Werner Henkel

Bestimmung der Linearität von A/D-Umsetzern

Die wichtigsten Qualitätsmerkmale eines A/D-Umsetzers sind bekanntlich Auflösung, maximale Abtastfrequenz und Linearität. Der Begriff der Linearität unterliegt keinerlei Normung. Deshalb sind Herstellerangaben wegen der verschiedenen Meßbedingungen nur mit Vorbehalt vergleichbar. Die hier beschriebene Methode erlaubt es, diesen Teil der Spezifikationen praxisnah zu bestimmen und zu überprüfen.

In der Literatur haben sich besonders zwei Definitionen der Linearität eingeführt: die integrale und die differentielle Linearität. Zur Erläuterung dieser beiden Begriffe betrachte man die Übertragungskennlinien zweier 3-Bit-A/D-Umsetzer (*Bild 1*).

Die integrale Unlinearität I stellt die betragsmäßig maximale Abweichung der eingetragenen Verbindungslinie in der Übertragungscharakteristik (rot) von der Verbindungslinie der idealen Charakteristik (schwarz) dar, während sich die differentielle Nichtlinearität aus dem Quotienten aus Intervallgrößen mit konstantem digitalem Ausgangswort ergibt.

Im allgemeinen wird das Maximum der differentiellen Nichtlinearität folgendermaßen angegeben:

$D = \mathrm{Max}(D_i) = \mathrm{Max}[(l_i - l_0)/l_0] = \mathrm{Max}(l_i/l_0 - 1)$

l_i, l_0: siehe Bild 1

Max: betragsmäßiges Maximum

Eine sehr aussagekräftige Darstellung des Verhaltens eines A/D-Umsetzers ist ein Diagramm, bei dem der Quotient aus l_i und l_0 über den diskreten, digitalen Ausgangsworten (Sollwerte) aufgetragen ist. Die Meßanordnung besteht aus einem Video-Testsignalgenerator, der einen linearen Sägezahn liefert, und einem Logikanalysator. Das Prinzip ist in *Bild 2* skizziert. Übrigens darf die Frequenz der anregenden Sägezahnschwingung nicht mit der Abtastfrequenz des zu prüfenden Umsetzers (Sampling Rate) verkoppelt sein.

Das Maximum der differentiellen Unlinearität ergibt sich wie folgt:

$D = \mathrm{Max}[(Z_i - Z_0)/Z_0] = \mathrm{Max}(Z_i/Z_0 - 1)$

Z_i: Anzahl der Taktzyklen mit konstantem Ausgangswort i (Mittel aus mehreren Messungen)

Z_0: idealerweise zu erwartende Anzahl der Taktzyklen mit konstantem Wort

$Z_0 \approx \overline{Z}_i = T_{sign} \cdot f_{abt}/S$

$\overline{Z}_i$: Mittel über alle Digitalworte i

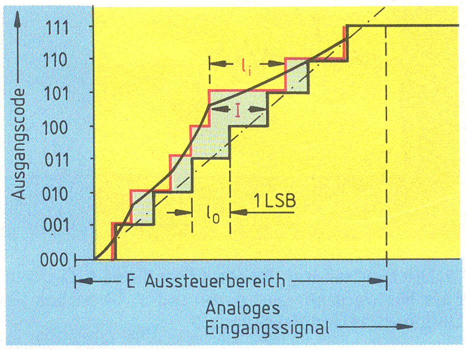

Bild 1. Unlinearitäten eines realen A/D-Umsetzers (rote Kurve) zeigen sich durch Abweichungen von der idealisierten Treppenfunktion des Ausgangscodes in Abhängigkeit von der anregenden Eingangsspannung

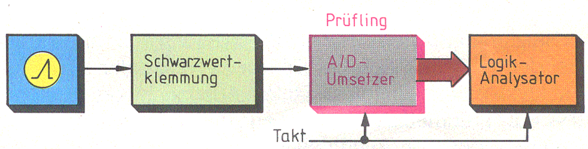

Bild 2. Mit dieser Meßanordnung läßt sich schnell und genau die Unlinearität eines A/D-Umsetzers bestimmen

f_{abt}: Abtastfrequenz

T_{sign}: Zeitdauer zwischen Beginn des Codewortes ...001 und dem Ende des Codewortes ...110

$S = 2^n - 2$

n: Auflösung (Bit)

Es entfallen bei T_{sign} und S das erste und das letzte Codewort, da hier mehr Taktzyklen wegen Überschreitung des Aussteuerbereichs auftreten können.

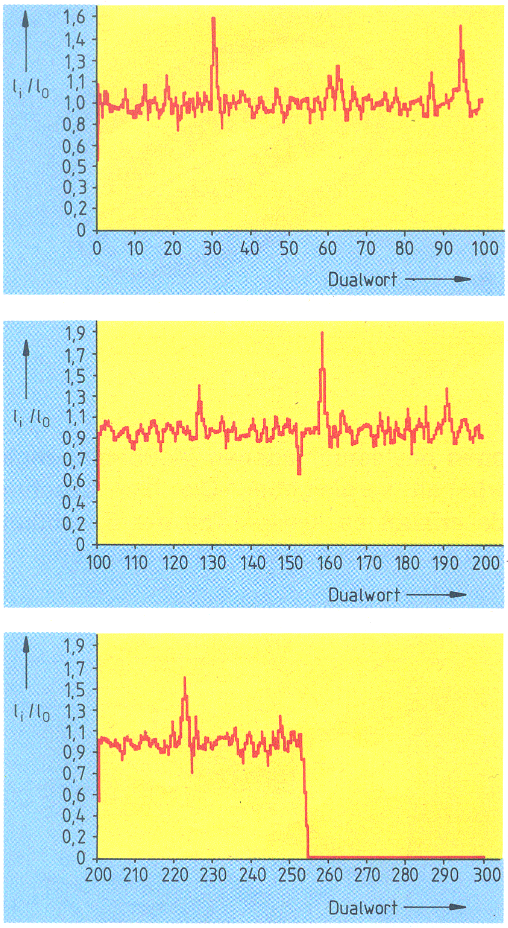

Bild 3. Die Darstellung der Reaktion eines A/D-Umsetzers als Histogramm gibt einen guten Überblick über die Unlinearität des Prüflings.

Die Anzahlen der Taktzyklen läßt sich einfach am Logikanalysator ablesen. Eine Automation des Verfahrens ist über eine entsprechende Schnittstelle möglich.

Bild 3 zeigt die Ergebnisse eines praktisch durchgeführten Tests nach der hier beschriebenen Methode. Ein Histogramm ($Z_i/Z_0 = l_i/l_0$) wurde an einem A/D-Umsetzer TDC 1025 E1C (TRW) aufgenommen, der mit einer Abtastfrequenz von 28 MHz arbeitete. Der anregende Sägezahn wies hierbei eine Anstiegsgeschwindigkeit (Slew Rate) von $2 \cdot 10^4$ V/s auf.

Nach Auswertung von zehn Messungen ergab sich ein Maximum der differentiellen Unlinearität von 0,851 LSB. Die Linearitätsabweichungen im einzelnen lassen sich sehr gut der Hüllkurve des auf Z_0 normierten Histogramms (l_i/l_0) entnehmen. Starke Linearitätsabweichungen traten bei folgenden Dualworten auf:

$32 = 2^5$ $\quad$ $128 = 2^7$
$64 = 2^6$ $\quad$ $160 = 2^7+2^5$
$96 = 2^6+2^5$ $\quad$ $224 = 2^7+2^6+2^5$

Linearitätsfehler finden sich also besonders bei Wechseln höherwertiger Bits.

An dieser Stelle seien die Schwierigkeiten bei der Anwendung dieser Methode nicht verschwiegen. Voraussetzung ist eine ausreichende Linearität des sägezahnförmigen Eingangssignals. Ferner ist eine Schirmung der Verbindungselemente des Logikanalysators unerläßlich, sonst wird der Versuch, diese Methode bei derart hoher Frequenz f_{abt} anzuwenden, unauswertbar.

Literatur

[1] *Seitzer, D.:* Elektronische Analog-Digital-Umsetzer. Berlin/Heidelberg/New York: Springer 1977, S. 138f.

[2] *Prenzl, G.:* Die Prüfung des dynamischen Verhaltens schneller A/D-Umsetzer. ELEKTRONIK 1978, H. 4, S. 97ff.

Der mathematische Hintergrund

Setzt man Störungsfreiheit der Messung voraus, so können bei den n Messungen jeweils nur $INT(\overline{PA})$ oder $INT(\overline{PA}) + 1$ Taktzyklen mit gleichem digitalem Ausgangswort vorkommen ($\overline{PA} = Z_i$: arithmetisches Mittel aus den Periodenanzahlen mit gleichem digitalen Ausgangswort), wobei die Zufälligkeit der Taktphase relativ zum Eingangssignal ausschlaggebend ist. Die (geschätzte) Wahrscheinlichkeit p, mit der die größere Anzahl von Taktzyklen vorkommt, ergibt sich zu $p = \overline{PA} - INT(\overline{PA})$. Die Anzahl der Messungen mit bestimmter Taktperiodenzahl konstanten Ausgangsworts ist binomial verteilt:

$$P(X = j) = \binom{n}{j} p^j (1-p)^{n-j}$$

X, j: Anzahl mit dem Merkmal der Wahrscheinlichkeit p. Man muß sich nun die Frage stellen, wie groß das Intervall bei vorgegebener statistischer Sicherheit $l - \beta$ ist, in welchem der wahre Wert l_i zu finden ist, da es sich bei Z_i ja nur um ein arithmetisches Mittel aus mehreren Messungen handelt.

Analog zur Definition der Konfidenzintervalle bei normalverteilter Grundgesamtheit bestimmt man die Vertrauensintervalle wie folgt: Man beginne beim Wert $j = INT(np + 0{,}5)$ und berechne die zugehörige Wahrscheinlichkeit P nach obiger Formel. Entsprechend verfahre man mit $j + k$ und $j - k$, $k = 0, 1, 2 \ldots$, bis man in der Summe aller Wahrscheinlichkeiten den Wert $l - \beta$ überschritten hat. 2 k stellt dann ein Maß für das Konfidenzintervall dar, das sich dann wie folgt ergibt

$$\approx \left[\begin{array}{l} (\overline{PA} - k/n) \cdot E/(T_s \cdot f_{abt}) \\ (\overline{PA} + k/n) \cdot E/(T_s \cdot f_{abt}) \end{array} \right]$$

T_s: Durchlaufdauer des Sägezahns zum Durchschreiten des Aussteuerbereichs E. (Hinweis: Bei INT(...) werden die Kommastellen abgeschnitten.)