

Isolierte Präzisions-Signalketten für präzise und zuverlässige Datenerfassungen

Dieser Artikel untersucht ein Referenzdesign für eine isolierte Präzisions-Signalkette und deren tiefgreifende Auswirkungen auf die Genauigkeit und Zuverlässigkeit von Anwendungen zur Datenerfassung.

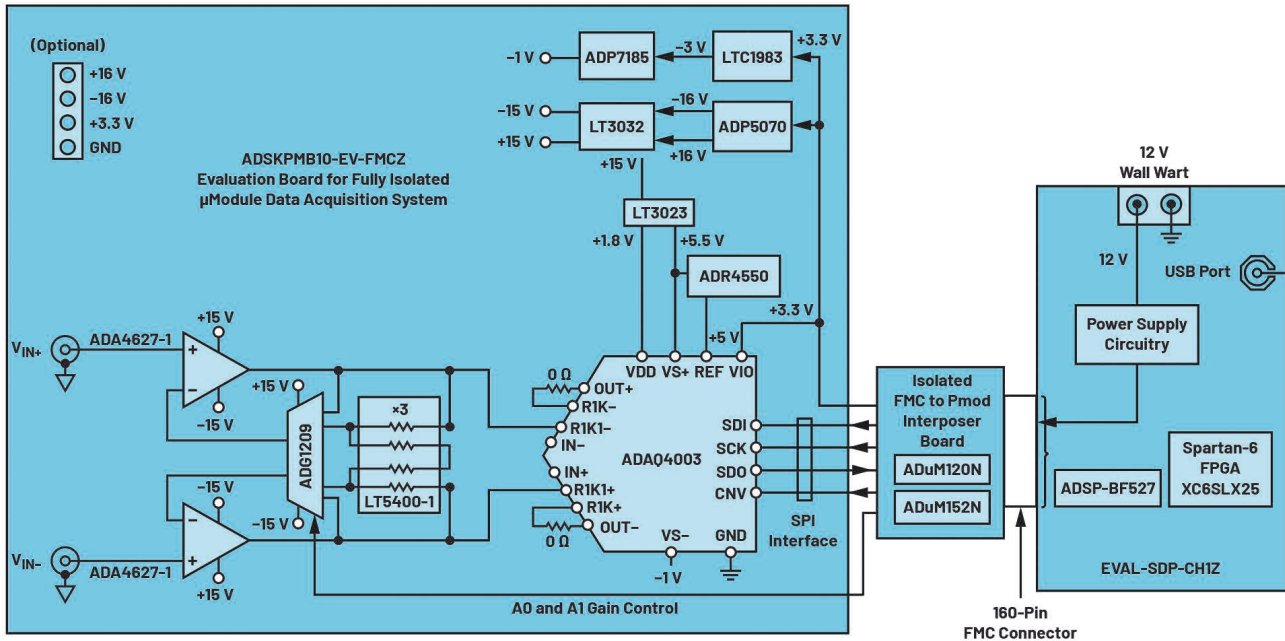


Bild 1: Vereinfachtes Blockschaltbild des einkanaligen, vollständig isolierten und latenzarmen Datenerfassungssystems ADSKPMB10-EV-FMCZ



Einführung

Das digitale Zeitalter hat einen Paradigmenwechsel bewirkt, als dessen Folge Intelligenz zunehmend an die Edge verlagert wird, um neue und komplexe Herausforderungen zu bewältigen. An der Edge sind auch Datenerfassungssysteme angesiedelt, die das zentrale Element dieser Technologie darstellen.

Auf dem Gebiet der Datenerfassungssysteme kommt es in erster Linie auf Präzision und Zuverlässigkeit an, und die Implementierung einer isolierten Präzisions-Signalkette hat sich als entscheidende Voraussetzung erwiesen, um ein Maximum an Genauigkeit und Integrität zu erreichen.

Präzisions-Signalkette

Was sind die Merkmale einer isolierten Präzisions-Signalkette? Unter einer isolierten Präzisions-Signalkette versteht man ein System bzw. eine Schaltung, deren Zweck die präzise

Signalerfassung und -verarbeitung unter Aufrechterhaltung der elektrischen Isolation von der Umgebung ist. Dass die Isolation in die Signalaufbereitungs-Stufen einbezogen wird, dient in erster Linie der funktionalen Sicherheit und der Datenintegrität [1]. Abgesehen davon bringt die Isolation jedoch noch weitere Vorteile mit sich:

- **Eindämmung (Verringerung oder Reduktion) von Rauschen und Störbeeinflussungen:** Der Einsatz von Isolationstechniken (z. B. die mit Übertragern oder Optokopplern realisierte galvanische Isolation) versetzt die Signalkette in die Lage, schwankende Gleichtaktspannungen, Masseschleifen und elektromagnetische Interferenzen (EMI) zu unterdrücken. Die Isolation verhindert, dass externe Störquellen das erfasste Signal verfälschen und sorgt damit für sauberere und genauere Messungen.

Autoren:
Lloben Paculan (oben),
Chelsea Faye Aure (Mitte),
Jan Michael Gonzales (unten)
Analog Devices
www.analog.com

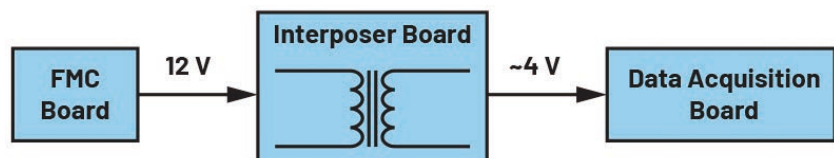


Bild 2: Blockschaltbild der isolierten Stromversorgung der Referenzplattform

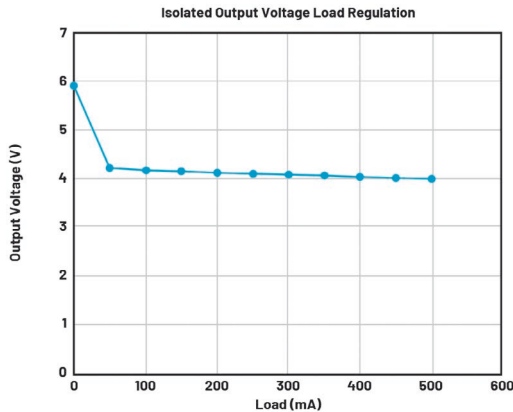


Bild 3: Ausgangsspannung des Push-Pull-Wandlers LT3999 als Funktion des Laststroms

- **Unterbindung von Masseschleifen:** Masseschleifen können zu Spannungsdifferenzen führen, die das gemessene Signal verfälschen. Isolationstechniken unterbrechen die Masseschleifen und beseitigen dadurch effektiv die von unterschiedlichen Massepotenzialen verursachten Störgrößen, sodass sich die Messgenauigkeit verbessert.
- **Sicherheit und Schutz:** Isolationsbarrieren sorgen für elektrische Sicherheit, indem sie verhindern, dass gefährliche Spannungsspitzen, Transienten und Stromstöße an empfindliche Messbauteile gelangen. Dies schützt sowohl die Messschaltungen selbst als auch die angeschlossenen Geräte und sorgt damit für einen sicheren und zuverlässigen Betrieb. Geschützt werden jedoch nicht nur die Schaltungen, sondern auch Entwickler und Endanwender werden durch die Isolation vor Gefahren durch elektrische Schläge bewahrt.

Bauelemente und Techniken

In einer isolierten Präzisions-Signalkette kommen Bauelemente und Techniken zur Anwendung, die gemeinsam für präzise Messungen und die Integrität der Daten sorgen. Entscheidende Komponenten solcher Signalketten sind Präzisionsverstärker, Isolationsbarrieren, Filterelemente und hochauflösende A/D-Wandler (ADCs). Gemeinsam dienen sie dazu, Rauschen zu verringern, Störbeeinflussungen zu minimieren und eine präzise Signalwiedergabe zu erreichen. Bild 1 zeigt ein Beispiel für eine isolierte Präzisions-Signalkette, in der die eben angeführten Bauelemente zum Einsatz kommen. Es handelt sich hier um ein einkanalgiges, vollständig isoliertes und latenzarmes Datenerfassungssystem, das die Signalaufbereitung per PGIA sowie die Daten- und Stromversorgungs-Isolation auf einer kompakten Leiterplatte kombiniert. In den folgenden Abschnitten wird genauer auf die einzelnen Bestandteile der Schaltung eingegangen, wobei auch die Leistungsfähigkeit und die Vorteile gegenüber einer nichtisolierten Lösung zur Sprache kommen.

Isolation der Daten- und Stromversorgungs-Leitungen

Das Pmod-zu-FMC Interposer Board beherbergt Digitalisatoren, Regler und einen Übertrager für die galvanische Isolation. Dies dient zur Separierung elektrischer Schaltungen mit dem Ziel, Streuströme zu eliminieren. Während Signale zwischen galvanisch isolierten Schaltungen durchgelassen werden, werden Streuströme, die durch die Netzstromversorgung bedingt sind, ebenso blockiert wie unterschiedliche Massepotenziale [2].

Die Isolation der Datenleitungen erfolgt mit den für 3 kVrms ausgelegten Digitalisatoren

ADuM152N und ADuM120N, die sich durch hohe CMTI-Werte (Common-Mode Transient Immunity) und eine hohe Beständigkeit gegen gestrahlte und leitungsgeführte Störgrößen auszeichnen, während die Signallaufzeit und die dynamische Leistungsaufnahme gering sind. Kennzeichnend für die einfach implementierbaren Isolationsbausteine ist ihre herausragende Leistungsfähigkeit im Vergleich zu typischen Alternativen wie etwa Optokopplern. Hervorzuheben sind insbesondere die maximale Signallaufzeit von 13 ns und die Impulsverzerrung von unter 5 ns. Die Streuung der Signallaufzeit von Kanal zu Kanal beträgt maximal 4,0 ns bzw. 3,0 ns.

Isolierte Stromversorgungsschaltung

Eine isolierte Präzisions-Signalkette benötigt darüber hinaus eine isolierte Stromversorgungsschaltung, die auf ihre Anforderungen abgestimmt ist und keine Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit der Signalkette hat. Es muss sichergestellt sein, dass die Stromversorgung nur geringe Störaussendungen erzeugt. Nicht zuletzt muss sie einen hohen Wirkungsgrad haben und den einschlägigen Sicherheitsanforderungen genügen.

Gut geeignet für die Isolation der Stromversorgung ist der rauscharme Push-Pull-DC/DC-Treiber LT3999. Er enthält zwei 1-A-Schalter und bietet eine programmierbare Strombegrenzung, eine von 50 kHz bis 1 MHz einstellbare, bei Bedarf zu einem externen Takt synchronisierbare Schaltfrequenz und einen weiten Eingangsspannungsbereich von 2,7 V bis 36 V. Die Shutdown-Stromaufnahme liegt unter 1 μ A. Die Push-Pull-Topologie ist einfach zu entwickeln und zu implementieren, begnügt sich mit wenigen Bauelementen und erzeugt dank ihrer symmetrischen Struktur geringe Störaussendungen.

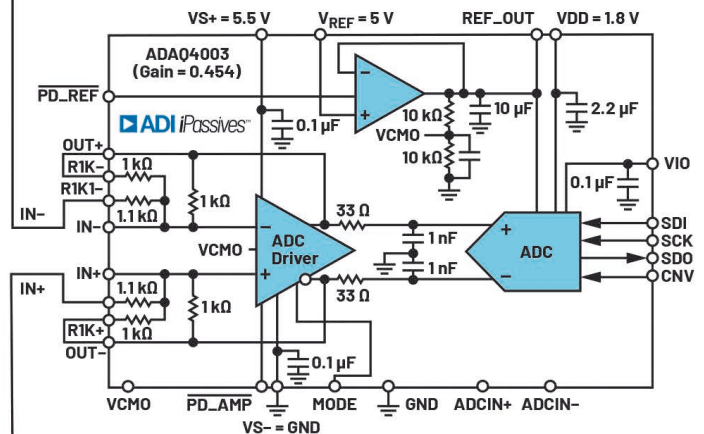
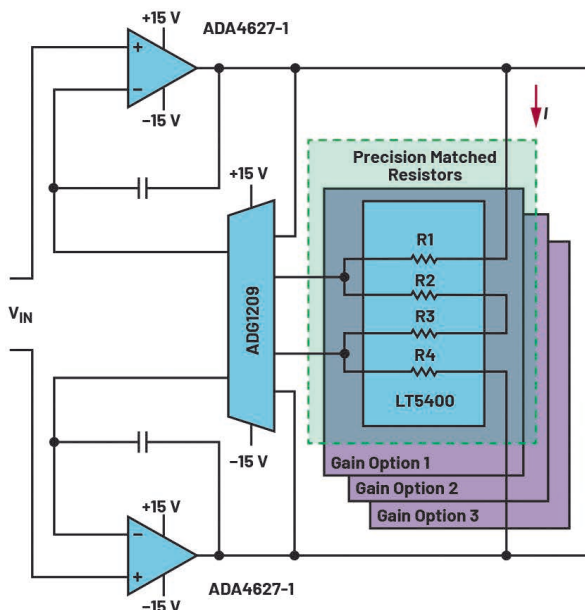


Bild 4: Präzisions-Signalkette mittlerer Bandbreite

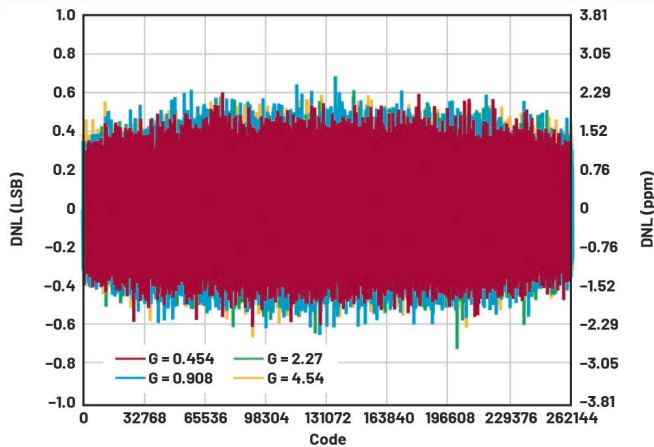


Bild 5: DNL als Funktion des Codes für verschiedene Verstärkungen; $V_{REF} = 5\text{ V}$

Wie aus Bild 2 hervorgeht, wurde die Stromversorgungs-Schaltung der Referenzplattform so konzipiert, dass die vom FMC-Anschluss kommenden 12 V unter Wahrung der Isolation zur Versorgung des Datenerfassungs-Boards dienen können. Zu diesem Zweck treibt der LT3999 einen für eine Isolationsspannung von 2,5 kVrms ausgelegten Isolationsübertrager des Typs Pulse Electronics PH9085.083NL. Er erzeugt eine unregelmäßige, mit zunehmendem Laststrom abfallende Ausgangsspannung (Bild 3).

Low-Dropout-Linearregler

Bestandteil der Referenzplattform ist deshalb ein nachgeschalteter Low-Dropout-Linearregler des Typs ADP7105 für eine optionale geregelte Ausgangsspannung von 3,3 V. Die galvanische Isolation der gesamten Mess- und Datenaufbereitungsschaltung durch das Interposer Board minimiert die Auswirkungen von schwankenden Gleichtaktspannungen und externen Störquellen. Damit lässt sich zeigen, dass die beschriebene Methode eine präzise, wirtschaftliche und effiziente Möglichkeit für die Verwendung einer isolierten Messschaltung bietet [3].

Wahrung der Genauigkeit

Abgesehen von der Implementierung von Isolationstechniken ist es notwendig, die einzelnen Baugruppen der Signalkette gut aufeinander abzustimmen. Schließlich trägt jede Komponente zur Leistungsfähigkeit der gesamten Signalkette bei und spielt eine entscheidende Rolle für die Genauigkeit des Systems.

Präzisionsverstärker, deren Merkmale hohe Genauigkeit, geringes Rauschen und eine niedrige Offsetspannung sind, sorgen für die präzise Signalaufbereitung und Verstärkung, um sicherzustellen, dass das erfasste Signal originalgetreu und ohne zusätzliche Verzerrungen oder Offsets wiedergegeben wird. Häufig kommen außerdem Filterelemente wie etwa Tiefpassfilter zum Einsatz, um hochfrequentes Rauschen und unerwünschte Signalanteile zu entfernen, sodass nur das eigentlich gewünschte Signal von der Signalkette durchgelassen wird. Dies sorgt für eine zusätzliche Verbesserung der Genauigkeit und Integrität des gemessenen Signals. Abschließend übernehmen hochauflösende ADCs die Aufgabe, das analoge Signal zur weiteren Verarbeitung oder Auswertung zu digitalisieren. Diese ADCs zeichnen sich durch

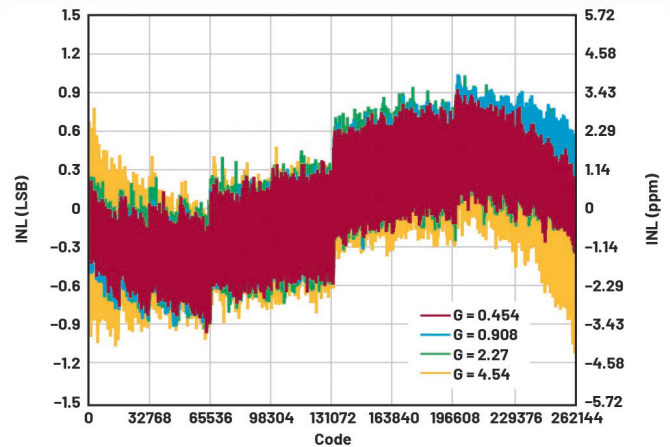


Bild 6: INL als Funktion des Codes für verschiedene Verstärkungen; $V_{REF} = 5\text{ V}$

hohe Abtastraten und Auflösung aus, sodass alle Voraussetzungen für eine präzise und detaillierte Digitalisierung des analogen Signals gegeben sind. Alle genannten Bauteile werden handverlesen, um mit der Referenzplattform die angestrebte Leistungsfähigkeit zu erreichen.

Programmable Gain Instrumentation Amplifier

Das Datenerfassungs-Board der Referenzplattform umfasst einen diskret implementierten PGA (Programmable Gain instrumentation Amplifier), der unter anderem aus folgenden Bauelementen besteht:

- ADA4627-1: Schneller, rauscharmer JFET-Operationsverstärker mit niedrigem Biasstrom
- LT5400: abgeglichenes Präzisions-Widerstandsnetzwerk (vierfach)
- ADG1209: kapazitätsarmer, vierkanaliger $\pm 15\text{ V}/\pm 12\text{ V}$ iCMOS-Multiplexer
- Interner FDA (Fully Differential Amplifier) als Treiber für den ADAQ4003

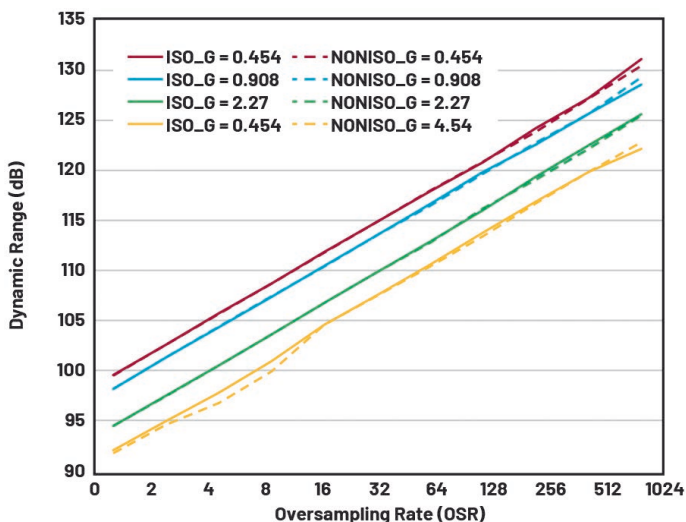


Bild 7: Dynamikbereich

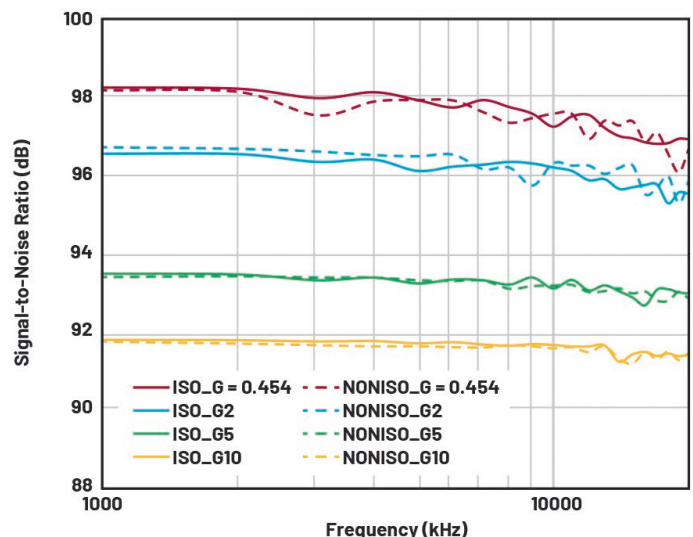


Bild 8: Signal-Rauschabstand (SNR)

Der eingangsseitige PGA weist eine hohe Eingangsimpedanz auf, was den direkten Anschluss unterschiedlichster Sensoren ermöglicht. Eine programmierbare Verstärkung ist häufig notwendig, um die Schaltung an Eingangssignale anzupassen, die unterschiedliche Amplituden haben können, unipolar, bipolar, massebezogen oder differenziell sind sowie wechselnde Gleichaktspannungen aufweisen. Der PGA arbeitet mit dem ADAQ4003 zusammen, einer 18bit μ Module-Datenerfassungslösung mit 2 MSPS. Die gesamte Signalkette der Referenzplattform ist in Bild 4 zu sehen.

Integrale und differenzielle Nichtlinearität

Um die statische Leistungsfähigkeit der Referenzplattform zu verifizieren, wurden die integrale und die differenzielle Nichtlinearität (INL bzw. DNL) gemessen. Die Bilder 5 und 6 geben die DNL- und INL-Fehler für unterschiedliche Verstärkungen wieder. Die DNL-Fehler weisen typische Abweichungen von $\pm 0,6$ LSB auf, woraus eine monotone Übertragungsfunktion ohne Informationslücken (missing codes) resultiert. Die INL-Fehler dagegen zeigen eine typische Schwankungsbreite von $\pm 2,097$ LSB mit einem deutlich s-förmigen Verlauf, was auf eine starke Dominanz ungeradzahlicher Oberschwingungen hindeutet [4]. Den Graphen ist ferner zu entnehmen, dass die gesamte Signalkette eine hinreichende Linearität aufweist.

Der Einsatz von Präzisionsverstärkern, Signalaufbereitungstechniken und hochauflösenden ADCs in der Signalkette minimiert die Signalverzerrungen, Offsets und Nichtlinearitäten und resultiert in hochpräzisen Messungen. Die weiter oben diskutierten galvanischen Isolationstechniken dämpfen die Schwankungen der Gleichaktspannungen ein, eliminieren die Auswirkungen von Masseschleifen und sorgen damit für eine präzise Wiedergabe des gemessenen Signals.

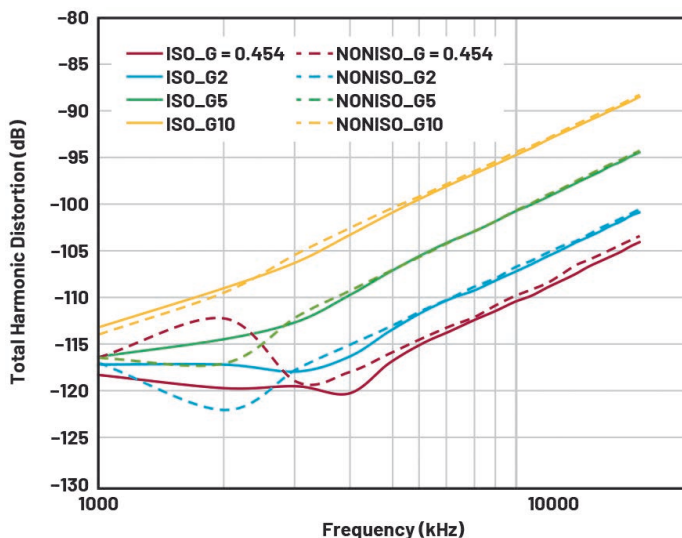


Bild 9: Oberschwingungsgehalt (THD)

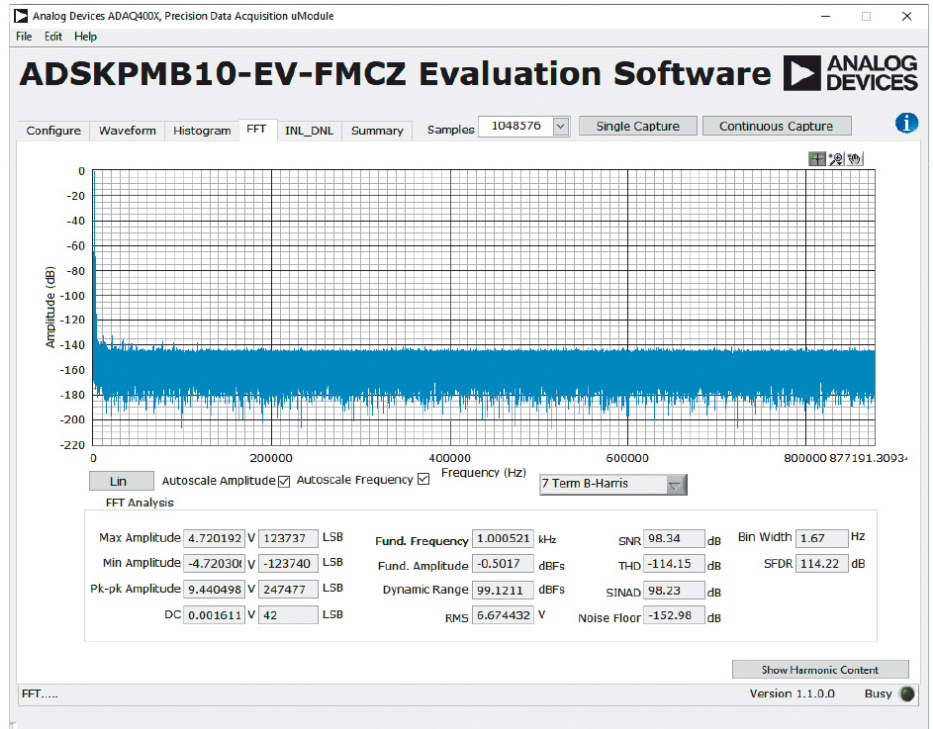


Bild 10: Single-Capture FFT für ein rein differenzielles Eingangssignal von -0,5 dBFS 81 kHz Sinus

Minimierung von Rauschen und Störbeeinflussungen

Rauschen und Störbeeinflussungen, die entweder von internen Bauelementen hervorgerufen werden oder aus externen Quellen stammen, gehören ebenfalls zu den Herausforderungen bei der Datenerfassung. Eine isolierte Präzisions-Signalkette trägt diesem Problem mithilfe von robusten Isolationsbarrieren, Abschirmung, Masseverbindungen und Filtertechniken Rechnung. Die Einbindung von Rauschminderungs-Techniken in das μ Module ADAQ4003 ermöglicht eine höchst originalgetreue Signalerfassung.

Unter anderem befindet sich ein RC-Tiefpassfilter mit einer Polstelle zwischen dem Ausgang des ADC-Treibers und den ADC-Eingängen im μ Module. Dieses Filter unterdrückt hochfrequentes Rauschen, mindert Ladungs-Kickbacks aus dem Eingang des internen SAR-ADC und optimiert die Einschwingzeit und die Signalbandbreite des Eingangs [5]. Das Layout des μ Module sorgt außerdem für die Separierung der analogen und digitalen Signalfahrten, um gegenseitige Beeinflussungen zwischen ihnen zu vermeiden und die Störaussendungen zu verringern.

Obwohl sich viele dynamische Parameter auf die Leistungsfähigkeit eines bestimmten Datenerfassungssystems auswirken, kommen in diesem Beitrag nur drei von ihnen zur Sprache.

Dynamikbereich

Der Dynamikbereich ist als der Bereich zwischen dem Grundrauschen eines Bausteins und seinem spezifizierten maximalen Ausgangspegel definiert [6]. Er ist entscheidend für die Bestimmung des kleinsten nicht durch Rauschen beeinträchtigten Spannungsschritts. Gemessen wird dieser Parameter mit einer Referenz von 5 V, an Masse gelegten Eingängen und einer Ausgangs-Datenrate von 2 MSPS. Bild 7 gibt den Dynamikbereich für verschiedene Verstärkungen wieder, wobei die typischen Werte 93 dB (bei maximaler Verstärkung) bzw. 100 dB (bei niedrigster Verstärkung) betragen. Durch Anheben des Oversampling-Verhältnisses (OSR) auf 1.024 verbessert sich der gemessene Wert weiter, und zwar bis auf Höchstwerte von 123 dB bzw. 130 dB.

$$\text{Dynamic Range (dB)} = 20 \log_{10} \left(\frac{\text{Full-Scale Input Signal}_{\text{RMS}}}{\text{Total Noise}_{\text{RMS}}} \right) \quad (1)$$

Zieht man Gleichung 1 zum Berechnen des äquivalenten ausgangsbezogenen Gesamttauschs heran, erhält man einen Wert von 1,12 μ Vrms (bei OSR = 1.024 und niedrigster Verstärkung). Ein höherer gemessener Dynamikbereich deutet also auf ein geringeres Gesamt-Systemrauschen hin.

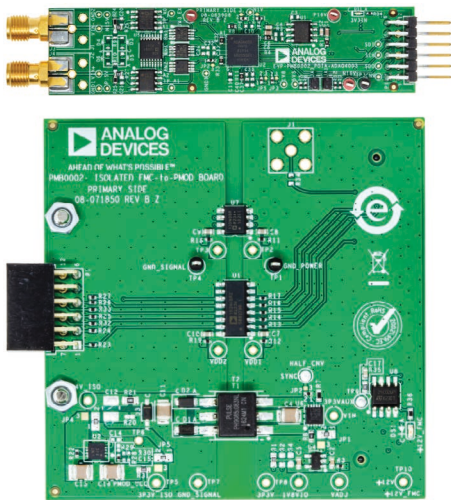


Bild 11: Das Board ADISKPMB10-EV-FMCZ besitzt verschiedene potenzialfreie Massereferenzpunkte.

Erfasst wurden auch der Signal-Rauschabstand (SNR) und der Oberschwingungsgehalt (Total Harmonic Distortion, THD), und zwar durch Anlegen eines sinusförmigen Signals von -0,5 dBFS an den invertierenden und den nicht-invertierenden Eingang. Der SNR ist definiert als das Verhältnis der RMS-Signalamplitude zum Mittelwert des Effektivwerts (RMS) aller anderen Spektralkomponenten (unter Ausschluss der Oberschwingungen und des DC-Anteils) [7]. Siehe hierzu Gleichung 2.

$$SNR \text{ (dB)} = 20 \log_{10} \left(\frac{\text{Signal}}{\text{Noise}} \right) \quad (2)$$

Der Oberschwingungsgehalt wiederum ist definiert als das Verhältnis des RMS-Werts der Grundschwingung zum Mittelwert des Effektivwerts ihrer Oberschwingungen, wobei im Allgemeinen nur die ersten fünf Oberschwingungen relevant sind (siehe Gleichung 3) [7].

$$THD \text{ (dB)} = 20 \log_{10} \left(\frac{\text{Signal}}{\text{Distortion}} \right) \quad (3)$$

Die Bilder 8 und 9 geben den SNR bzw. THD über die Frequenz bei verschiedenen Verstärkungen wieder. Die Signalkette insgesamt kommt auf einen maximalen SNR-Wert von 98 dB und einen THD-Wert von -118 dB, jedoch verschlechtern sich diese Werte bei hohen Eingangsfrequenzen und hohen Verstärkungen. Eine exemplarische FFT-Analyse hierzu ist in Bild 10 zu sehen. Die isolierte Signalkette weist ein flaches Grundrauschen etwa 140 dB unterhalb des Full-Scale-Werts auf, in dem sich Spitzen verbergen. Hieraus ist zu entnehmen, dass sich die Signalkette gegenüber der nicht-isolierten Ausführung durch eine gute Signalstärke sowie ein sauberes, vergleichbares Rauschverhalten auszeichnet.

Anwendungen und Auswirkungen

Die Vorteile isolierter Präzisions-Signalketten kommen in den verschiedensten Branchen und Anwendungen zum Tragen. In der wissenschaftlichen Forschung etwa ermöglichen sie präzise Messungen in Sparten wie der Physik, Chemie oder Biologie, in denen Genauigkeit und Reproduzierbarkeit höchste Priorität haben. In der Industrieautomation wiederum sorgen diese Signalketten für präzise Prozesssteuerung, Qualitätsüberwachung und Zustandsüberwachung, und in medizinischen Anwendungen schließlich ist die präzise Überwachung physiologischer Signale und eine exakte Diagnose möglich. Auswirkungen ergeben sich jedoch auch in Bereichen wie etwa Umweltüberwachung, Energiemanagement und Telekommunikation, in denen eine zuverlässige Datenerfassung wichtig für die Entscheidungsfindung und Optimierung ist.

Potenzialfreie Datenerfassungssysteme

Das optimale Einsatzgebiet für potenzialfreie Datenerfassungssysteme sind elektronische Prüf- und Messanwendungen. Bei der üblichen Spannungsmessung spielen zwei Referenzpunkte eine Rolle, nämlich das High- und das Low- bzw. Nullpotenzial (auch als Masse bzw. Erde bezeichnet). Die Verwendung der Erde als Referenz birgt jedoch Risiken beim Messen hoher Spannungen. Signale mit hohen Gleichtaktspannungen sind schädlich für die einzelnen Bauteile der Signalkette, woraus Schäden am Equipment und verfälschte Daten resultieren können. Auch für die Anwender des Equipments sind hohe Spannungen gefährlich, und außerdem sind Störgrößen, Kopplungseffekte und Störbeeinflussungen infolge von Erdschleifen bei geerdeten Systemen bedenklich [8].

Die potenzialfreie Datenerfassung trägt diesen Risiken Rechnung, indem sie einen separaten, potenzialfreien Masseanschluss mitbringt. Potenzialfreie Messungen erleichtern den direkten Anschluss am Messpunkt und erlauben gleichzeitig die Erfassung von Signalen, die mit einer Gleichtaktspannung behaftet sind. In Bild 11 sind die verschiedenen Massepins der Leiterplatte erkennbar.

Zusammenfassung

Isolierte Präzisions-Signalketten haben tiefgreifende Auswirkungen auf die Datenerfassung, denn sie bewahren die Genauigkeit, minimieren das Rauschen und die Störbeeinflussungen und sorgen für die Integrität der Daten. Präzise Verstärkung, Isolationstechniken, hochauflösende ADCs und ein rauscharmes Power-Management mit geringen Störaussendungen ermöglichen exakte Messungen auch unter schwierigen Rahmenbedingungen. Die Auswirkungen isolierter Präzisions-Signalketten erstrecken sich auf verschiedenste Branchen und ermöglichen Verbesserungen in der wissenschaftlichen Forschung, in der Industrieautomation, im

Gesundheitswesen usw. Angesichts des wachsenden Bedarfs an exakter und zuverlässiger Datenerfassung wird zunehmend deutlich, welch hohen Stellenwert isolierte Präzisions-Signalketten dafür haben, die Innovation voranzutreiben und das gesamte Potenzial datengetriebener Anwendungen auszuschöpfen.

Literaturnachweis

- [1] Jen Lloyd: „Digital Isolation Technology: Putting Safety and Data Integrity First, Last, and Always“. Analog Devices, Inc.
- [2] Galvanic Isolation. Analog Devices, Inc.
- [3] „Digital Isolators Simplify Design and Ensure System Reliability“. Analog Devices, Inc., Juni 2012.
- [4] „INL/DNL Measurements for High-Speed Analog-to-Digital Converters (ADCs)“. Analog Devices, Inc., 2001.
- [5] Maithil Pachchigar: „µModule Data Acquisition Solution Eases Engineering Challenges for a Diverse Set of Precision Applications“. Analog Devices, Inc., 2020.
- [6] „ADC and DAC Glossary“. Maxim Integrated, Juli 2002.
- [7] The Data Conversion Handbook. Analog Devices, Inc., 2005.
- [8] „Breaking Ground Loops with Functional Isolation to Reduce Data Transmission Errors“. Analog Devices, Inc., Dezember 2011.
- [9] Van Yang, Songtao Mu und Derrick Hartmann: „PLC DCS Analog Input Module Design Breaks Barriers in Channel-to-Channel Isolation and High Density“. Analog Dialogue, Vol. 50, No. 12, Dezember 2016.

Wer schreibt:

Lloben Paculan ist als Product Applications Engineer bei Analog Devices Philippines tätig. Er war in verschiedenen Bereichen der Testhardware-Entwicklung und Applikationstechnik eingesetzt und befasste sich mit der Entwicklung von Präzisions-, High-Speed- und Signalketten-µModules.

Chelsea Faye Aure, Product Applications Engineer bei Analog Devices, ist für technischen Anwendungssupport zuständig und arbeitet im Entwicklungsteam für Präzisionssignalketten-µModule-Lösungen.

Jan Michael Gonzales ist als Product Applications Engineer für Stromversorgungssysteme bei Analog Devices Philippines tätig. Er kam im Jahr 2020 zu ADI und befasst sich in erster Linie mit Stromversorgungen von Präzisions-Signalketten. ◀