

Der Innenwiderstand

Auf Strom- und Spannungsquellen wie z. B. Batterien, Dynamos, Generatoren, Netzgeräten oder Solarzellen ist stets ein Spannungswert (in Volt) angegeben.



Schließt man nun aber einen Verbraucher an, z. B. ein Glühlämpchen, und misst die am Widerstand des Verbrauchers abfallende Spannung, so stellt man fest, dass diese gemessene Spannung meist kleiner ist als diese angegebene Spannung. Woran liegt das?

(Hinweis: Im Folgenden wird der Einfachheit halber nur noch von Spannungsquellen gesprochen, gemeint sind aber stets auch Stromquellen).

Spannungsquellen haben selbst einen Widerstand

Den elektrischen Widerstand einer Spannungsquelle bezeichnet man als **Innenwiderstand** (R_i). Die Ursache für den Innenwiderstand liegt in der Beschaffenheit der Spannungsquelle selbst.

- Bei der **Batterie** z. B. rührt der Innenwiderstand von den Widerstandsverlusten im Elektrolyten her, die bei der Energieumwandlung (chemische in elektrische) auftreten. Alkalimangan-Mignon-Batterien haben z. B. einen relativ geringen Innenwiderstand. Je nach Belastungsdauer liegt dieser Widerstand kurzzeitig bei einer 1,5-Volt-Mignon-Batterie bei ca. 0,01 Ohm und steigt bei längerer Belastung auf ca. 1 Ohm.
- Ganz anders bei **Solarzellen**: Hier ist der Innenwiderstand relativ hoch und stark von der Beleuchtungsstärke abhängig. Bei einer 0,6V/150mV-Siliziumsolarzelle beträgt der Innenwiderstand bei heller Beleuchtung bis zu 4 Ohm. Bei Anschluss eines niederohmigen Verbrauchers sinkt die Spannung daher deutlich ab.

Unter der Annahme eines Innenwiderstands kann man eine reale Spannungsquelle durch folgendes Ersatzschaltbild darstellen: Eine ideale Spannungsquelle (U_0) mit konstanter Spannung und einem variablen Widerstand R_i . Die Spannung, die an dieser „Ersatzschaltung“ abfällt, ist die sog. Klemmspannung (U_K), also die „reale“ Spannung.

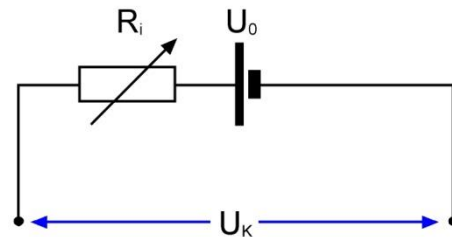


Abb. 1: Ersatzschaltbild für eine Spannungsquelle mit Innenwiderstand.

Nach dem Ohm'schen Gesetz gilt zwischen Spannung (U), Stromstärke (I) und Widerstand (R) folgender Zusammenhang:

$$U = R \cdot I$$

Zusammen mit der Kirchhoff'schen Maschenregel folgt daraus für die Klemmspannung (siehe Abb. 1):

$$U_K + R_i \cdot I = U_0$$

Eigenschaften von Spannungsquellen

Mithilfe des Innenwiderstands kann man folgende Eigenschaften einer Spannungsquelle erklären:

Eigenschaft	In der Praxis
Je höher der fließende Strom bzw. der Innenwiderstand der Stromquelle ist, desto niedriger wird die Klemmspannung .	Ein Auto mit teilentladener oder überalterter Autobatterie springt im Winter nicht an. Der Innenwiderstand ist so hoch, dass die Klemmspannung nicht ausreicht, den Anlasser kräftig genug durchzudrehen.
Fließt kein Strom (es liegt kein Verbraucher an, man spricht vom sog. Leerlauf), so ist die Klemmspannung gleich der idealen Spannung, man spricht von der Leerlaufspannung .	Dies macht man sich z. B. zunutze, um die Spannung einer Spannungsquelle auszumessen. Der Widerstand im Messgerät ist so groß, dass über das Messgerät praktisch kein Laststrom fließt. Das Messgerät misst also die Leerlaufspannung. Einige typische Leerlaufspannungen: Alkali-Mignon-Batterie: 1,5 V 0,5V/150mA-Solarzelle: 0,55 V
Der maximal aus einer Batterie entnehmbare Strom, der sog. Kurzschlussstrom , ist durch den Innenwiderstand beschränkt. Es kann also kein unendlich hoher Strom fließen.	Die für die Alkali-Mignon-Batterie (1,5 V) angegebenen 80 A (Vorsicht!) sind z. B. ein solcher Kurzschlussstrom. Er fließt beim Kurzschließen mit einem ca. 1 mm dicken Kupferdraht. Eine 0,5V/150mA-Solarzelle hat einen Kurzschlussstrom von 0,11 A.

Innenwiderstand bei Reihen- und Parallelschaltung von Spannungsquellen

Aus der Praxis weiß man, dass man durch die Reihenschaltung von zwei, drei usw. gleichartigen Batterien die doppelte, dreifache usw. Spannung erhält. Benötigt man einen höheren Strom, so muss man die Batterien parallel schalten.

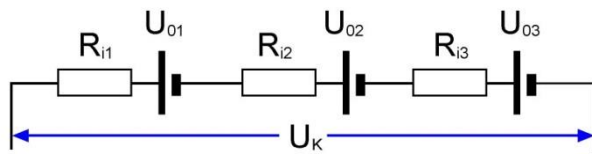
Wie verhält sich dabei der Innenwiderstand? Und verhalten sich alle Spannungsquellen gleich?

Batterie

Der Innenwiderstand einer einzelnen Batterie ist konstant.

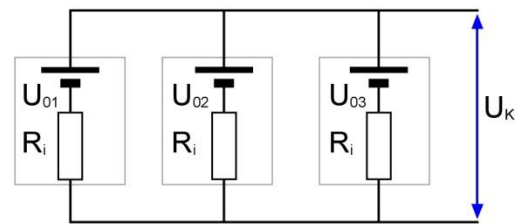
Betrachtet man die Reihenschaltung von Batterien im Ersatzschaltbild (siehe Abb. 2), so wird klar, dass sich neben den Spannungen auch die Innenwiderstände aufaddieren, da auch sie in Reihe geschaltet sind. Bei einer Reihenschaltung von zwei Batterien verdoppelt sich also der Innenwiderstand usw. Diese Erhöhung des Innenwiderstands führt zu einer Verringerung des Kurzschlussstroms.

Analog ergibt sich bei Parallelschaltung (siehe Abb. 3) eine konstante Spannung bei einem kleineren Gesamt-Innenwiderstand. Bei der Parallelschaltung von zwei Batterien halbiert sich also der Innenwiderstand usw. Dies führt letztlich zu höheren Strömen.



$$R_{i, \text{ges}} = R_{i1} + R_{i2} + R_{i3}$$

Abb. 2: Ersatzschaltbild für die Reihenschaltung von Spannungsquellen. Der Gesamt-Innenwiderstand ist die Summe der einzelnen Innenwiderstände.



$$R_{i, \text{ges}} = R_i / 3$$

Abb. 3: Ersatzschaltbild für Parallelschaltung von Spannungsquellen. Der Gesamtinnenwiderstand entspricht dem Innenwiderstand einer Spannungsquelle geteilt durch die Anzahl der geschalteten Spannungsquellen.

Beispiel: Schließt man an die Mignonzelle einen Verbraucher relativ geringer Leistung an, wie z. B. einen Solarmotor (z. B. 0,3 V/4 mA), ist der Spannungsabfall am Innenwiderstand der Batterie gering. Schließt man dagegen einen stärkeren Motor oder eine Glühlampe höherer Leistung an, wird mehr Spannung am Innenwiderstand der Batterie abfallen, die nutzbare Leistung sinkt.

Solarzelle

Der Innenwiderstand einer Solarzelle hängt von Aufbau, Fläche und Material der Solarzelle selbst ab, aber auch von der Beleuchtungsstärke.

Um den Vergleich mit einer Batterie bzw. einem Akku zu ermöglichen, bei denen wir ja auch vom geladenen Zustand ausgehen, betrachten wir die Solarzelle **bei optimaler Beleuchtung**.

Die Verhältnisse bei der Verschaltung von Solarzellen sind analog der von Batterien. Wird ein Verbraucher mit großem Widerstand angebracht, z. B. eine LCD-Uhr, so fällt praktisch die volle Spannung der Solarzelle am Verbraucher ab. Wird dagegen ein relativ niederohmiger Motor in den Stromkreis eingebracht, so fällt ein Großteil der Spannung am Innenwiderstand der Solarzelle ab, die nutzbare Leistung sinkt. Je nach Typ benötigen Elektromotoren eine gewisse Mindestspannung und Stromstärke. Viele sog. Solarmotoren laufen zwar ab ca. 0,3 Volt an, benötigen aber relativ viel Strom. Im Vergleich zum Widerstand des Solarmotors ist dann der Innenwiderstand der Solarzelle hoch und der Motor dreht mit einer Solarzelle nicht oder nur langsam.

Deshalb stellt man bei Experimenten mit mehreren Solarzellen und Solarmotoren oft fest, dass die Parallelschaltung die deutlich höhere Leistung und damit höhere Drehzahl des Motors liefert als die Reihenschaltung.

Hingegen ist **bei geringerer Beleuchtung** oftmals die Reihenschaltung günstiger, um den Motor überhaupt zum Anlaufen zu bringen. Der Grund dafür ist, dass mit abnehmender Beleuchtungsstärke der Innenwiderstand der Solarzelle steigt und dadurch nicht nur der nutzbare Solarstrom sinkt, sondern auch die Spannung am Verbraucher.

Ähnliches sieht man beim Betrieb von Leuchtdioden mit Solarzellen. Parallelschalten nützt da selbst bei optimaler Beleuchtung nichts, sie leuchten nicht, solange nicht durch Reihenschaltung mehrerer Solarzellen deren Mindestspannung erreicht wird.

Zusammenfassung

Die nutzbare Leistung einer Strom- bzw. Spannungsquelle hängt immer vom Verhältnis von Innenwiderstand der Quelle zu dem des Verbrauchers ab.

Theoretisch gilt, dass die nutzbare Leistung maximal wird, wenn der Widerstand des Verbrauchers dem Innenwiderstand der Quelle gleicht. Zusätzlich gilt, dass es je nach Art des Verbrauchers evtl. bestimmte erforderliche Mindestspannungen oder Mindestströme gibt.

Praktisch arbeiten wir z. B. im Haushaltstromnetz mit relativ hohem Verbrauchswiderstand. Die Spannung bleibt weitgehend stabil und für die üblichen Verbraucher steht immer genügend Strom zur Verfügung. Der Innenwiderstand der Strom- bzw. Spannungsquelle „Hausstromnetz“ scheint also keine Rolle zu spielen. Würde man allerdings Verbraucher extrem geringen Widerstands anschließen, z. B. mehrere Heizradiatoren, würde die Spannung merklich am Leitungsnetz abfallen (= Innenwiderstand der Quelle), die Leitungen würden heiß werden und durchschmoren. Deshalb gibt es Sicherungen.

Dieselben Gesetzmäßigkeiten beobachten wir auch bei einer einzelnen Solarzelle, nur dass wir hier ganz am unteren Ende der Leistungsskala von Strom- und Spannungsquellen liegen. Deshalb fallen relativ geringe Änderungen bei der Belastung durch den Verbraucher sofort deutlich ins Gewicht. Da die einzelne Solarzelle nur relativ geringe Spannung und Stromstärke liefert, werden sie zu sog. Solarmodulen zusammengeschaltet. Durch Kombination von Parallel- und Serienschaltung erreicht man so Spannungen von ca. 36 V und 8 A pro Modul. Durch Zusammenschalten vieler solcher Module entsteht eine Strom- und Spannungsquelle, die sich zum Einspeisen (des wechselgerichteten Stroms) ins öffentliche Stromnetz eignet.