



Foto: 100, Uni-Jena / Falk Rombergner

Strommessung: Die Daten richtig deuten

Die Messung der Lichtstärke gehört in der Photonik zum Alltag. Ebenso häufig muss der Strom einer Fotodiode in eine Spannung gewandelt und verstärkt werden

EINE HILFSTELLUNG ZUR WAHL DES VORVERSTÄRKERS FÜR FOTOEMPFÄNGER

Der Blick in das Datenblatt eines Transimpedanzverstärkers gibt dem Anwender alle Informationen, die er braucht, um das richtige Gerät zu finden – vorausgesetzt, er kann die Daten richtig interpretieren und bewerten.

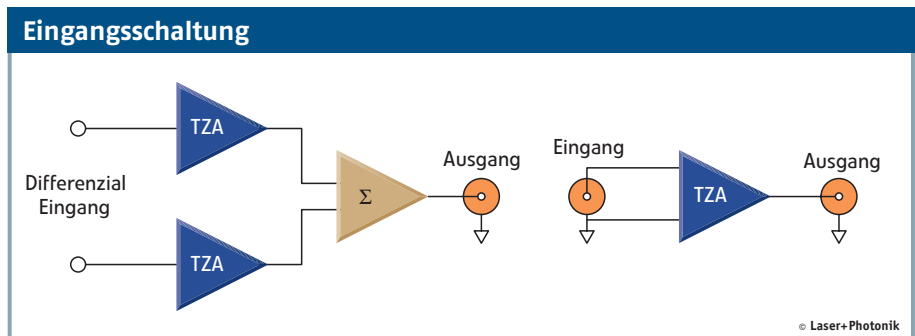
STEVE WRIGHT

Nahezu jede beliebige Photonikanwendung ist mit der Messung der Lichtstärke in irgendeiner Form verbunden. Irgendwo in der Kette der Signalerzeugung und -verarbeitung befindet sich ein Fotoempfänger, dessen Ausgangssignal in eine Spannung gewandelt werden muss. Diese Umwandlung mag trivial und unkritisch sein – wie die Erzeugung des digitalen Null- oder Eins-Ausgangs einer Lichtschranke. Andere Aufgaben sind keineswegs trivial, etwa die gleichzeitige Messung von vier Fotodioden über vier Dekaden an Leistung, um Polarisationszustände präzise in Echtzeit zu bestimmen.

Beide Beispiele haben eines gemeinsam: Der durch Lichteinfall erzeugte Strom einer Fotodiode muss in eine für die Signalverarbeitung verwendbare Spannung gewandelt wer-

den. Und zwar so schnell und präzise, wie es unter Berücksichtigung der Kosteneffektivität für die Anwendung notwendig ist. Diese Stelle der Messkette ist kritisch, denn Verzerrungen, die in die Signalinformation hineingebracht werden, kann auch eine noch so ausgeklügelte Elektronik später nicht mehr berichtigen. Ebenso wenig, wie eine Bildverarbeitungssoftware nicht in der Lage ist, ein unscharfes Foto wieder deutlich zu machen.

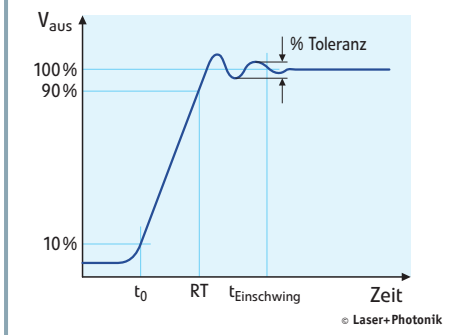
Nicht nur Fotodioden erzeugen kleine Ströme (Femtoampère, fA, bis Milliamperè, mA), die präzise gewandelt und verstärkt werden müssen. Auch Fotomultiplier (PMT) für die Spektroskopie oder Elementarteilchenforschung (Nanoampère-, nA-, bis mA-Ausgangsströme), Raster-Tunnel-Mikroskope (Pikoampère, pA, bis nA), Ionisationsdetektoren (nA bis Mikroampère, µA), pyroelektrische Detektoren für IR-Messungen beziehungsweise Laserener-



1 Differenzial- (links) und potenzialbezogener (Single-Ended-) Signaleingang (rechts)

© 2007 Carl Hanser Verlag, München www.laser-photonik.de Nicht zur Verwendung in Intranet- und Internet-Angeboten sowie elektronischen Verteilern.

Einschwingzeit



2 Das Signal oszilliert nach einer sprunghaften Veränderung des Eingangsstroms. RT – Anstiegszeit, T_{setting} – Einschwingzeit

giemessinstrumente (nA bis mA) und piezoelektrische Detektoren für extrem präzise Weg- und Druckmessungen (fA bis μ A) benötigen einen geeigneten Vorverstärker.

Der folgende Leitfaden zur sachkundigen Auswahl dieses Vorverstärkers beschränkt sich auf lineare Verstärker, denn sie sind in präzisen messtechnischen Anwendungen am häufigsten.

Ein Blick in das Datenblatt eines Transimpedanzverstärkers (TZA) – so heißen Strom-Spannungswandelnde Verstärker im Fachjargon – liefert die notwendigen Informationen für eine intelligente Auswahl. Zur besseren Übersicht lassen sich die Daten als eingangsbezogen, ausgangsbezogen, Daten zur logischen Steuerung und mechanische Daten klassifizieren.

Eingangsbezogene Auswahlkriterien

■ **Eingangsbereich (Input Current Range)** – Hier wird spezifiziert, wie hoch der maximale Strom für einen gegebenen Verstärkungsbereich linear verarbeitet werden kann. Der gewählte Strombereich muss größer sein als der größte erwartete Signalstrom. Er sollte jedoch nicht zu groß gewählt werden, da sonst der analoge Rauschabstand ungünstig oder bei einer anschließenden Digitalisierung die digitale Auflösung zu grob wird.

■ **Eingangsschaltung (Input Configuration)** – Man unterscheidet zwischen differenzial- und potenzialbezogenen (Single-Ended-) Eingängen (**Bild 1**).

Mit dem Differenzialeingang stehen zwei Signalleitungen für die Elektroden des Detektors zur Verfügung. Da die meisten Fotoempfänger auch nur zwei Elektroden haben, beispielsweise die Anode und

Katode der Fotodiode, erlaubt diese Konfiguration eine potenzialfreie Beschaltung. Mit einer Fotodiode als Empfänger ist diese Schaltung etwas vorteilhafter für die Linearität, denn nur in diesem Fall wird die Fotodiode wirklich in Kurzschluss betrieben. Alle potenzialbezogenen Schaltungen führen zu einer Gegenspannung der Fotodiode und daher zu nichtlinearem Verhalten. Die Differenzialschaltung hat ferner den Vorteil, dass eingefangene Störsignale, die sich auf beiden Signalleitungen befinden, ausgelöscht werden (Common Mode Rejection).

Der potenzialbezogene Eingang ist notwendig, wenn die Fotodiode vorgespannt werden soll. Diese Technik verschiebt den Sättigungspunkt der Fotodiode zu höheren Leistungen hin, und die Fotodiode reagiert schneller.

■ **Rauschäquivalenter Eingangsstrom (Noise Equivalent Current)** – Hier werden Daten über das detektoreigene Rauschen angegeben. Dieses Rauschen überlagert das Rauschen des eigentlichen Signals und begrenzt die Fähigkeit des Detektors, geringe Strommengen eindeutig nachzuweisen. Da das Rauschen eine statistische bipolare Menge ist, werden Effektivwerte (RMS) angegeben.

Im Gegensatz zu den üblichen spektral begrenzten Signalen, die man beobachten

KONTAKT

Artifex Engineering e.K.,
26725 Emden,
Tel. 0 49 21 /4 50 -93 64,
Fax 0 49 21 /4 50 -93 65,
www.artifex-engineering.com
www.artifex-optics.com

will, ist Rauschen über die gesamte Verstärkungsbandbreite des Verstärkers vorhanden. Dementsprechend ist der Gesamtrauschanteil am Ausgang des Verstärkers von der verarbeiteten Signalbandbreite abhängig. Deshalb werden in der Regel zwei Möglichkeiten der Darstellung dieses Rauschens verwendet: als spektrale Rauschstromdichte (möglicherweise auch in Abhängigkeit von der Frequenz) oder als gesamtes Rauschstromäquivalent für eine gegebene Bandbreite. Beispielsweise führen eine konstante spektrale Rauschstromdichte von $1 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ und eine Signalbandbreite von 1 MHz zu einem gesamten Rauschstrom- ▶

► äquivalent von $1 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}} \times \sqrt{1 \text{ MHz}} = 1 \text{ nA}_{\text{RMS}}$. Die Angabe in $\text{A}/\sqrt{\text{Hz}}$ ist nützlich, wenn der Anwender die Bandbreite des Verstärkers beeinflussen will, etwa mit einem Bandpass- oder Tiefpassfilter. Wenn er den Verstärker unmodifiziert verwendet, ist die Angabe des Gesamt rauschens in A_{RMS} vorteilhafter. Wie das obige Beispiel zeigt, ist aber Vorsicht geboten, wenn man Verstärker zweier Anbieter vergleicht: Die Rauschstromdichte ist numerisch immer deutlich kleiner als der Gesamt rauschstrom, und zwar um den Faktor $\sqrt{\text{Bandbreite}}$.

Es ist auch zu beachten, dass eine Beobachtung am Oszilloskop in etwa die Spitze-Spitze-Werte des Rauschens herausstellt. Diese sind typischerweise fünf- bis sechsmal so groß wie der Effektivwert. Ferner muss man bedenken, dass das Oszilloskop selbst beträchtlich zum Rauschen beiträgt.

Ausgangsbezogene Kriterien

■ Verstärkung (Gain oder Output Scale)

Die Aufgabe eines linearen Transimpedanzverstärkers ist es, einen Strom in eine linear proportionale Spannung zu wandeln: $U_{\text{out}} = G \times I_{\text{in}}$, wobei G die Verstärkung des Instruments darstellt. Die Einheit von G ist $[G] = \text{V}/\text{A} = \Omega$. Die Verstärkung wird so gewählt, dass die erwarteten Signalströme (einschließlich aller Rausch- und Störanteile) den Eingangsstrombereich möglichst vollständig ausnutzen, aber nicht übersteuern.

■ **Ausgangsbereich (Output Voltage Range)** – Hier wird spezifiziert, in welchem Bereich die Ausgangsspannung erzeugt werden kann, etwa 0 bis 5 V oder – 10 bis + 10 V.

■ **Anstiegs- und Abfallzeit (Rise / Fall Time)** – Ein Verstärker kann nicht unendlich schnell auf eine Signaländerung reagieren. Ein gebräuchliches Maß für die Schnelligkeit ist die Zeit, die benötigt wird, einer schlagartigen Änderung von zehn Prozent auf 90 Prozent zu folgen. Diese Angabe heißt Anstiegszeit (Rise Time) und ist mit der Bandbreite verknüpft. Für viele Anwendungen kann man von folgender Beziehung ausgehen: $RT = \ln(9)/(2\pi f_{3\text{dB}}[\text{Hz}]) = 0,35/(f_{3\text{dB}}[\text{Hz}])$, wobei RT die Anstiegszeit und $f_{3\text{dB}}$ die Bandbreite des Verstärkers ist.

■ **Einschwingzeit (Settling Time)** – Sie gibt an, wie lange das Signal nach einer stufenartigen Änderung des Eingangsstroms oszilliert, bis das Ergebnis endgültig innerhalb einer angegebenen Toleranz bleibt. Diese Zeit ist für eine Ein-Prozent-

INFO: Praxisbeispiel für den Umgang mit den Spezifikationen



Ein System zur Echtzeitmessung von Polarisationszuständen lässt sich so realisieren, dass ein Strahl in vier Teilstrahlen aufgeteilt wird. Die Teilstrahlen werden dann so in ihren Polarisations-eigenschaften optisch verarbeitet, dass eine Leistungsmessung der resultierenden Teilstrahlen die vier Stokes'schen Parameter wiedergibt [1]. Das System soll ein Auslöschverhältnis (Polarization Extinction Ratio, PER) von $1 : 10^4$ nachweisen können. Der Eingang ist für Strahlungsleistungen von 5 mW ausgelegt. Die gemessenen Signale sollen in 10-bit-Auflösung mit einer Rate von 10 kS/s mittels 0- bis 5-V-A/D-Wandler digitalisiert werden.

Zur Bestimmung der erforderlichen Parameter des benötigten Transimpedanzverstärkers gehen wir wie folgt vor:

■ Es sind vier Kanäle zu vermessen, also benötigen wir entweder vier Einkanal-Instrumente oder ein Vierkanal-Instrument. Die zweite Variante wird deutlich platzsparender und kostengünstiger sein.

■ Die Ausgangsspannung sollte etwa 0 bis 5 V betragen.

■ Das maximale Eingangssignal ist 5 mW je vier Kanäle (minus Verluste) $\approx 1 \text{ mW}$ je Kanal $\approx 0,5 \text{ mA}$ je Kanal mit Si-Fotodioden. Daraus ergibt sich eine *kleinste Verstärkung* von $5 \text{ V}/0,5 \text{ mA} = 10^4 \text{ V}/\text{A}$.

■ Die kleinsten Leistungen, die zu messen sind, sind über die PER von 10^4 zu ermitteln: $I_{\text{min}} = 0,5 \text{ mA}/10^4 = 5 \times 10^{-8} \text{ A} = 50 \text{ nA}$. Die notwendige *höchste Verstärkung* ist $5 \text{ V}/50 \text{ nA} = 10^8 \text{ V}/\text{A}$. Wir benötigen also *einen Verstärker mit mindestens fünf Verstärkerstufen in Dekadenabstufung oder 15 Verstärkerstufen in 1-2-5-Abstufung*.

■ Um die gewünschte 10-bit- (= $2^{10} = 1024$) Auflösung zu realisieren, benötigen wir einen oberen *gesamten Äquivalent-Rauschpegel* von $50 \text{ nA}/1024 \approx 50 \text{ pA}$.

■ Die Schnelligkeit ergibt sich aus der Digitalisierungsrate wie folgt: 10 kS/s bedeutet, dass der Verstärker innerhalb von $1/(10\,000 \text{ s}^{-1}) = 100 \mu\text{s}$ eingeschwenkt sein sollte. Falls die *Einschwingzeit* nicht spezifiziert ist, entspricht dies in etwa einer Anstiegszeit von zirka $50 \mu\text{s}$ oder einer Bandbreite von zirka $0,35/50 \mu\text{s} = 7 \text{ kHz}$.

■ Ein guter Transimpedanzverstärker sollte auf jeden Fall eine *Genauigkeit* von *einem Prozent* aufweisen.

■ Für diese Anwendung ist eine gute Linearität notwendig. Insbesondere soll-

te der *Verstärkungsschrittfehler* unter *einem Prozent* bleiben, denn die Messung erfordert eine dynamische Aufnahme stark variierender Ströme über den gesamten Messbereich des Verstärkers (50 nA bis 500 μA).

■ Diese Anwendung ist langsam genug (zirka 7 kHz), sodass die Ausgangsimpedanz keine Rolle spielt.

■ Da dieser Verstärker ständig durch alle Verstärkungsstufen in Sub-ms-Zeiten geschaltet werden muss, ist eine Direktsteuerung (Steuerleitungen) ohne protokollierte Schnittstelle notwendig. Die hohe Empfindlichkeit (50 pA Rauschpegel) setzt eine galvanisch entkoppelte Schnittstelle voraus.

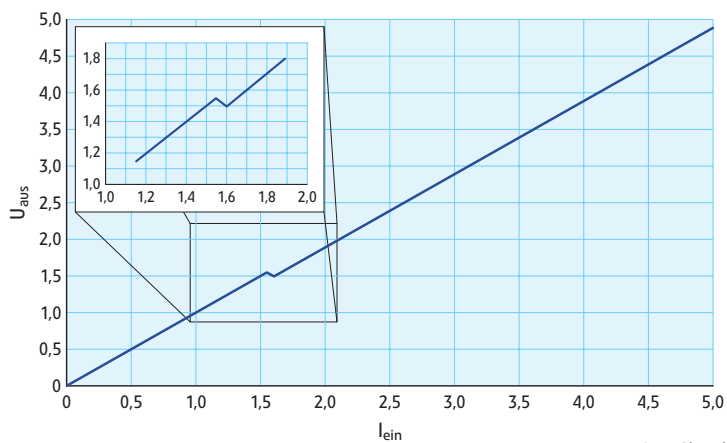
■ Ebenfalls bedingt durch die hohe Empfindlichkeit ist ein kleines, abgeschirmtes Gehäuse nötig, damit die Schaltung unmittelbar an den Fotodioden platziert werden kann.

Die Verstärker »TZA45u100M6GD4« mit Differenzialeingang und sechs Verstärkungsstufen in Dekadenschritten sowie die eigens für diese Art von Anwendung entwickelten »TZA2u100M16GS4« mit Single-Ended-Eingang und 16 Verstärkungen in 1-2-5-Abstufung sind bestens für diese Anwendung geeignet (Bild).

LITERATUR

- 1 Edward Collett: »Polarized Light«; Marcel Dekker Inc., New York, NY/ USA 1993

Linearität



3 Beim Übergang zwischen Verstärkungsstufen sind sogenannte Verstärkungsschrittfehler zu beachten

Toleranz in etwa zweimal so lang wie die Anstiegszeit. Diese Angaben sind in **Bild 2** schematisch dargestellt.

■ **Genauigkeit (Accuracy)** – Ein Maß, oft in Prozent angeben, für die Abweichung des gemessenen vom wahren Ergebnis. Sehr wichtig: Die Genauigkeit ist nicht die Auflösung. Ein Messinstrument kann eine hohe Auflösung haben, aber trotzdem falsche Werte liefern.

■ **Linearität (Linearity)** – Ein Maß, oft in Prozent oder dB angegeben, für die Abweichung des Verstärkerausgangs von einem streng linearen Verhalten. In diesem Zusammenhang ist es bei Verstärkern mit mehreren Verstärkungsstufen wichtig, den Übergang zwischen den einzelnen Verstärkungen zu betrachten. Dieses Verhalten (Verstärkungsschrittfehler) zeigt **Bild 3**.

■ **Ausgangsimpedanz (Output Impedance)** – Die scheinbare Impedanz des Verstärkers als Signalquelle gesehen. Für hochfrequente Signalanteile (ab zirka 200 kHz) und längere Verbindungsstrecken (ab etwa 1 m) ist eine Impedanzanpassung mit dem Kabel und mit dem folgenden Verstärker ratsam. Dies verhindert Rückreflexionen und Signalverzerrungen. Der Standard für die Messsignalübertragung ist 50 Ω Wellenimpedanz.

Steuerlogik- und mechanische Daten

■ **Schnittstelle (Interface)** – Wie werden die Einstellungen am Verstärker vorgenommen? Per Schalter oder per Schnittstelle? Die Wahl hängt davon ab, ob das System stark automatisiert ist oder eher Labor-

charakter hat. Bei einer Schnittstellensteuerung ist eine Bauart mit Steuerleitungen (im Gegensatz etwa zu einer RS-232-Schnittstelle) von Vorteil: Die Steuerung erfolgt sofort, ohne Verzögerung durch die Umsetzung mit einem Mikrocontroller. Empfindliche Anwendungen mit einer Steuerung direkt vom PC aus sollten wegen des hohen Störeinflusses eine galvanisch isolierte Schnittstelle bevorzugen.

■ **Gehäuseart und -größe** – Dieser Punkt scheint nebensächlich und nur eine Frage der Zweckmäßigkeit zu sein. Tatsächlich aber hat diese Wahl weitreichende Konsequenzen für die Messtechnik. Da die zu messenden Ströme in der Regel klein sind, ist die Aufnahme von Störungen zu vermeiden. Ein guter Verstärker soll deshalb so klein wie möglich sein, damit er direkt an die Signalquelle montiert werden kann. Auch die Bauart des Gehäuses ist wichtig, um eine gute elektromagnetische Abschirmung zu gewährleisten. ■

Fazit: Entscheidungshilfe

Die wichtigen Informationen für die Auswahl eines TZA lassen sich in eingangsbezogene, ausgangsbezogene, Daten zur logischen Steuerung und mechanische Daten unterteilen. Das Praxisbeispiel (**Info-Kasten**) zeigt, wie man mit ihrer Hilfe zielsicher ein geeignetes Gerät finden kann.

AUTOR

STEVE WRIGHT ist Geschäftsleiter von Artifex Engineering in Emden