

Worst-Case-Untersuchungen

G. Graichen, Chemnitz

Technische Einrichtungen bestehen im Allgemeinen aus toleranzbehafteten Einzelkomponenten, die in wechselnden Einsatzsituationen sicher zusammenwirken müssen. Daher sind bei der Entwicklung und Konstruktion die in der Praxis möglichen ungünstigsten Fälle (worst-cases) des Zusammentreffens von Toleranzen, Umwelt- und Betriebsbedingungen zu berücksichtigen.

1 Dioden-Schaltung als Beispiel

Am Beispiel einer einfachen Z-Dioden-Stabilisierungsschaltung wird die Vorgehensweise als Methode erläutert (Bild 1).

Die Wirkung der Schaltung beruht auf dem Prinzip des Parallel-Stabilisators unter Ausnutzung der hohen Steilheit der Kennlinien von Z-Dioden im Durchbruchgebiet (Bild 2). Das Bereitstellen der Eingangsspannung U_e kann auf verschiedene Weise erfolgen. Typisch sind dabei eine gewisse Schwankungsbreite sowie eine mehr oder weniger große Restwelligkeit. Die Stabilisierungsschaltung bewirkt eine sehr starke Reduzierung derartiger Spannungsschwankungen.

In der Schaltung nach Bild 1 ändern sich bei Schwankungen der Eingangsspannung sowohl der Stromfluss über den Vorwiderstand R_V als auch der Stromfluss über die Z-Diode. Die Spannung an der Z-Diode und damit die Stromstärke am Lastwiderstand R_L bleiben infolge der stabilisierenden Wirkung weitestgehend konstant. Bei einer Änderung des Lastwiderstandes, die eine Lastschwankung im praktischen Betrieb darstellt, ändert sich der Stromfluss über die Z-Diode. Die Spannung an der Last bleibt auch jetzt nahezu unverändert.

Natürlich können Schwankungen von Eingangsspannung und Belastung auch gleichzeitig auftreten. Die stabilisierende Wirkung der Z-Dioden-Schaltung bleibt dabei solange erhalten, wie die Z-Diode noch im Durchbruchgebiet betrieben wird.

Einer der Grenzfälle, der neben anderen bei der Worst-Case Betrachtung berücksichtigt werden muss, liegt demnach vor, wenn ein Mindeststrom I_{Zmin} über die Z-Diode bei minimaler Eingangsspannung und maximaler

Last unterschritten wird. Das bedeutet einerseits, dass der mögliche Variationsbereich von Eingangsspannung und/oder Laststrom bei der gegebenen Schaltungskonfiguration von der konkreten Dimensionierung abhängig und damit begrenzt ist. Andererseits kann durch eine gezielte Dimensionierung die Anpassung an geforderte Variationsbereiche in bestimmten Grenzen realisiert werden.

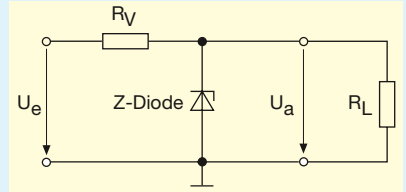
2 Schaltungsdimensionierung

Für die Dimensionierung der Stabilisierungsschaltung ist neben dem vom Hersteller angegebenen Toleranzbereich der Durchbruchspannung der Z-Diode (U_{Zmin} bzw. U_{Zmax}) auch die zulässige Verlustleistung P_{Vmax} zu beachten. Aus der Verlusthyperbel ergibt sich ein maximal zulässiger Strom I_{Zmax} (Bild 2).

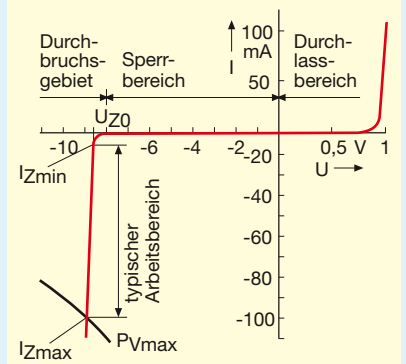
Ebenso muss der Mindeststromfluß I_{Zmin} über die Z-Diode gewährleistet sein. Für höhere Anforderungen an die Stabilisierungswirkung ist zu berücksichtigen, dass sich die typische Steilheit der Durchbruchkennlinie, gekennzeichnet durch den differentiellen Widerstand r_z , mit der Durchbruchsspannung ändert. Diese typische Abhängigkeit ist im Bild 3 dargestellt.

Insbesondere bei praktischem Betrieb mit schwankenden Umgebungstemperaturen sollte auch die im Bild 4 gezeigte typische Abhängigkeit des Temperaturkoeffizienten TK_Z von der Durchbruchsspannung Beachtung finden. Es ist ersichtlich, dass eine Stabilisierungsschaltung mit Durchbruchsspannungen der Z-Diode von etwa 5V bis 8V die besten technischen Parameter erwarten lässt.

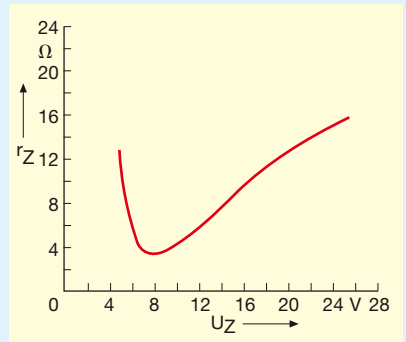
Bei minimaler Eingangsspannung U_{emin} , größtmöglichem Vorwiderstand R_{Vmax} , maximaler Durchbruchsspannung U_{Zmax} und minimalem Lastwiderstand R_{Lmin} ergibt sich die Bedingung



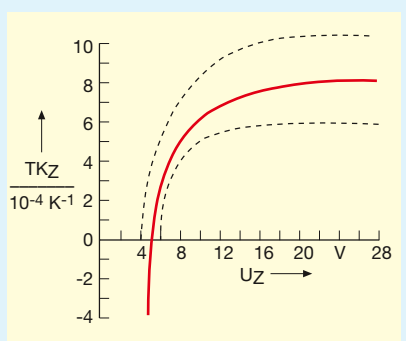
1 Einfache Schaltung zur Stabilisierung mit Hilfe einer Z-Diode



2 Statische Kennlinie einer typischen Z-Diode



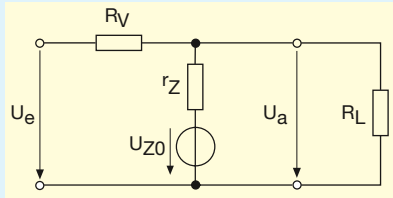
3 Typische Abhängigkeit des differentiellen Widerstands von der Durchbruchsspannung



4 Typische Abhängigkeit des Temperaturkoeffizienten von der Durchbruchsspannung

Autor

Dr.-Ing. Günter Graichen ist freier Fachautor, Chemnitz.



5 Stabilisierungsschaltung mit Ersatzschaltbild für die Z-Diode

$$\frac{U_{e\min} - U_{Z\max}}{R_{V\max}} - \frac{U_{Z\max}}{R_{L\min}} \geq I_{Z\min} \quad (1)$$

für den minimalen Strom über die Z-Diode. Entsprechend folgt bei maximaler Eingangsspannung $U_{e\max}$, minimalem Vorwiderstand $R_{V\min}$, minimaler Durchbruchspannung $U_{Z\min}$, maximalem Lastwiderstand $R_{L\max}$ bzw. minimalem Laststrom $I_{L\min}$

$$\frac{U_{e\max} - U_{Z\min}}{R_{V\min}} - \frac{U_{Z\min}}{R_{L\max}} \leq I_{Z\max} \quad (2)$$

für den maximalen Strom über die Z-Diode. Bedeutend für die Praxis ist der Grenzfall Leerlauf, bei dem kein Laststrom fließt und der Lastwiderstand unendlich groß ist ($I_L=0, R_L=\infty$). Dann gilt

$$I_{Z\max}(I_L=0) = \frac{U_{e\max} - U_{Z\min}}{R_{V\min}} \quad (3)$$

Die Gleichungen (1) bis (3) verdeutlichen die Grenzen der möglichen Variationsbereiche von Eingangsspannung und Laststrom bei gegebener Dimensionierung. Zugleich liefern sie Bedingungen für die Bemessung des Vorwiderstandes R_V entsprechend den vorgegebenen bzw. geforderten Variationsbereichen. Aus den Gleichungen (1) und (2) folgt

$$\frac{U_{e\max} - U_{Z\min}}{I_{Z\max} + \frac{U_{Z\min}}{R_{L\max}}} \leq R_V \leq \frac{U_{e\min} - U_{Z\max}}{I_{Z\min} + \frac{U_{Z\max}}{R_{L\min}}} \quad (4)$$

Nach Umstellen von (1) und (3) ergibt sich für den Leerlauf

$$\frac{U_{e\max} - U_{Z\min}}{I_{Z\max}} \leq R_V \leq \frac{U_{e\min} - U_{Z\max}}{I_{Z\min} + \frac{U_{Z\max}}{R_{L\min}}} \quad (5)$$

3 Praktische Umsetzung

Bei der praktischen Umsetzung der beschriebenen Vorgehensweise sind bezüglich der Auswahl eines geeigneten Vorwiderstands nicht nur dessen zulässige Verlustleistung und Auslieferungstoleranz, sondern nötigenfalls auch der Temperaturkoeffizient und Angaben zur Alterung zu beachten. Sollte Gleichung (4) bzw. (5) auch nicht mit einem eng tolerierten Widerstand R_V und einer Z-Diode mit eingengtem Toleranzbereich der Durchbruchspannung erfüllbar sein, müssen die vorgegebenen Schwankungsbereiche von Eingangsspannung und Laststrom überdacht und im erforderlichen Umfang eingeschränkt werden.

Als Ergebnis sollte immer eine Schaltung mit zulässigen Toleranzkombinationen von Vorwiderstand und Z-Diode zur Verfügung stehen, deren stabilisierende Wirkung voll gegeben ist, wenn die Schwankungen von Eingangsspannung und Last in den vorgegebenen Bereichen liegen. Solche Voraussetzungen müssen beispielsweise für eine Serienproduktion erfüllt werden. Ein Maß für die stabilisierende Wirkung der Schaltung ist der Glättungsfaktor G , definiert gemäß

$$G = \frac{\Delta U_e}{\Delta U_a} \quad (6)$$

Aus der Ersatzschaltung nach Bild 5 lässt sich die Kennliniengleichung der Z-Diode

$$U_Z = U_{Z0} + r_Z I_Z \quad (7)$$

herleiten. Das Einfügen der Kennliniengleichung (7) in (6) bei Anwendung der Spannungsteilerregel für die unbelastete Schaltung führt zu

$$G(I_L=0) = 1 + \frac{R_V}{r_Z} \quad (8)$$

Daraus folgt, dass für eine gute Glättungs- bzw. Stabilisierungswirkung der beschriebenen Schaltung stets $R_V \gg r_Z$ gewählt werden sollte. Dem entgegen stehen die dabei am Vorwiderstand auftretenden erheblichen Verluste zusätzlich zu denen an der Z-Diode. In der Praxis ist demnach immer ein Kompromiss unter Beachtung der konkreten Anforderungen zu suchen. Aus Bild 5 und Gleichung (8) ist ersichtlich, dass der dort angegebene Glättungsfaktor einen für Leerlaufbetrieb gültigen Minimalwert darstellt. Kommt es im Normalbetrieb zu einer Belastung der Schaltung, schaltet sich der Lastwiderstand praktisch parallel zum differentiellen Widerstand der Z-Diode, wodurch sich der resultierende differentielle Widerstand vermindert. Damit erhöht sich auch der Glättungsfaktor.

Abschließend sei auf die Möglichkeit einer zwei- oder mehrfachen Hintereinanderschaltung der Anordnung nach Bild 1 verwiesen, was aber nur in Ausnahmefällen sinnvoll sein dürfte. Wegen der stets auftretenden Verluste ist eine Einschränkung der praktischen Anwendung der Z-Dioden-Stabilisierung auf geringe Leistungen zweckmäßig. Dort stellt die einfache Stabilisierungsschaltung oft eine technisch und ökonomisch gute Lösung dar.