

Der LDR als steuerbarer Widerstand

Manfred Zollner

Fotowiderstände (LDRs) stellen eine preiswerte Möglichkeit zur Realisierung steuerbarer Übertragungssysteme dar. In der Musikelektronik sind das Amplitudenmodulatoren (Tremolo, Kompressor), Frequenzmodulatoren (Vibrato), Delaymodulatoren (Phaser, Flanger, Chorus), sowie Kombinationen dieser Effekte. Nachteilig bei LDR-Schaltungen sind vor allem zwei Effekte: die Trägheit bei der Umsetzung von Lichtänderungen in Widerstandsänderungen, und Nichtlinearitäten (Klirrfaktor). Die folgenden Seiten beschreiben diese Effekte quantitativ anhand von Messergebnissen. Anwendungen ist ein eigener Beitrag gewidmet [GITEC Knowledge Base].

Fotowiderstände sind zweipolige Halbleiterbauteile, deren Widerstand von der Beleuchtungsstärke abhängt: je heller sie beleuchtet werden, desto niederohmiger werden sie. Als Abkürzung hat sich das englische LDR durchgesetzt (LDR = light dependent resistor). LDRs kommen zum Einsatz, wenn eine Systemgröße zeitvariant sein soll. Ein typisches Beispiel ist die automatische Verstärkungsänderung (Amplitudenmodulator, *Tremolo*) im Fender-Röhrenverstärker, bei dem eine blinkende Glühlampe einen LDR beleuchtet. Der LDR verändert in einem Widerstandsteiler die Verstärkung, d.h. die Lautstärke. Zunächst wurde dieser Effekt erzeugt, indem der Arbeitspunkt einer Verstärkerröhre periodisch verschoben wurde. Dies änderte die Steilheit, und damit die Verstärkung. Ab ca. 1963 kam dann der **Optokoppler** mit Glühlampe/LDR zum Einsatz. Wesentlich aufwändiger wird die Schaltung, wenn nicht die Lautstärke, sondern die Tonhöhe verändert (moduliert) werden soll. Hierfür muss statt des Betrags der Übertragungsfunktion deren Phase zeitabhängig verändert werden, was eine zeitvariante Filterschaltung erfordert (steuerbares Allpassfilter). Der VOX AC30, aber auch zahlreiche Orgeln nutzten diesen Effekt, der üblicherweise *Vibrato* genannt wird. Nur Leo Fender benutzte die Begriffe Tremolo und Vibrato synonym und verteilte sie regellos (bzw. nach Marketinganforderungen) in seinen Prospekten.

Mit einem steuerbaren **Allpass**, d.h. einer zeitvarianten Verzögerung (Delay) lässt sich durch Addition zum Original mit wenig Aufwand ein steuerbares **Kammfilter** erzeugen, zentrale Einheit aller Phaser/Flanger/Chorus-Effektgeräte. In Zeiten, in denen AD/DA-Wandler und DSPs noch nicht verfügbar waren, bot ein durch Licht steuerbarer Widerstand eine gute und preiswerte Möglichkeit, Audiosignale analog zu modulieren. Danach kam mit den sog. Eimerkettenspeichern die zeitdiskrete und wertkontinuierliche Signalverarbeitung, danach mit ADC (Analog/Digital-Wandler) DSP (Digitaler Signalprozessor) und DAC (Digital/Analog-Wandler) die zeitdiskrete und wertdiskrete Signalverarbeitung. Diese Technologien stellen jeweils eigenständige Lösungen dar, mit teilweise sehr unterschiedlichen Eigenschaften. Einem LDR-Modulator wird durch die Anzahl der LDRs (z.B. 4 oder 8) eine harte Grenze gesetzt, bei einem DSP-System ergeben sich demgegenüber viel mehr Freiheitsgrade. Je nach deren Ausnutzung werden sich die erzeugten Effekte dann klanglich unterscheiden. LDR-Modulatoren sind inzwischen zwar veraltet, nicht wenige Musiker empfinden ihre Klangeffekte aber als erhaltenswert. Auf den folgenden Seiten werden deshalb die Eigenschaften typischer Fotowiderstände analysiert – Anwendungen (z.B. Uni-Vibe) beschreibt ein eigener Artikel.

Licht kann als elektromagnetische Schwingung hoher Frequenz dargestellt werden, zumeist über ihre Wellenlänge charakterisiert. Die Wellenlänge des für das menschliche Auge am Tag sichtbaren Lichts liegt zwischen 0.4 und 0.7 nm, nachts verschiebt sich das Maximum zu etwas kleineren Wellenlängen (Purkinje-Verschiebung). **Abb. 1** zeigt die auf das Maximum normierte relative Spektralempfindlichkeit des menschlichen Auges, sowie entsprechende Kurven ausgewählter LDRs (Herstellerangaben). Soll ein LDR in einer Kamera die Belichtungsstärke messen, muss er eine dem menschlichen Auge vergleichbare Spektralempfindlichkeit besitzen. Für einen Modulator gilt diese Forderung nicht, da sollten nur das Spektrum der Lichtquelle und die Spektralempfindlichkeit des LDRs in etwa zusammenpassen. Wenn in der Musikelektronik dennoch LDRs vorherrschen, deren maximale Spektralempfindlichkeit der des Auges entspricht, dürfte das daran liegen, dass diese relativ billig erhältlich waren, und z.T. auch immer noch sind.

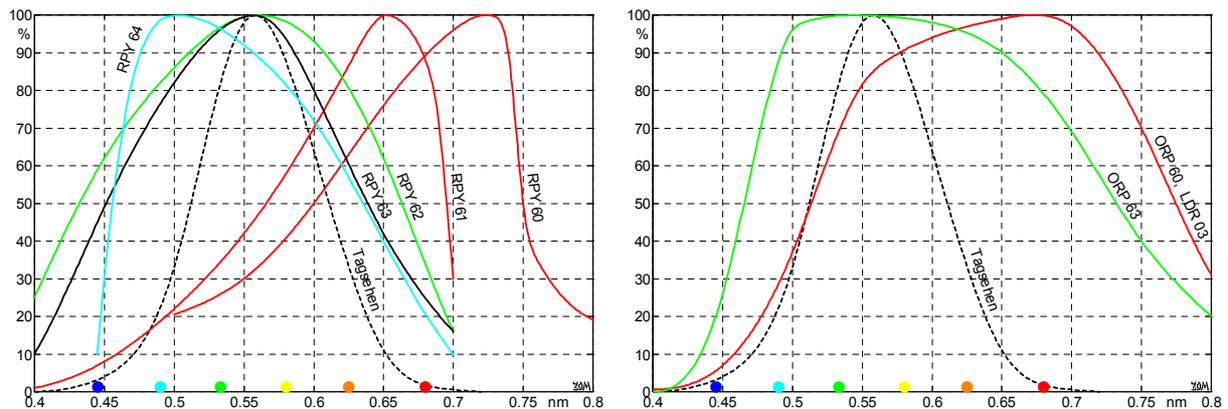


Abb. 1: Spektrale Empfindlichkeit des menschlichen Auges (---), und Daten einiger LDRs (Siemens, Valvo).

Die in Abb. 1 links spezifizierten LDRs sind allein aufgrund ihres Aussehens nicht zu unterscheiden. Ihre unterschiedliche Spektralempfindlichkeit ergibt sich durch die Verwendung unterschiedlicher Halbleitermaterialien (sowie aufgrund spezieller Herstellungsverfahren). Für maximale Empfindlichkeit im sichtbaren Bereich werden Cadmium, Selen und Schwefel kombiniert: RPY 60 = CdSe (Cadmiumselenid), RPY 61 = CdSSe (Cadmiumsulfoselenid), RPY 62 = CdSSe, RPY 63 = CdSSe, RPY 64 = CdS (Cadmiumsulfid). Die rechts dargestellten Valvo-LDRs sind CdS-Widerstände.

Im Optokoppler eines Fender-Röhrenverstärkers wird der LDR durch eine **Glimmlampe** beleuchtet. Für deren orange-rotes Licht eignet sich ein LDR mit einem spektralen Maximum um 650 nm. Glimmlampen und LEDs erzeugen schmalbandige Lichtspektren, sie dürfen deshalb mit schmalbandigen LDRs nur kombiniert werden, wenn die spektralen Maxima ungefähr übereinstimmen. **Glühlampen** produzieren demgegenüber ein breitbandiges, kontinuierliches Spektrum, das mit zunehmender Helligkeit vom infraroten in den rot-gelben Bereich wandert. Die Helligkeit einer Glimmlampe ist nur schwer steuerbar – sie ist entweder an, oder aus. LEDs sind gut steuerbar und schnell, Glühlampen sind ebenfalls gut steuerbar, aber träge.

Je heller ein LDR beleuchtet wird, desto niederohmiger wird er. Das Maß für die Beleuchtungsstärke ist das Lux, abgekürzt lx. In **Abb. 2** sind für verschiedene LDRs Widerstandskurven angegeben. Im dunklen Zustand sind leicht M Ω -Werte erreichbar, beleuchtet Werte um einige 100 Ω bis einige k Ω . Was hierbei für nicht geringes Entsetzen bei Schaltungsentwicklern sorgen dürfte, ist der gigantische Streubereich: Fertigungsbedingt kann der Widerstandswert um z.T. mehr als eine Zehnerpotenz streuen! In Zeiten, da Metallfilmwiderstände $\pm 1\%$ Toleranz aufweisen, ist das eine kaum vorstellbar große Streubreite.

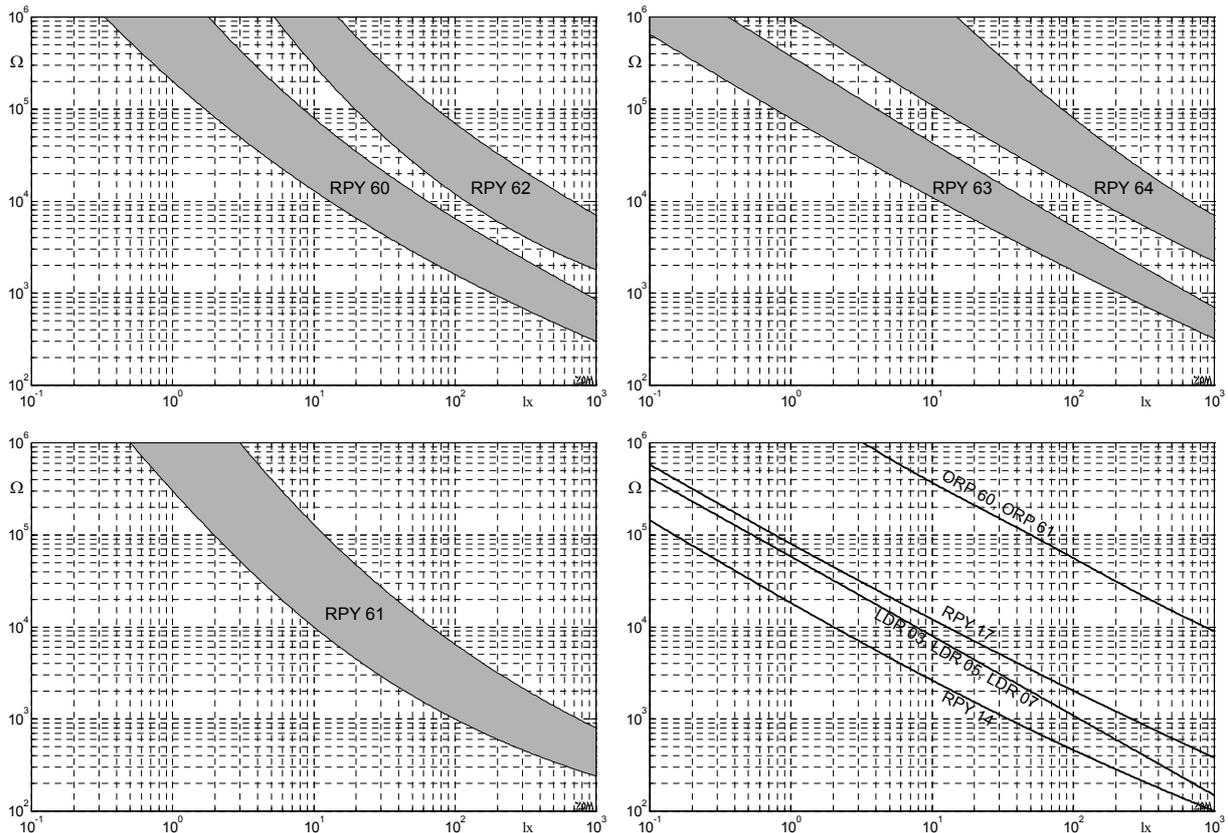


Abb. 2: LDR-Widerstandswerte in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke (Herstellerangaben).

Aber immerhin wird die große Streubreite der LDRs von einigen Herstellern angegeben. Was jedoch in kaum einem Datenblatt zu finden ist: die ausgeprägte **Nichtlinearität**. Die Angabe "maximal 100 V" ist hierbei bedeutungslos, bei Audio-Schaltungen muss man sich mit viel kleineren Spannungen begnügen. Ein Beispiel hierzu zeigt **Abb. 3**. Ein LDR 03 wurde hierfür mit eingepprägter Sinus-Spannung betrieben, sein Stromverlauf wurde gemessen. Die Beleuchtungsstärke war so eingestellt, dass sich der LDR-Widerstand zu 10 kΩ ergab. Die Messung erfolgte für drei verschiedene Spannungen: 0.8 V (schwarz), 2.8 V (blau), 5.8 V (rot), jeweils Spitzenwert. Die Strom/Spannungs-Kennlinie ist für kleine Aussteuerung gerade, für große Aussteuerung gekrümmt. Was aber besonders seltsam ist: **Die Steigung im Nullpunkt ist aussteuerungsabhängig!** Kann der LDR hellsehen, kann er die Zukunft voraussagen? "Ahnt" er bei Nulldurchgang den künftigen Extremwert? Wie macht er das?

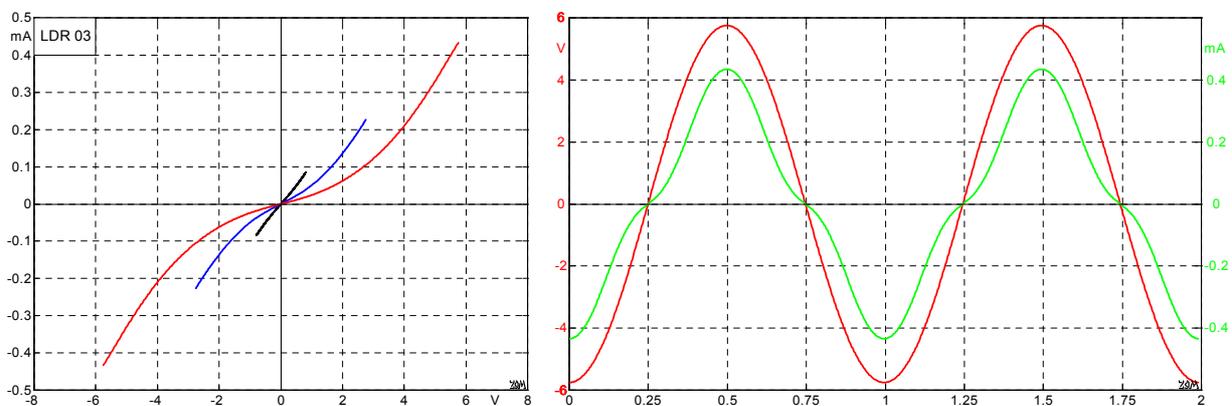


Abb. 3: Strom/Spannungs-Kennlinie für drei verschiedene Aussteuerungen (links), Zeitfunktionen (rechts). Die Beleuchtungsstärke war bei allen drei Messungen dieselbe, LDR-Widerstandswert = 10 kΩ.

Offensichtlich "weiß" der LDR, was da auf ihn zukommt, wenn sich seine Spannung von null ausgehend (betragsmäßig) vergrößert: Geht's zu einem hohen Scheitelwert (5.8 V), muss der Stromanstieg im Nullpunkt flacher verlaufen als wenn das Maximum schon bei 0.8 V erreicht wird. Aber woher "weiß" der LDR den zukünftigen Grenzwert? Nun, er "weiß" ihn nicht, er kann sich als kausales System nur an der Vergangenheit orientieren. Das "Geheimnis" lüftet eine einfache Messung (**Abb. 4**): Im Gegensatz zu Abb. 3 ist hier ein Einschaltvorgang dargestellt. Die Beleuchtungsstärke ist konstant (jedoch höher als in Abb. 3), bei $t = 0$ wird die sinusförmige Spannung eingeschaltet. Zunächst ist der LDR noch relativ niederohmig, doch obwohl die Beleuchtungsstärke unverändert bleibt, vergrößert sich der LDR-Widerstand auf ungefähr das Doppelte, der Strom nimmt dementsprechend ab ($\tau \approx 2$ ms). Die Steigung im Nullpunkt hängt also nicht vom zukünftigen Extremwert ab, sondern ist ein Speichereffekt.

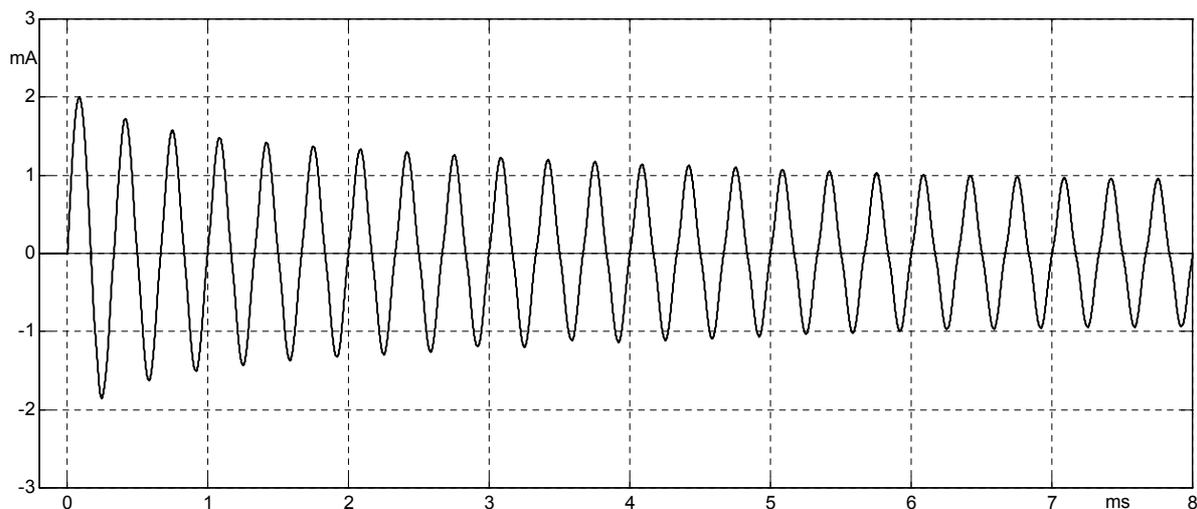


Abb. 4: Strom-Zeitfunktion für sinusförmige Spannung (3,8 V Amplitude), Spannung bei $t = 0$ eingeschaltet. LDR 03, aber mit einem gegenüber Abb.3 verringerten LDR-Widerstandswert.

Die Literatur beschreibt **LDR-Speichereffekte** nur nach Änderung der Beleuchtungsstärke. Dass sich auch bei Spannungs- bzw. Stromänderungen Speichereffekte zeigen, ist erklärbar, aber weitgehend unbekannt. Gut dokumentiert ist hingegen der optische Speichereffekt: Nach dem Abschalten der Beleuchtung dauert es sehr lange, bis der LDR seinen endgültigen Dunkelwiderstand erreicht – in Datenblättern ist da schon mal von 30 Minuten die Rede (Valvo). Dieser dann sehr hohe Widerstands-Endwert hat für die Praxis aber wenig Bedeutung – da sind oft Dunkelwerte um 1 M Ω ausreichend, und die werden (ja nach Typ) in z.B. 1 s erreicht. Schneller geht's in die andere Richtung: Nach dem Einschalten der Beleuchtung fällt der Widerstand innerhalb weniger Millisekunden auf ausreichend niederohmige Werte.

Die beiden folgenden Abbildungen (**Abb. 5**, **Abb. 6**) sind Valvo-Datenblättern entnommen, sie zeigen die Strom- bzw. Widerstandsänderung nach dem Ein- bzw. Ausschalten der Beleuchtung. Je nach LDR-Typ können sich aber auch ganz andere Verläufe ergeben, die Variationsbreite ist sehr groß. Orientierende Daten liefert hierzu **Abb. 7**: Ein Widerstandsteiler (mit dem LDR im Längsweig, Querwiderstand = 10 k Ω) erzeugt die an der Ordinate angegebene Dämpfung nach dem Abschalten der Beleuchtung. Zu den Verzögerungen des LDRs kommen u.U. die des Leuchtmittels: LEDs und Glühlampen sind für Audiomodulatoren praktisch verzögerungsfrei, Glühlampen erzeugen durch die thermische Trägheit des Glühfadens aber eine zusätzliche Verzögerung. Da LDRs um so langsamer reagieren, je hochohmiger sie sind, sollte für schnelle Reaktion eine niederohmige Schaltung zur Anwendung kommen.

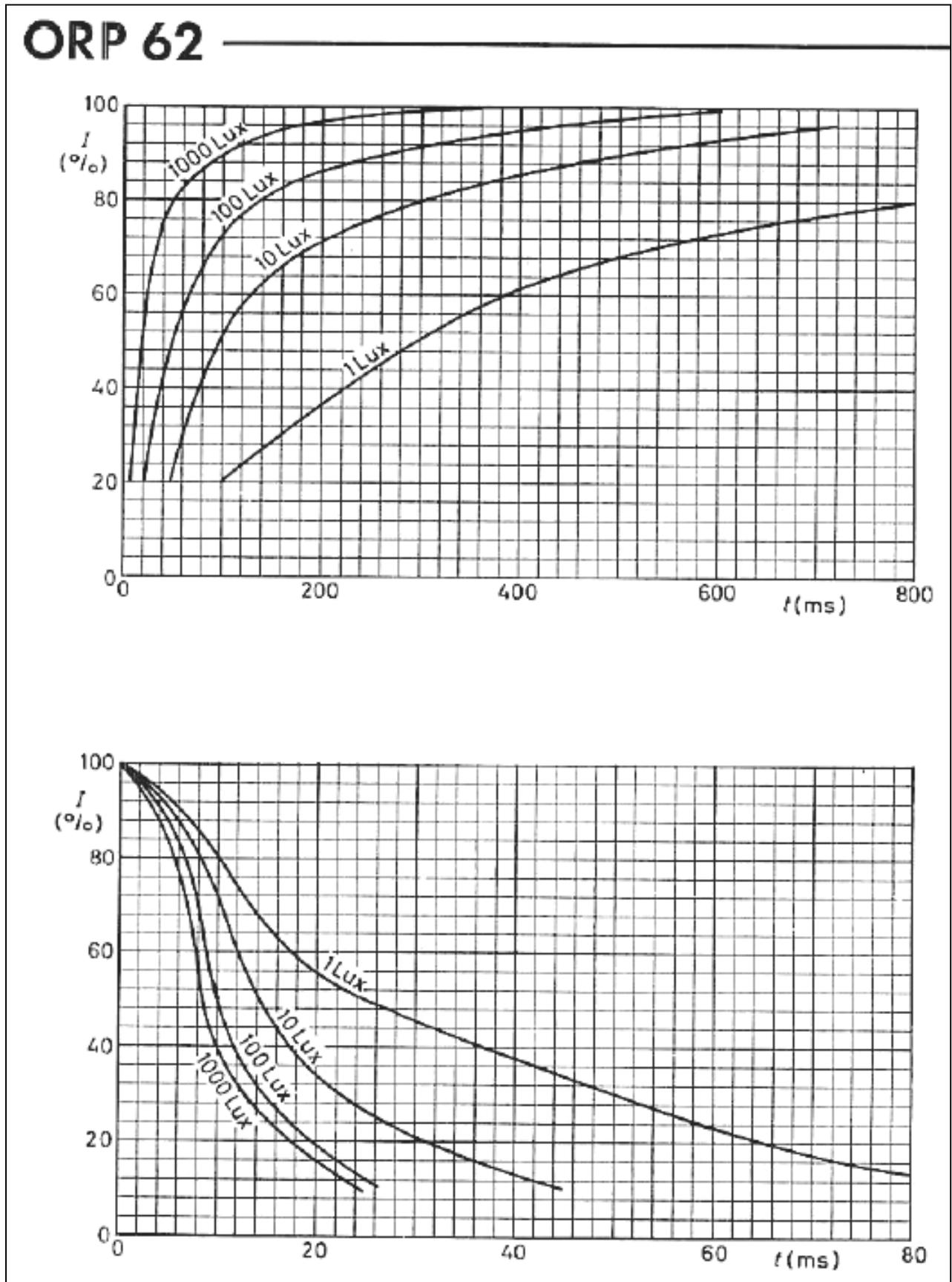


Abb. 5: Stromänderung nach An- bzw. Abschalten der Beleuchtung; Herstellerangabe: Valvo.

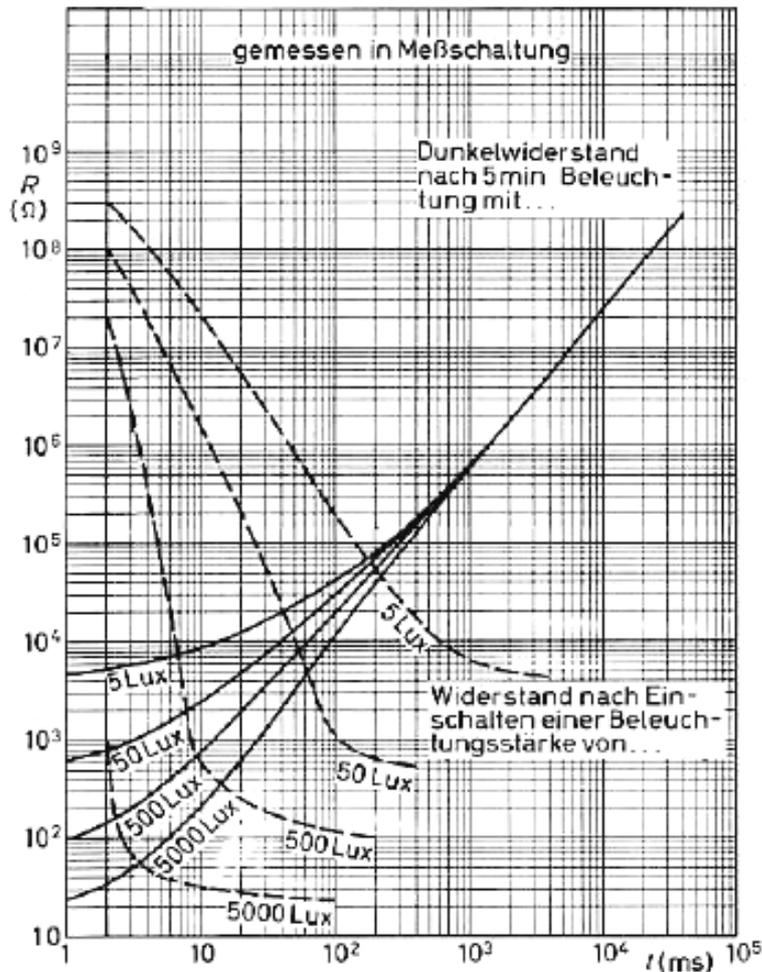


Abb. 6: Widerstandsänderung nach An- bzw. Abschalten der Beleuchtung; Valvo RPY 18.

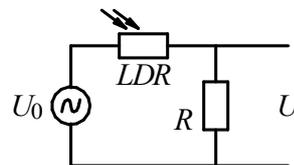
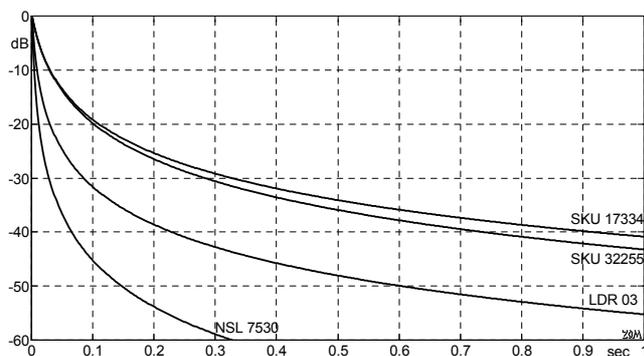


Abb. 7: Dämpfungsverlauf nach dem Abschalten der Beleuchtung; verschiedene LDRs.

Ist der LDR im Längszweig verschaltet, wie in Abb. 7, wird er relativ hochohmig betrieben. Hat er bei Beleuchtung z.B. $1\text{ k}\Omega$, könnte man den Querwiderstand für nicht allzu große Helligkeitsdämpfung zu $10\text{ k}\Omega$ wählen. Für 40 dB Dunkel-Dämpfung müsste der LDR-Widerstand auf $1\text{ M}\Omega$ anwachsen, was schon 1 s dauern kann. Mit dem LDR im Querzweig (Abb. 8) wird für gleiche Dämpfungsvariation ein Längswiderstand von $100\text{ k}\Omega$ benötigt. Auch hierbei muss der LDR im Bereich $1\text{ k}\Omega - 1\text{ M}\Omega$ arbeiten, die Unterschiede liegen im Zeitverhalten: Mit Längs-LDR ist der Dämpfungsanstieg langsam, der -Abfall schnell, mit Quer-LDR ist's umgekehrt. Aus psychoakustischer Sicht wäre der Längs-LDR besser (zeitliche Verdeckung).

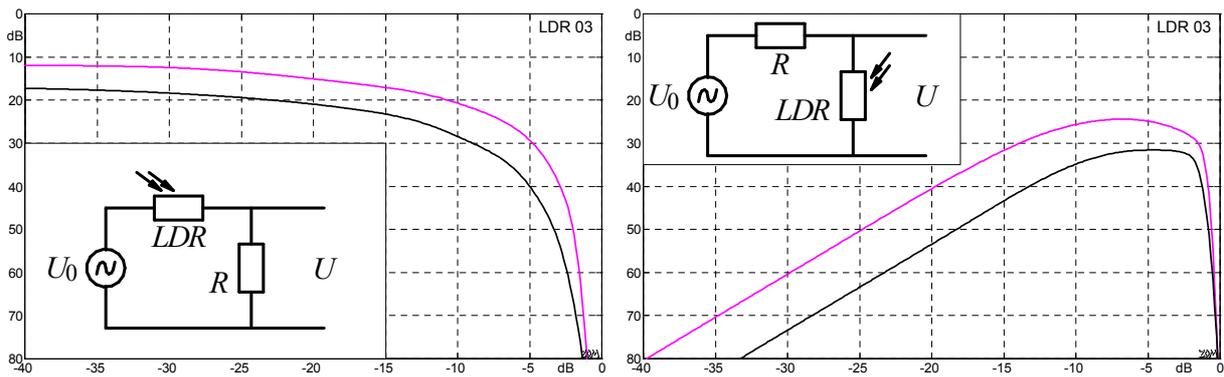


Abb. 8: Klirrdämpfung in Abhängigkeit vom Übertragungsmaß $20 \cdot \lg(U/U_0)$ dB, zwei verschiedene LDR 03.

Neben dem Zeitverhalten gibt es aber ein noch wichtigeres Unterscheidungskriterium zwischen Längs- und Quer-LDR (**Abb. 8**): Die **Klirrdämpfung**. LDRs sind Halbleiter, aber ohne pn-Übergang – sie können bipolar betrieben werden und zeigen eine nahezu punktsymmetrische Kennlinie mit überwiegend kubischem Klirrfaktor. Zunächst zum linken Bild: Die Generatorspannung ist fest ($3.2 V_{\text{eff}}$, 1 kHz), der Querwiderstand ist $R = 10 \text{ k}\Omega$. Die Beleuchtungsstärke wird variiert, sodass sich die Durchgangsdämpfung ändert. Mit Beleuchtung beträgt die Dämpfung ca. 1 dB, die Verzerrungen sind sehr gering. Das muss so sein, weil mit zunehmender Helligkeit der LDR-Widerstand und damit die Spannung am LDR abnimmt. Bei Dunkelheit liegt hingegen fast die gesamte Spannung am LDR, sein Strom wird nichtlinear verzerrt (**Abb. 3**), an R entsteht das Spannungsabbild dieses verzerrten Stroms.

Ganz anders beim Quer-LDR (rechtes Bild). Bei Dunkelheit liegt wieder fast die gesamte Spannung am LDR, und am Längswiderstand ($R = 100 \text{ k}\Omega$) entsteht eine kleine, verzerrte Spannung. Die LDR-Spannung ergibt sich als Differenz von Generatorspannung (unverzerrt) und Spannung an R (verzerrt, aber sehr klein). Die LDR-Spannung entspricht also nahezu der unverzerrten Generatorspannung. Bei Beleuchtung nimmt die LDR-Spannung ab, und damit nehmen auch die LDR-Verzerrungen ab. Bezüglich der Verzerrungen ist also die rechts dargestellte Schaltung (Quer-LDR) besser geeignet. Die Verzerrung wird maximal bei ca. 6 dB Durchgangsdämpfung (d.h. bei Spannungshalbierung).

In **Abb. 9** ist die Spannungsabhängigkeit der Klirrdämpfung dargestellt. Quer-LDR, $100 \text{ k}\Omega$, 6 dB Durchgangsdämpfung (für die Messungen konstant), Generatorspannung variiert. Bei Gitarren-Effektgeräten sollte die Generatorspannung $1 V_{\text{eff}}$ nicht wesentlich überschreiten.

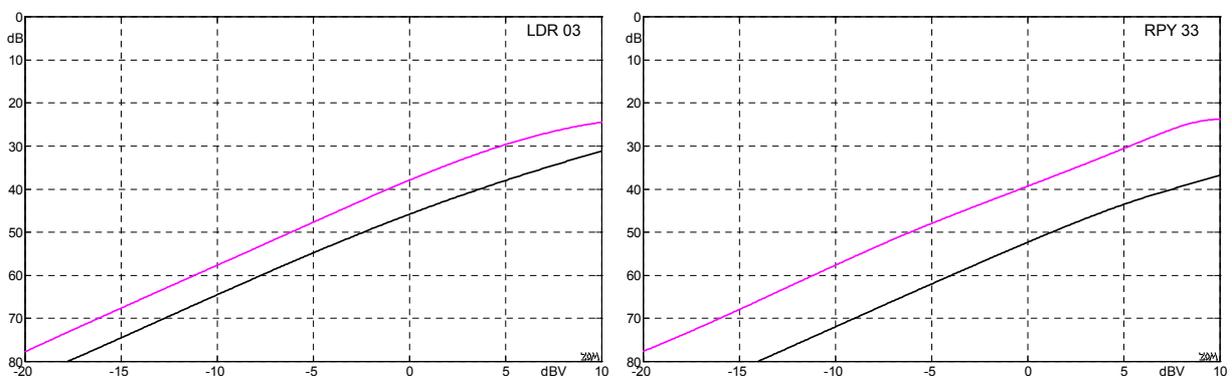


Abb. 9: Spannungspegel-Abhängigkeit der Klirrdämpfung für 6 dB Durchgangsdämpfung, je 2 LDRs. Auf der Abszisse ist der Pegel der Generatorspannung aufgetragen, 0 dBV = $1 V_{\text{eff}}$.

Außer in resistiven Spannungsteilern (zur Amplitudenmodulation) findet man einen LDR auch in zeitvarianten Filterschaltungen – zumeist um ein Kammfilter oder eine Frequenzmodulation zu realisieren. Zentrales System ist hierbei ein RC-Hochpass oder -Tiefpass, mit dem LDR als steuerbaren Widerstand. **Abb. 10** zeigt, dass auch hierbei die LDR-Querzweigschaltung Vorteile bietet. Die linearen Übertragungseigenschaften derartiger steuerbarer Filter werden in einem eigenen Fachartikel erläutert [GITEC Knowledge Base].

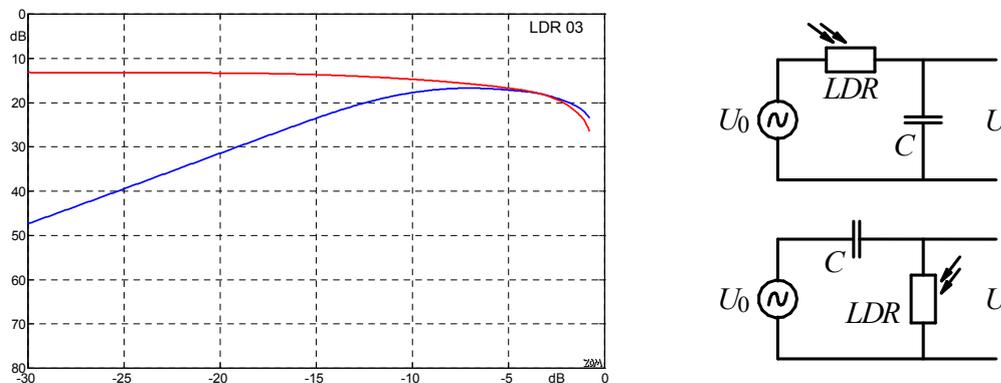


Abb. 10: Klirrdämpfung in Abhängigkeit vom Übertragungsmaß $20 \cdot \lg(U/U_0)$ dB, $C = 10$ nF, $3.2V_{\text{eff}}$, 1 kHz. LDR im Längsweig (Tiefpass, rot) bzw. im Querweig (Hochpass, blau).

Fachartikel in www.gitarrenphysik.de

- | | |
|--|--|
| 1 Gitarren-Lautsprecher | 13 Die Basswiedergabe beim Studio-Monitor |
| 2 Studio-Lautsprecher | 14 Vom Sinn und Unsinn der CSD-Wasserfälle |
| 3 Welche ECC83 darf's denn sein? | 15 Artefakte bei Wasserfall-Spektrogrammen |
| 4 Reamping and Reguitaring | 16 Equalizer und Allpässe, Teil 1 – 3 |
| 5 Gitterstrom bei Trioden | 17 Studio- und Messmikrofone, Teil 1 – 5 |
| 6 Der Verzerrer | 18 Die Dummy-Load als Lautsprecher-Ersatz |
| 7 Der Range-Master rauscht | 19 Nichtlineare Modelle |
| 8 Raumakustik | 20 Wie misst man Elkos? |
| 9 Saitenalterung | 21 Der Lautsprecher-Phasengang |
| 10 Lautsprecherkabel | 22 Negative Gruppenlaufzeit |
| 11 Schaltungsvarianten für das Reguitaring | 23 Der LDR als steuerbarer Widerstand |
| 12 Verzerrungen: gerade oder ungerade? | 24 Steuerbare Allpässe – Uni-Vibe & Co. |
| | 25 Der JFET als steuerbarer Widerstand |