beim Überschreiten einer maximalen Sperrspannung im Halbleiter auftretenden Effekte.
- Erklären Sie das Funktionsprinzip des Einweggleichrichters / Brückengleichrichters.
- Erklären Sie das Funktionsprinzip der Spannungsglättung mit Hilfe eines Kondensators.
- Was passiert bei Belastung der o.g. Gleichrichterschaltungen?
- Was versteht man unter der Welligkeit einer Spannung?
- Was zeichnet eine Zenerdiode aus?
- Erklären Sie das Funktionsprinzip der Spannungsstabilisierung mit einer Zener-Diode.
- Wie funktioniert die Greinacherschaltung – Spannungsverdopplerschaltung?

Hinweise zur Erstellung des Laborberichtes

- Aufgabenstellung
- Voraussetzungen und Grundlagen: *Kurze Beschreibung der Halbleitereigenschaften und der Möglichkeiten zur Beeinflussung derselben (in eigenen Worten). Erklären Sie die Funktion des pn-Übergangs. Fassen Sie sich kurz (maximal 2 Seiten) und zitieren Sie (Bücher, jedoch keine Skripten)!*
- Geräteliste

- Für jedes der durchgeführten Experimente:
 - Beschreibung der Versuchsanordnung: *Skizze der Schaltpläne (die Schaltpläne aus diesem Skriptum können verwendet werden) und Beschreibung der Funktion: Was wollen Sie herausfinden, was messen Sie und wie kann man die Messungen auswerten.*
 - Versuchsdurchführung/Messergebnisse
- Auswertung: *Unsicherheitsanalyse bei den Punkten 1.a), 1.b), 2. und 3. (Welligkeit). Diskutieren Sie allfällige Abweichungen von zu erwartenden Ergebnissen bei allen Punkten.*
 - zu 1.a): Erstellen Sie die Durchlasskennlinie der verwendeten Diode. Bewerten Sie die Durchlass-Charakteristik der Diode (U_F/I_F).
 - zu 1.b): Erstellen Sie die Sperrkennlinie der verwendeten Diode. Bewerten Sie die Sperr-Charakteristik der Diode (U_R/I_R).
 - zu 2.: Erstellen Sie die Kennlinie der verwendeten Diode für Durchlass- und Sperrrichtung in einem Diagramm. Bewerten Sie die Charakteristik der Diode ($U_F/I_F, U_Z/I_Z$) und vergleichen Sie Ihre Ergebnisse mit Angaben aus dem Datenblatt.
 - zu 3.: Stellen Sie für **jede der sechs möglichen R3/C1-Kombinationen** den zeitlichen Verlauf folgender Größen zusammengefasst in einem Diagramm dar: $U_E, I_{D1}, U_{D1}, U_{R3}, I_{C1}$ und I_{R3} (siehe Abb.16). Erklären Sie die Vorgänge in der Schaltung (gleichrichten, laden-entladen, belasten) anhand einer typischen Messung und berechnen bzw. bewerten Sie die Welligkeit von U_{R3} .
 - zu 4.: Stellen Sie den zeitlichen Verlauf folgender Größen dar: $U_E, U_{C1}, U_{C2}, U_{D1}$ und U_{D2} in einem Diagramm dar. Erklären Sie die Vorgänge des Einschwingens und der Spannungsverdopplung in der Schaltung.
- Diskussion: Kurze Reflexion über die durchgeführten Arbeiten und deren Ergebnisse.
- Zusammenfassung: Angabe aller wesentlichen Messergebnisse mit Unsicherheiten; Verweise auf wesentliche Diagramme (Abbildung Nr., Seite).
- Ev. Literaturverzeichnis und Quellenangabe

Literatur

- *Experimentalphysik 2*, W. Demtröder, Springer Verlag, 4. Auflage, Kap. 5.8 „Gleichrichtung“, Seite 161 ff.
- *Halbleiter-Schaltungstechnik*, U. Tietze / Ch. Schenk / E. Gamm, Springer Vieweg Verlag, 14. Auflage, Kap. 1 „Diode“, Seite 5 ff.
- <http://de.wikipedia.org/wiki/Diode>
- *Grundlagen der Elektronik*, S. Goßner, Schaker Verlag, 7. Auflage, vom Autor genehmigter Download zur ausschließlich privaten Nutzung: <http://www.prof-gossner.de/FrameSet.html>
- Datenblatt Zener-Diode 1N5337B:
<https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/1n5337b-d.pdf>