

Einleitung

Cyber-Physical Systems (CPS) erfordern eine präzise Interaktion zwischen analogen und digitalen Komponenten. In diesem Projekt besteht das Ziel darin, die von einer fiktiven Maschine erzeugten Frequenzen im Bereich von 0 bis 400 kHz zu messen. Die Daten müssen mit Analog-Digital-Wandlern (ADC) erfasst werden. Die Analyse dieser Daten ist nicht Teil des Projekts; der Schwerpunkt liegt ausschließlich auf der **Messung und Auswahl geeigneter ADCs**. Diese Auswahl erfordert ein tiefes Verständnis der Abtastprinzipien, der technischen Spezifikationen von ADCs und der Analyse von Kosten und Leistung.

1. Bestimmung der minimalen Abtastfrequenz gemäß Nyquist-Kriterium

Nach dem **Nyquist-Kriterium** muss die Abtastfrequenz mindestens doppelt so hoch wie die maximale Frequenz des Eingangssignals sein, um das Phänomen des Aliasings zu vermeiden. Mathematisch wird dies wie folgt ausgedrückt:

$$f_{\text{sampling}} \geq 2 \times f_{\text{max}}$$

In diesem Projekt beträgt die maximale Frequenz $f_{\text{max}} = 400 \text{ kHz}$. Daraus ergibt sich:

$$f_{\text{sampling}} \geq 2 \times 400 \text{ kHz} = 800 \text{ kHz}$$

Ergebnis:

Die minimale Abtastfrequenz muss mindestens **800 kHz** betragen. Es wird jedoch empfohlen, eine Abtastfrequenz von mindestens **1 MHz** zu wählen, um eine Sicherheitsreserve zu gewährleisten und unvorhergesehene Hochfrequenzkomponenten im Signal zu berücksichtigen.

Aliasing-Erklärung

Das Phänomen **Aliasing** tritt auf, wenn die Abtastfrequenz kleiner als das Doppelte der maximalen Frequenz des Signals ist. In diesem Fall werden Hochfrequenzanteile falsch als niedrigere Frequenzen interpretiert. Dies führt zu Verzerrungen und einer ungenauen Darstellung des Signals.

Ein Beispiel:

- Ein Signal mit einer Frequenz von 10 kHz wird mit einer Abtastfrequenz von 15 kHz (unterhalb der Nyquist-Grenze) abgetastet.
- Das resultierende Signal erscheint fälschlicherweise als Signal mit einer niedrigeren Frequenz, was die Rekonstruktion des Originalsignals unmöglich macht.

Praktische Konsequenz:

Durch Einhaltung des Nyquist-Kriteriums wird sichergestellt, dass das Signal korrekt abgetastet wird und Aliasing vermieden wird. In der Praxis können Anti-Aliasing-Filter vor dem ADC verwendet werden, um Hochfrequenzanteile vor der Abtastung zu eliminieren.

2. Wichtige Parameter bei der Auswahl eines ADC

Bei der Auswahl eines geeigneten Analog-Digital-Wandlers (ADC) für eine spezifische Anwendung müssen die folgenden wichtigen Parameter berücksichtigt werden:

1. Auflösung (Resolution):

- Die Anzahl der Bits, die zur Darstellung des analogen Signals in digitaler Form verwendet werden.
- Eine höhere Auflösung ermöglicht eine präzisere Erfassung des Signals.
- **Beispiel:** 12 Bit bieten 4096 Stufen, während 16 Bit 65.536 Stufen ermöglichen.

2. Abtastfrequenz (Sampling Rate):

- Die Anzahl der Abtastungen pro Sekunde.
- Die Abtastfrequenz muss mindestens doppelt so hoch wie die höchste Frequenz im Signal sein (Nyquist-Kriterium).

3. Eingangsspannungsbereich (Input Voltage Range):

- Der Spannungsbereich, den der ADC genau in digitale Werte umwandeln kann.
- **Beispiel:** Ein Bereich von 0–5V bedeutet, dass Spannungen außerhalb dieses Bereichs nicht korrekt verarbeitet werden können.

4. Genauigkeit (Accuracy):

- Beschreibt, wie genau die digitale Ausgabe des ADC dem analogen Eingang entspricht.
- Faktoren wie Quantisierungsfehler und Rauschen können die Genauigkeit beeinflussen.

5. Linearität (Linearity):

- Gibt an, wie linear die Umwandlung des ADC über den gesamten Bereich ist.
- Abweichungen von der Linearität können die Messgenauigkeit reduzieren.

6. Energieverbrauch (Power Consumption):

- Wichtiger Faktor bei batteriebetriebenen Geräten.
- Ein niedriger Energieverbrauch verlängert die Batterielebensdauer.

7. Schnittstelle (Interface):

- Der Kommunikationsstandard zwischen ADC und Mikrocontroller (z. B. SPI, I2C).
- SPI ermöglicht eine schnelle Datenübertragung, während I2C weniger Pins benötigt.

8. Rauschleistung (Noise Performance):

- Misst die Fähigkeit des ADC, Rauschen im Signal zu verarbeiten.
- Wichtige Kennzahlen sind Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) und effektive Bitanzahl (ENOB).

Für dieses Projekt sollte der ausgewählte ADC folgende Eigenschaften haben:

- **Auflösung:** Mindestens 12 Bit (real mindestens 10 Bit).
- **Abtastfrequenz:** Über 800kHz, idealerweise 1MHz.
- **Eingangsspannungsbereich:** Sollte zum Signal passen (z. B. 0–5V).
- **Energieverbrauch:** Sollte für den geplanten Einsatzbereich akzeptabel sein.
- **Schnittstelle:** SPI wird empfohlen, da es schnelle und zuverlässige Datenübertragungen ermöglicht.

3. Auswahl und Vergleich von 12-Bit-ADCs mit mindestens 1 MSPS Abtastrate

Für dieses Projekt wurden mehrere Analog-Digital-Wandler (ADCs) identifiziert, die die Anforderungen an eine Auflösung von 12 Bit und eine Abtastrate von mindestens 1 MSPS (Mega Samples pro Sekunde) erfüllen. Nachfolgend sind drei geeignete Modelle aufgeführt:

Modell 1: ADS7038 von Texas Instruments

- **Auflösung:** 12 Bit
- **Abtastrate:** 1 MSPS
- **Eingangskanäle:** 8 Kanäle, konfigurierbar als analoge Eingänge, digitale Eingänge oder Ausgänge
- **Eingangsspannungsbereich:** 2,35 V bis 3,6 V
- **Schnittstelle:** SPI
- **Besondere Merkmale:** Interner Oszillator, geringe Leistungsaufnahme
- **Preis:** Ca. 4,29 USD pro Stück bei Abnahme von 1.000 Einheiten
- **Verfügbarkeit:** Über 12.000 Stück auf Lager bei Mouser Electronics

Modell 2: AD7265 von Analog Devices

- **Auflösung:** 12 Bit
- **Abtastrate:** 1 MSPS
- **Eingangskanäle:** 2 Kanäle
- **Eingangsspannungsbereich:** 2,7 V bis 5,25 V
- **Schnittstelle:** SPI
- **Besondere Merkmale:** Dualer simultaner Abtastung, geeignet für differenzielle Signale
- **Preis:** Ca. 6,17 USD pro Stück bei Abnahme von 1.500 Einheiten
- **Verfügbarkeit:** Über 1.400 Stück auf Lager bei Mouser Electronics

Modell 3: ADS7952 von Texas Instruments

- **Auflösung:** 12 Bit
- **Abtastrate:** 1 MSPS
- **Eingangskanäle:** 12 Kanäle
- **Eingangsspannungsbereich:** 2,7 V bis 5,25 V
- **Schnittstelle:** SPI
- **Besondere Merkmale:** Niedriger Stromverbrauch, geeignet für Single-Ended Signale
- **Preis:** Ca. 5,44 USD pro Stück bei Abnahme von 2.000 Einheiten
- **Verfügbarkeit:** Über 1.700 Stück auf Lager bei Mouser Electronics

Vergleichstabelle

Eigenschaft	ADS7038	AD7265	ADS7952
Auflösung	12 Bit	12 Bit	12 Bit
Abtastrate	1 MSPS	1 MSPS	1 MSPS
Eingangskanäle	8	2	12
Eingangsspannung	2,35 V – 3,6 V	2,7 V – 5,25 V	2,7 V – 5,25 V
Schnittstelle	SPI	SPI	SPI
Besondere Merkmale	Konfigurierbare GPIOs	Duale simultane Abtastung	Niedriger Stromverbrauch
Preis	Ca. 4,29 USD	Ca. 6,17 USD	Ca. 5,44 USD
Verfügbarkeit	>12.000 Stück	>1.400 Stück	>1.700 Stück

Empfehlung

Basierend auf den Projektanforderungen und den oben genannten Eigenschaften wird der **ADS7038** von Texas Instruments empfohlen. Dieses Modell bietet eine ausreichende Abtastrate von 1 MSPS, eine 12-Bit-Auflösung und verfügt über 8 konfigurierbare Kanäle, die Flexibilität für verschiedene Anwendungen bieten. Zudem zeichnet es sich durch eine geringe Leistungsaufnahme und einen wettbewerbsfähigen Preis aus. Die hohe Verfügbarkeit stellt sicher, dass es für die Implementierung im Projekt zeitnah beschafft werden kann.

4. Auswahl und Vergleich von 14- und 16-Bit-ADCs mit mindestens 1 MSPS Abtastrate

Für Anwendungen, die eine höhere Auflösung und Abtastrate erfordern, wurden mehrere ADCs mit 14- und 16-Bit-Auflösung und einer Abtastrate von mindestens 1 MSPS identifiziert. Nachfolgend sind einige geeignete Modelle aufgeführt:

Modell 1: AD7485 von Analog Devices

- **Auflösung:** 14 Bit
- **Abtastrate:** 1 MSPS
- **Eingangsspannungsbereich:** 0 V bis 2,5 V
- **Schnittstelle:** Seriell
- **Besondere Merkmale:** Niedriger Stromverbrauch, geeignet für Hochgeschwindigkeitsanwendungen

Modell 2: AD7606C-16 von Analog Devices

- **Auflösung:** 16 Bit
- **Abtastrate:** 1 MSPS
- **Eingangsspannungsbereich:** $\pm 12,5$ V, ± 10 V, $\pm 6,25$ V, ± 5 V, $\pm 2,5$ V
- **Schnittstelle:** Parallel und seriell
- **Besondere Merkmale:** Eingangsschutz bis ± 21 V, integrierter programmierbarer Verstärker

Modell 3: ADS7054 von Texas Instruments

- **Auflösung:** 14 Bit
- **Abtastrate:** 1 MSPS
- **Eingangsspannungsbereich:** $\pm AVDD$ (1,65 V bis 3,6 V)
- **Schnittstelle:** SPI-kompatibel
- **Besondere Merkmale:** Interne Offset-Kalibrierung, unterstützt differenzielle Eingänge

Vergleichstabelle

Eigenschaft	AD7485	AD7606C-16	ADS7054
Auflösung	14 Bit	16 Bit	14 Bit
Abtastrate	1 MSPS	1 MSPS	1 MSPS
Eingangsspannung	0 V bis 2,5 V	$\pm 2,5$ V bis $\pm 12,5$ V	$\pm AVDD$ (1,65 V bis 3,6 V)
Schnittstelle	Seriell	Parallel und seriell	SPI-kompatibel
Besondere Merkmale	Niedriger Stromverbrauch	Eingangsschutz bis ± 21 V	Interne Offset-Kalibrierung

Empfehlung

Basierend auf den Anforderungen des Projekts und den oben genannten Eigenschaften wird der **AD7606C-16** von Analog Devices empfohlen. Dieses Modell bietet eine hohe Auflösung von 16 Bit, eine Abtastrate von 1 MSPS und einen flexiblen Eingangsspannungsbereich, der für verschiedene Signaltypen geeignet ist. Zudem verfügt es über integrierten Eingangsschutz und einen programmierbaren Verstärker, was die Anpassung an unterschiedliche Anwendungsszenarien erleichtert.

Vergleichstabelle für ADC-Modelle (12-, 14- und 16-Bit-Auflösung)

Eigenschaft	ADS7038 (12 Bit)	AD7485 (14 Bit)	ADS7054 (14 Bit)	AD7606C-16 (16 Bit)
Auflösung	12 Bit	14 Bit	14 Bit	16 Bit
Abtastrate	1 MSPS	1 MSPS	1 MSPS	1 MSPS
Eingangsspannung	2,35 V – 3,6 V	0 V – 2,5 V	$\pm 1,65$ V – 3,6 V	$\pm 2,5$ V bis $\pm 12,5$ V
Schnittstelle	SPI	Seriell	SPI-kompatibel	Parallel und seriell
Besondere Merkmale	Konfigurierbare GPIOs	Niedriger Stromverbrauch	Interne Offset-Kalibrierung	Eingangsschutz bis ± 21 V
Preis (ca.)	\$4,29	\$7,50	\$6,20	\$18,30
Verfügbarkeit	Hoch (>12.000 Stk.)	Gut	Gut (>5.000 Stk.)	Gut (>3.000 Stk.)

Analyse

- **ADS7038 (12 Bit):** Sehr kostengünstig und ideal für Anwendungen mit Standardanforderungen. Die GPIO-Funktionalität bietet Flexibilität.
- **AD7485 (14 Bit):** Bietet höhere Auflösung, aber eingeschränkten Eingangsspannungsbereich. Ideal für Hochpräzisionsanwendungen mit serieller Schnittstelle.
- **ADS7054 (14 Bit):** Ähnlich wie AD7485, jedoch mit differenziellen Eingängen und Kalibrierungsfunktionen.
- **AD7606C-16 (16 Bit):** Höchste Präzision und Funktionalität mit großem Eingangsspannungsbereich und Schutzfunktionen. Teurer, aber leistungsstark.

Empfehlung

1. **Für Anwendungen mit Standardanforderungen: ADS7038 (12 Bit)** aufgrund der Kosteneffizienz und hohen Verfügbarkeit.
2. **Für Anwendungen mit höheren Präzisionsanforderungen: AD7606C-16 (16 Bit)** bietet die beste Kombination aus Funktionalität und Genauigkeit.
3. **Für differenzielle Eingänge und mittlere Präzision: ADS7054 (14 Bit)** ist eine ausgezeichnete Wahl.