

Technical Article

Wie Ethernet den Wechsel zu softwaredefinierten Fahrzeugen beschleunigt



Madison Ecklund, systems manager, Body Electronics & Lighting

Zonenarchitektur und Ethernet stellen die Zukunft von Fahrzeugnetzwerken dar. Neue Funktionen in Fahrzeugen sowie der Trend zur Aufnahme von Sensoren und Aktoren in Zonensteuermodule erfordern ein Kommunikationsnetz mit hoher Bandbreite und niedriger Latenz im Fahrzeug. Eine Zonenarchitektur mit Ethernet bahnt dem wachsenden Trend zum softwaredefinierten Fahrzeug den Weg.

Die meisten Fahrzeuge werden heute mit einer Art von Architektur hergestellt, die Verkabelung und elektronische Steuergeräte (Electronic Control Units, ECUs) umfasst und als Domänenarchitektur bezeichnet wird. Eine Domänenarchitektur kategorisiert ECUs unabhängig von ihrer physischen Position im Fahrzeug anhand bestimmter Funktionen in Domänen.

Im Gegensatz zu einer Domänenarchitektur organisiert eine Zonenarchitektur Kommunikation, Stromverteilung und Laststeuerung anhand ihrer Position statt ihrer Funktion, wie in [Abbildung 1](#) gezeigt. Ein Zonensteuermodul fungiert als Netzwerkdatenbrücke zwischen dem Computersystem des Fahrzeugs und lokalen Edge-Knoten wie intelligenten Sensoren und ECUs. Um die Verkabelung im Fahrzeug zu verringern, verteilt ein Zonensteuermodul außerdem die Leistung an verschiedene Edge-Knoten (durch Implementierung intelligenter Halbleitersicherungen), übernimmt das Low-Level-Computing und steuert lokale Lasten wie Motoren und Beleuchtung.

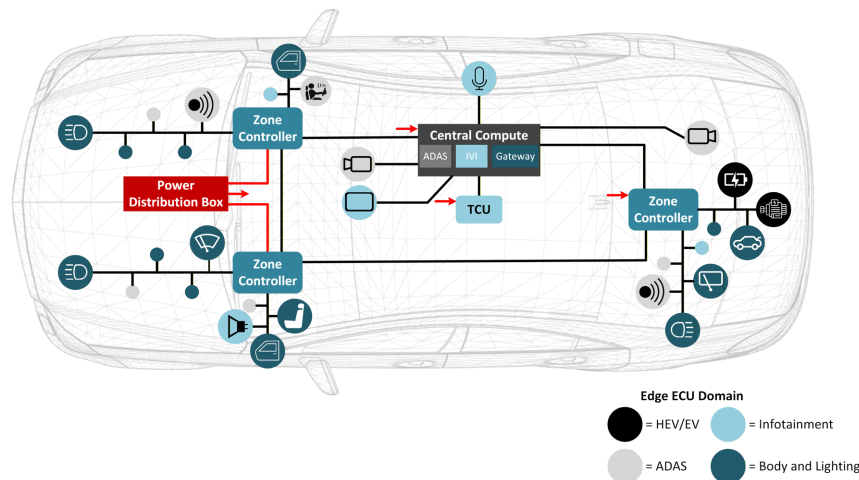


Abbildung 1. Beispiel einer Zonenarchitektur

Zonen-Steuermodule übertragen Daten von verschiedenen Sensoren und ECUs über ein Edge-Knoten-Kommunikationsnetzwerk und leiten die kombinierten Sensordaten über die Backbone-Kommunikation an das zentrale Computersystem weiter. Gleichmaßen übertragen die Zonensteuermodule vom zentralen Computersystem erhaltene Daten mittels der Backbone-Kommunikation und über ein Edge-Knoten-Kommunikationsnetzwerk an verschiedene Aktuatoren. Diese bidirektionale Kommunikation zwischen dem zentralen Computersystem und den Zonensteuermodulen erfordert ein Kommunikations-Backbone mit hoher Bandbreite und kurzer Latenzzeit, um die große Menge an Daten zu verarbeiten, die von Funktionen wie mehreren Sensoren für fortschrittliche Fahrassistenzsysteme (Advanced Driver Assistance System, ADAS), der Fahrzeugbewegungssteuerung und adaptivem Fernlicht erzeugt werden.

Anforderungen an die Bandbreite in einer Zonenarchitektur

Lassen Sie uns die Ethernet-Nutzung nach Anwendung aufschlüsseln, um den Mehrwert des Einsatzes von Ethernet in Fahrzeugen besser zu verstehen. Das neu definierte Single-Pair-Ethernet unterstützt Geschwindigkeiten von 10 Mbit/s bis 10 Gbit/s, definiert durch das Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) 802.3cg (10 Mbit/s), IEEE 802.3bw (100 Mbit/s), IEEE 802.3bu (1 Gbit/s) und IEEE 802.3ch (10 Gbit/s). Alle diese neuen Ethernet-Technologien arbeiten über ein Single-Pair-Kabel und können über Entfernungen von bis zu 15 m kommunizieren, was ausreichend ist, um die längste Verbindung in einem Fahrzeug abzudecken. Ethernet kann zudem die Zeitsynchronisierung von Sensordaten mithilfe von Zeitstempeln nach IEEE 802.1AS ermöglichen, um eine kurze Latenzzeit zu erreichen.

Zwar ist Ethernet in der Lage, extrem hohe Geschwindigkeiten zu erreichen, diese Geschwindigkeiten sind jedoch nicht in jedem Kontext erforderlich. So benötigt beispielsweise die Kommunikation mit dem Türsteuermodul oder dem Heizungs-, Lüftungs- und Klimasystem keine Datenrate von 100 Mbit/s. Ein Ethernet-PHY mit 10 Mbit/s wie der [DP83TD555J-Q1](#) oder alternative Netzwerkprotokolle wie Controller Area Network (CAN) sind für Anwendungsfälle mit geringerer Geschwindigkeit und niedrigeren Anforderungen an die Bandbreite besser geeignet. So bleiben höhere Geschwindigkeiten der Übertragung aggregierter Kamera- und autonomer Fahrsensordaten von den Zonensteuermodulen an das zentrale Computersystem vorbehalten. [Abbildung 2](#) zeigt, wo die verschiedenen Geschwindigkeiten von Ethernet in einer Zonenarchitektur verwendet werden können.

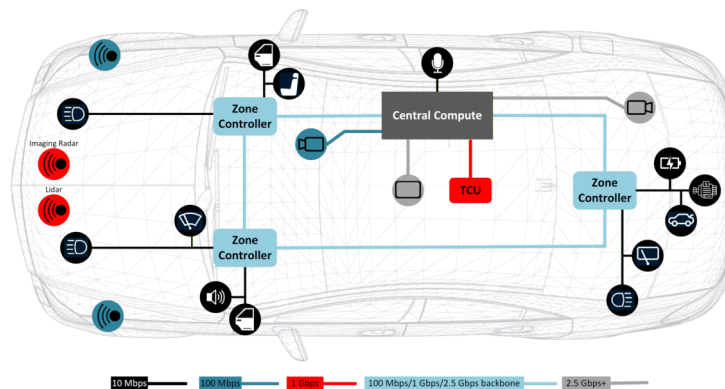


Abbildung 2. Ethernet in einer Zonenarchitektur

Lassen Sie uns anhand von [Abbildung 2](#) die Kommunikationsgeschwindigkeiten für Radar-, Lidar-, Kamera- und Karosserieanwendungen genauer betrachten. Wenn das Radar- oder Lidar-System-on-a-Chip (SoC) die Daten verarbeitet, werden die Lidar- oder Radardaten üblicherweise über CAN, Ethernet mit 10 Mbit/s oder Ethernet mit 100 Mbit/s an das Zonensteuermodul kommuniziert. Wenn nur Daten der ersten oder zweiten Schicht verarbeitet werden, werden die Radar- und Lidar-Daten per Ethernet mit 100 Mbit/s bis 1 Gbit/s an das Zonenmodul oder den zentralen Computer kommuniziert. Das Senden von Lidar- oder Radar-Rohdaten zur Verarbeitung an das zentrale Computersystem extrahiert durch die Fusion verschiedener Sensoren weitere Informationen. Die Übertragung einer solch großen Menge an Rohdaten erfordert eine höhere Bandbreite, in der Regel ein Serialisierer/Deserialisierer-Protokoll (SerDes) oder Ethernet mit mindestens 2,5 Gbit/s.

Bei Kameras ist ein SerDes wie Flat Panel Display Link (FDP-Link) das am besten geeignete Protokoll, wenn ein erhöhtes ADAS-Datenniveau alle Rohdaten der Frontkamera zur Nachverarbeitung erfordert.

Wenn die Daten von der Frontkamera komprimiert werden können und Sie dieses erhöhte Niveau von ADAS-Daten nicht benötigen, ist Ethernet mit 100 Mbit/s eine Alternative.

Karosserie-Domänenmodule wie Türgriffsensoren, Fensterheber-Steuermodule und Seitenspiegel-Steuermodule verwenden üblicherweise die CAN- und LIN-Protokolle (Local Interconnect Network) für die Kommunikation, da diese keine hohe Bandbreite benötigen. Obgleich Entwickler weiterhin CAN und LIN verwenden, schafft der vermehrte Einsatz von Ethernet in Fahrzeugen ebenfalls Raum für 10BASE-T1S-Multidrop-Ethernet mit 10 Mbit/s. Ethernet ist traditionell eine Punkt-zu-Punkt-Topologie, 10BASE-T1S-Ethernet ist jedoch der erste Ethernet-Standard, der Funktionen über eine Bus-Topologie ermöglicht.

Multi-Gigabit-Ethernet in einer Zonenarchitektur

Wie sieht eine mögliche Weiterentwicklung der Zonenarchitektur aus? Sie beginnt mit der Aggregation von Karosserie-Domänenfunktionen, der Integration der Energieverteilung und der Zentralisierung des Computings. Im Laufe der Zeit werden Zonenarchitekturen mit der Aggregation von Daten aus anderen Domänen wie ADAS und Infotainment beginnen. Das Ziel besteht darin, alle Domänen in die Zonenarchitektur zu integrieren. Unabhängig davon, zu welcher Domäne die Daten gehören, nutzen das Zonensteuermodul und zentrale Computersystem weiterhin dasselbe Backbone-Kommunikationsnetzwerk zur Datenübertragung. Audio ist ein vorrangiges Ziel für den Umstieg auf Zonensteuerungsmodule, da es möglich ist, [Audiodaten unter Verwendung von Standards für Audio-Video-Bridging über Ethernet zu übertragen](#).

Karosserie-Domänenfunktionen erfordern in der Regel 10 Mbit/s oder weniger. Da ADAS- oder Fahrzeug-Infotainment-Funktionen wie Radar, Lidar, Audio und Kameras jedoch in die Zonenarchitektur integriert werden, müssen die Anforderungen an Geschwindigkeit und Bandbreite steigen bzw. kann sich die Ethernet-Backbone-Topologie von stern- zu ringförmig ändern, um die Menge an sicherheitskritischen und zeitkritischen Sensordaten aufzunehmen.

Audio erzeugt ca. 1,5 Mbit/s pro Kanal; ein Radarsensor erzeugt in der Regel 0,1 Mbit/s bis 15 Mbit/s. Lidar erzeugt 20 Mbit/s bis 100 Mbit/s. Kameras erzeugen mit 500 Mbit/s bis 3,5 Gbit/s die größten Datenmengen. Moderne Fahrzeuge verfügen in der Regel über vier bis sechs Radarsensoren, einen bis fünf Lidar-Sensoren, zwölf bis 20 Audiolautsprecher, zwölf bis 16 Audiomikrofone und sechs bis zwölf Kameras. [Tabelle 1](#) zeigt den Bereich der von den einzelnen Typen generierten Daten an.

Tabelle 1. In einer Zonenarchitektur generierte Daten

Typ	Generierte Daten	Anzahl von Sensoren	Niedrig	Mittel	Hoch
Audio-Lautsprecher	1,5 Mbit/s	12 bis 20	3,2 Mbit/s	24 Mbit/s	30 Mbit/s
Audiomikrofon	1,5 Mbit/s	12 bis 16	3,2 Mbit/s	21 Mbit/s	24 Mbit/s
Radar	0,1–15 Mbit/s	Vier bis sechs	0,4 Mbit/s	35 Mbit/s	90 Mbit/s
Lidar	20–100 Mbit/s	Eins bis fünf	20 Mbit/s	100 Mbit/s	500 Mbit/s
Kamera	500 Mbit/s – 3,5 Gbit/s	Sechs bis zwölf	3 Gbit/s	9 Gbit/s	42 Gbit/s

Die Summe der erzeugten Daten ist für die Tendenz zu Ethernet mit 2,5 Gbit/s, 5 Gbit/s und 10 Gbit/s bei Erstausrüstern (Original Equipment Manufacturers, OEMs) verantwortlich. Die Zonenarchitektur benötigt ein Backbone-Kommunikationsnetzwerk, das die enormen Datenmengen, die von ADAS-Sensoren erzeugt werden, an das zentrale Computersystem übertragen kann. Unkomprimierte Kameradaten gehen bereits über die aktuellen Fähigkeiten von Ethernet hinaus, und die Auflösung sowie Pixelanzahl von Kameras wächst auch weiterhin kontinuierlich. Mit zunehmender Autonomie der Fahrzeuge werden immer mehr Sensoren eingesetzt. Somit wächst auch die Bandbreite, die zur Unterstützung einer höheren Kameraauflösung sowie der Sensoren erforderlich ist.

Die von OEMs geforderten Ethernet-Geschwindigkeiten unterscheiden sich wahrscheinlich aufgrund der Übergangszeitpläne für die Integration verschiedener Funktionen in das Zonensteuermodul. Die Audiowiedergabe auf Innenlautsprechern ist einer der ersten domänenübergreifenden Datentypen, die für den Einsatz auf dem Ethernet-Backbone übernommen wurden. Dies ist wahrscheinlich auf eine vergleichsweise geringere Datengenerierung zurückzuführen, da 20 Audiolautsprecherkanäle etwa 30 Mbit/s erzeugen. Ein bestehendes Ethernet-Backbone mit 100 Mbit/s oder 1 Gbit/s kann Audiowiedergabedaten problemlos aufnehmen. Insgesamt gilt: je mehr höhere Datenfunktionen in Zonensteuermodulen, desto höher die Anforderungen an die Bandbreite.

Der Einsatz von Ethernet als Backbone für eine Zonenarchitektur ermöglicht es Fahrzeugen, mehr Daten über das interne Fahrzeugnetzwerk zu übertragen, wenn eine Verbindung zum Internet oder zu Remote-OEM-Servern hergestellt wird. Dies ermöglicht abonnementbasierte Dienste und Fahrzeugdiagnosen durch aus der Ferne durchgeführte Firmware-Over-the-Air-(FOTA)-Aktualisierungen. FOTA-Aktualisierungen ermöglichen verschiedene Hardware- und Software-Aktualisierungszyklen, die aufgrund der Unabhängigkeit der Sensoren und Aktoren vom zentralen Rechenknoten asynchron sein können. Eine FOTA-Aktualisierung kann auch zusätzliche Funktionen und Sicherheitsverbesserungen übermitteln, ohne dass auf ein neues Modell gewartet oder das Fahrzeug in die Werkstatt gebracht werden muss. Sowohl der OEM als auch Kunde profitieren hiervon, da der OEM die Kontrolle über die Aktualisierung des Fahrzeugs mit zusätzlichen Funktionen nach

der Einführung hat und der Kunde weniger durch Fahrten zu einem Händler zur Aktualisierung der Firmware belästigt wird.

PHYs in einer Zonenarchitektur

Ethernet erfordert den Einsatz von PHYs zum Senden und Empfangen von Hochgeschwindigkeitsdaten. Ethernet-PHYs für die Automobilindustrie beseitigen viele der Probleme von Ethernet als Backbone der Verkabelung in Fahrzeugen, wie z. B. eine schlechte Signalqualität in einer solch volatilen Umgebung. Ethernet-PHYs von Texas Instruments (TI) können in einem Temperaturbereich von -40 °C bis 125 °C gemäß den Standards des Automotive Electronics Council Q100 Grade 1 betrieben werden.

Ethernet-PHYs müssen außerdem die Ethernet-Konformitätsstandards einhalten und sicherstellen, dass sie bestimmte Interoperabilitäts- und Zuverlässigkeitsstandards in Bezug auf elektromagnetische Verträglichkeit und elektromagnetische Störungen sowie die IEEE-Konformität gemäß den Standards Open Alliance TC1 und TC12 für den Einsatz in Fahrzeugumgebungen erfüllen. Mit fortschrittlichen Diagnosefunktionen wie Signalqualitätsanzeige, Zeitbereichsreflektometrie und Sensoren für elektrostatische Entladung können PHYs erkennen, wenn Fehler auftreten, diese Fehler identifizieren und es dem Hostsystem ermöglichen, proaktiv zu reagieren. Im Falle einer elektrostatischen Entladung (Electrostatic Discharge, ESD) sendet die PHY beispielsweise ein Interrupt-Signal an das SoC und den Media Access Control, um das Ereignis an diese zu melden, und überprüft im Anschluss andere Teile im System.

Ethernet-PHYs können zudem Remote-ECUs über das Single-Pair-Ethernet-Kabel mithilfe der Wake- und Sleep-Technologie der OpenAlliance-TC10-Spezifikation aktivieren. So wird keine separate Leitung benötigt, um die ECUs aus dem Ruhemodus aufzuwecken. IEEE 802.1AE Media Access Control Security (MACsec) könnte ebenfalls eine wichtige Technologie sein, um die Authentifizierung von Netzwerk-ECUs zu ermöglichen und Daten zu verschlüsseln/entschlüsseln. So könnten Cyberangriffe vermieden werden, welche die größte Bedrohung für Fahrzeugnetzwerke darstellen.

Zusätzliche Ethernet-PHYs umfassen:

- Die 100BASE-T1-PHYs [DP83TC812-Q1](#), [DP83TC815-Q1](#) und [DP83TC814-Q1](#) von TI verfügen über Funktionen der nächsten Generation, die für Luxusfahrzeuge geeignet sind, während der kleinere 100BASE-T1-PHY [DP83TC813-Q1](#) für Fälle attraktiv sein kann, in denen der Platz auf der Leiterplatte knapp ist. Der [DP83TG720-Q1](#) und [DP83TG721-Q1](#) können Zonenmodule mit datenintensiven Funktionen wie dem zentralen Computersystem und der Telematik-Steuereinheit verbinden, sodass Reserven für die Aufnahme zusätzlicher Funktionen in spätere Modelle zur Verfügung stehen, ohne intensive Änderungen am Kabelbaum vorzunehmen. Gemeinsam öffnen diese PHYs die Tür für fortschrittlichere und leistungsfähigere Fahrzeuge auf der Straße.
- Das Portfolio von Single-Pair-Ethernet-PHYs von TI ist so konzipiert, dass es mit den 100BASE-T1- und 1000BASE-T1-PHYs von TI Footprint- oder Pin-zu-Pin-kompatibel ist. Ein Design mit einer einzigen Platine ermöglicht Upgrades des Funktionsumfangs oder der Bandbreite bei zukünftigen Entwicklungen ohne Veränderungen der Hardware. Dieses Konzept trägt dazu bei, die Entwicklungszyklen zu beschleunigen, die Anforderungen verschiedener OEMs zu erfüllen und die Markteinführungszeit zu verkürzen, wodurch Kosten für F&E eingespart werden.
- Der 10BASE-T1S-MAC-PHY [DP83TD555J-Q1](#) für serielle Peripherieschnittstellen lässt sich nahtlos in bestehende Ethernet-Backbone-Netzwerke integrieren, wodurch Gateways zur Protokollkonvertierung und die entsprechende Latenz sowie der damit verbundene Verarbeitungsaufwand bei der Verbindung herkömmlicher CAN/LIN-Edge-Knoten eliminiert werden. Der Baustein unterstützt Power over Data Line und liefert sowohl Strom als auch 10 Mbit/s Daten über ein einziges Twisted-Pair-Kabel, was das Kabelgewicht und die Systemkosten reduziert. Die integrierte PHY-Kollisionsvermeidung erlaubt deterministische Planung mit garantierten Übertragungsmöglichkeiten für jeden Netzwerkknoten und gewährleistet so ein vorhersehbares Kommunikations-Timing. Die größeren Ethernet-Frame-Nutzlasten erlauben die Extraktion größerer Datenmengen und vielfältigerer Datentypen aus ECUs in der Peripherie des Fahrzeugs. Dies ermöglicht erweiterte Diagnosefunktionen und Over-the-Air-Aktualisierungen unter Beibehaltung der Echtzeitleistung.

Fazit

Fortschritte in der Ethernet-Technologie für die Automobilindustrie werden es Automobilherstellern ermöglichen, mehr Funktionen und Fähigkeiten für neue Fahrzeuge bereitzustellen. Eine Zonenarchitektur mit Ethernet trägt dazu bei, den Übergang zu softwaredefinierten Fahrzeugen zu beschleunigen, indem sie die Datenkapazität bereitstellt, die für die nächste Welle autonomer Funktionen benötigt wird – für sicherere und intelligentere Fahrzeuge auf der Straße.

Weitere Ressourcen

- Lesen Sie das Whitepaper „[TSN in Automotive Zone Architectures: Enabling Ethernet Ring Architectures and AVB-Distributed Audio](#)“, um zu erfahren, wie Time-Sensitive Networking die Zuverlässigkeit des Fahrzeugnetzwerks erhöht.
- Einen weiteren Überblick über Zonenarchitekturen finden Sie im Whitepaper „[How a Zone Architecture Paves the Way to a Fully Software-Defined Vehicle](#)“.
- Weitere Informationen zur Spezifikation Open Alliance TC10 finden Sie im Anwendungshinweis „[DP83TC812-Q1 TC10 System Timing Measurements](#)“.

WICHTIGER HINWEIS UND HAFTUNGSAUSSCHLUSS

TI STELLT TECHNISCHE UND ZUVERLÄSSIGKEITSDATEN (EINSCHLIESSLICH DATENBLÄTTER), DESIGNRESSOURCEN (EINSCHLIESSLICH REFERENZDESIGNS), ANWENDUNGS- ODER ANDERE DESIGNBERATUNG, WEB-TOOLS, SICHERHEITSMITTELSCHWIERIGKEITEN UND ANDERE RESSOURCEN „WIE BESEHEN“ UND MIT ALLEN FEHLERN ZUR VERFÜGUNG. UND SCHLIESST ALLE AUSDRÜCKLICHEN UND STILLSCHWEIGENDEN GEWÄHRLEISTUNGEN AUS, EINSCHLIESSLICH UND OHNE EINSCHRÄNKUNG ALLER STILLSCHWEIGENDEN GEWÄHRLEISTUNGEN DER MARKTGÄNGIGKEIT, DER EIGNUNG FÜR EINEN BESTIMMTEN ZWECK ODER DER NICHTVERLETZUNG VON RECHTEN

Diese Ressourcen sind für qualifizierte Entwickler gedacht, die mit TI-Produkten entwickeln. Sie allein sind verantwortlich für (1) die Auswahl der geeigneten TI Produkte für Ihre Anwendung, (2) das Design, die Validierung und den Test Ihrer Anwendung und (3) die Sicherstellung, dass Ihre Anwendung die geltenden Normen sowie alle anderen Sicherheits- und sonstigen Anforderungen erfüllt.

Diese Ressourcen können jederzeit und ohne Vorankündigung geändert werden. Sie erhalten von TI die Erlaubnis, diese Ressourcen ausschließlich für die Entwicklung von Anwendungen mit den in der Ressource beschriebenen TI-Produkten zu verwenden. Jede andere Vervielfältigung und Darstellung dieser Ressourcen ist untersagt. Es wird keine Lizenz für andere Rechte am geistigen Eigentum von TI oder an Rechten am geistigen Eigentum Dritter gewährt. TI übernimmt keine Verantwortung für und Sie schützen TI und seine Vertreter gegen Ansprüche, Schäden, Kosten, Verluste und Verbindlichkeiten, die sich aus Ihrer Nutzung dieser Ressourcen ergeben.

Produkte von TI werden gemäß den [Verkaufsbedingungen von TI](#) , den allgemeinen [Qualitätsrichtlinien von TI](#) , oder anderen geltenden Bedingungen, die entweder auf [ti.com](https://www.ti.com) verfügbar sind oder in Verbindung mit solchen TI-Produkten bereitgestellt werden. Durch die Bereitstellung dieser Ressourcen durch TI werden die geltenden Garantien oder Gewährleistungsausschlüsse von TI für TI-Produkte weder erweitert noch verändert. Sofern TI ein Produkt nicht ausdrücklich als kundenspezifisch oder nach Kundenwunsch gefertigt bezeichnet, handelt es sich bei TI-Produkten um Standard-, Katalog- und Allzweckgeräten.

TI widerspricht allen zusätzlichen oder abweichenden Bedingungen, die Sie möglicherweise vorschlagen und lehnt sie ab.

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

Letzte Aktualisierung 10/2025

IMPORTANT NOTICE AND DISCLAIMER

TI PROVIDES TECHNICAL AND RELIABILITY DATA (INCLUDING DATASHEETS), DESIGN RESOURCES (INCLUDING REFERENCE DESIGNS), APPLICATION OR OTHER DESIGN ADVICE, WEB TOOLS, SAFETY INFORMATION, AND OTHER RESOURCES "AS IS" AND WITH ALL FAULTS, AND DISCLAIMS ALL WARRANTIES, EXPRESS AND IMPLIED, INCLUDING WITHOUT LIMITATION ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE OR NON-INFRINGEMENT OF THIRD PARTY INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS.

These resources are intended for skilled developers designing with TI products. You are solely responsible for (1) selecting the appropriate TI products for your application, (2) designing, validating and testing your application, and (3) ensuring your application meets applicable standards, and any other safety, security, regulatory or other requirements.

These resources are subject to change without notice. TI grants you permission to use these resources only for development of an application that uses the TI products described in the resource. Other reproduction and display of these resources is prohibited. No license is granted to any other TI intellectual property right or to any third party intellectual property right. TI disclaims responsibility for, and you fully indemnify TI and its representatives against any claims, damages, costs, losses, and liabilities arising out of your use of these resources.

TI's products are provided subject to [TI's Terms of Sale](#), [TI's General Quality Guidelines](#), or other applicable terms available either on ti.com or provided in conjunction with such TI products. TI's provision of these resources does not expand or otherwise alter TI's applicable warranties or warranty disclaimers for TI products. Unless TI explicitly designates a product as custom or customer-specified, TI products are standard, catalog, general purpose devices.

TI objects to and rejects any additional or different terms you may propose.

Copyright © 2026, Texas Instruments Incorporated

Last updated 10/2025