



SENSOREN UND MESSTECHNIK

HINTERGRUND

Ausfall-Vorhersage:
Wartung in Zeiten von KI

S. 6

EDGE IMPULSE

Maschinelles Lernen
auf Mikrocontrollern

Von unserem Partnermagazin
Elektronica Open Source

S. 18



S. 12



S. 28



S. 16

WORKSHOP

Verzerrungen
bei 10 MHz
messen

S. 34

**Kostenlose LoRa-
Entwicklungskits**
Einstieg in Low-Power-
Datenübertragung

**MEMS-Module mit
integrierten Algorithmen**
Gebrauchsfertige
Messwerte

**Entwicklung von
Leistungselektronik**
Messtechniklösungen
von Siglent

e-lektor e-zine

Your dose of electronics



Jede Woche, in der Sie den Elektor e-zine Newsletter nicht abonnieren, ist eine Woche mit großartigen Artikeln und Projekten zum Thema Elektronik, die Sie verpassen!

Also, worauf warten Sie noch? Melden Sie sich heute für unseren Elektor e-zine Newsletter unter www.elektor.de/ezine an und erhalten Sie zusätzlich ein kostenloses Raspberry Pi Projektbuch!



Was können Sie erwarten?

Redaktioneller Elektor-Newsletter

Jeden Freitag erhalten Sie die wichtigsten Artikel und Projekte der Woche. Wir zeigen MCU-basierte Projekte, IoT, Programmierung, KI und mehr!

Elektor-Newsletter mit exklusiven Angeboten

Verpassen Sie nicht unsere Shop-Angebote, jeden Dienstag und Donnerstag haben wir eine besondere Aktion für Sie.

Mailing von externen Partnern

Sie wollen über die laufenden Aktivitäten in der Branche informiert bleiben? Dann gibt Ihnen diese E-Mail die besten Einblicke. Unregelmäßig, aber immer mittwochs.

Von Jens Nickel

Chefredakteur



Der Sensor-Markt ist im Aufwind. Besonders positiv: Fachleute nehmen an, dass die Corona-Krise hier schon bald keine Auswirkungen mehr haben wird (Seite 32).

Die Fülle an generierten Messwerten muss selbstverständlich auch verarbeitet werden. Direkt ins Sensormodul integrierte Algorithmen können helfen, aus den Rohdaten (Alarm-) Ereignisse abzuleiten (Seite 28). Und natürlich - Sie ahnen es sicher schon - kommt dabei auch das Thema KI ins Spiel. Unser Redakteur Stuart Cording zeigt in seinem Hintergrund-Artikel auf Seite 6, wie sich maschinelles Lernen dazu nutzen lässt, den Ausfall von industriellen Komponenten vorherzusehen. Die Zeiten ungeplanten und geplanten Stillstands von Anlagen lassen sich dadurch minimieren.

Ans Herz legen möchte ich Ihnen auch den Artikel auf Seite 18. Mit der Entwicklungsplattform Edge Impulse können selbst KI-Einsteiger (und dazu gehören ja noch viele Entwickler) erste Erfahrungen mit Sprach-, Klang-, Gestenerkennung und vielen weiteren Anwendungen von Neuronalen Netzen sammeln. Diese werden in der Cloud trainiert und können dann auf recht günstigen Controllerboards implementiert werden, um an der „Edge“ Sensorwerte einzuordnen. Für erste Gehversuche reicht allerdings auch ein Smartphone. Vielleicht juckt es Sie - genauso wie mich - schon in den Fingern?

210201-02

Keep it simple! Sense with MEMS.



© eSmart



MEMS Sensor Portfolio & Kundenservice

Sensoren sind ein integraler Bestandteil jeder zukünftigen Anwendung. Das Messen von Temperatur, Feuchtigkeit, Druck oder Beschleunigung war noch nie einfacher. Nutzen Sie die Vorteile unseres Software Development Kits und der ab Werk erhältlichen Evaluierungsboards. Ausführliche Dokumentationen sowie der direkte Support durch geschulte Ingenieure lassen keine Fragen offen. Mit exzellenter Messgenauigkeit und Langzeitstabilität liefern die Sensoren hochpräzise und akkurate Ausgangswerte mit intelligenten On-Chip-Interrupt-Funktionen.

Kombinieren Sie Sensoren und Funk – starten Sie Ihre IoT-Anwendung noch heute: www.we-online.de/sensors

- Support durch Ingenieure innerhalb von 24 h
- Exzellente Messgenauigkeit
- Ab Werk kalibriert und direkt einsatzbereit
- Kundenspezifische Interrupt Einstellungen
- Implementierte Algorithmen
- Digitale SPI- & I²C-Schnittstellen

#SensewithMEMS



Rubriken

- 5 Impressum**
- 32 Infografiken**
Fakten und Zahlen
- 44 Wall of Fame**
Elektors Partner in der Elektronikindustrie
- 50 Nächste Ausgabe**

Artikel

- 6 Vorhersage statt Vorausschau - Wartung in Zeiten von KI**
Wie maschinelles Lernen Instandhaltungssysteme verändert
- 12 Kostenlose LoRa-Entwicklungskits**
Einstieg in Low-Power-Datenübertragung
- 14 Vier bahnbrechende Sensorentwicklungen**
Nominiert für den Innovationspreis des AMA Fachverbands Sensorik und Messtechnik
- 16 Messtechniklösungen für die Entwicklung von Leistungselektronik**
- 18 Edge Impulse: KI für Mikrocontroller**
Ein intuitives SDK für Neuronale Netze
- 25 Die technische Evolution der Sensoren**
Vielfältige Sensoren für vielfältige Anwendungen
- 28 MEMS-Sensormodule mit integrierten Algorithmen**
Gebrauchsfertige Messwerte
- 30 Hier kommt die digitale Ergonomie!**
- 34 Verzerrungen bei 10 MHz messen**
Mit Filtern und Spectrum Analyzer
- 38 Smartes Prüf- und Programmiergerät für IO-Link-Sensoren**
- 40 Review**
Joy-IT PSG9080 DDS-Funktionsgenerator
- 43 CAN-FD-Anbindung per Ethernet**
- 46 Leistungsstarker Handheld-Mikrowellenanalysator**
Der neue Keysight FieldFox Mikrowellenanalysator unterstützt den Frequenzbereich bis 54 GHz

Impressum

Elektor Industry

Ausgabe 2/2021
Sensoren und Messtechnik
© 2021
www.elektormagazine.de

Elektor Industry, Deutsche Ausgabe, wird in 2021 drei Mal veröffentlicht.

Hauptsitz des Verlages

Elektor Verlag GmbH
Kackertstr. 10
52072 Aachen
Tel. +49 241 95509-190
Fax +49 241 95509-013

Chefredakteur (V.i.s.d.P.)

Jens Nickel
redaktion@elektor.de

Redaktion

C.J. Abate, Stuart Cording,
Robert van der Zwan

Anzeigen & Sponsoring

Raoul Morreau
Tel. +31 (0)6 4403 9907
raoul.morreau@elektor.com

Layout

Harmen Heida, Sylvia Sopamena
und Patrick Wielders

Herausgeber

Don Akkermans

Druck

Pijper Media, Stettinweg 15,
9723 HD Groningen

Aufgabe

Elektor Industry bietet Elektronik-Ingenieuren, Innovatoren und Start-ups Informationen über und Einblicke in die neuesten Produkte, Techniken und Entwicklungen aus der Elektronik-Industrie.

Distribution und Lieferung

Elektor Industry erscheint zugleich auf Deutsch und Englisch. Die Ausgabe wird an Elektor Gold-Mitglieder als gedruckte Version und an Elektor Green-Mitglieder als pdf-Datei verschickt. Das Magazin wird auf Messen gratis verbreitet wie z.B. auf der Productronica (München), electronica (München), und embedded world (Nürnberg).

Leserhinweis

Elektor Industry enthält gesponserte Artikel. Der Herausgeber bestätigt alle Trademarks in Verbindung mit Produkten, Diensten, Materialien und Firmennamen, die in dieser Veröffentlichung erscheinen. Die in der Elektor Industry vertretenen Ansichten stimmen nicht zwangsweise mit denjenigen des Herausgebers oder der Redaktion überein.

Urheberrecht

Die in dieser Zeitschrift veröffentlichten Beiträge, insbesondere alle Aufsätze und Artikel sowie alle Entwürfe, Pläne, Zeichnungen einschließlich Platinen sind urheberrechtlich geschützt. Ihre auch teilweise Vervielfältigung und Verbreitung ist grundsätzlich nur mit vorheriger schriftlicher Zustimmung des Herausgebers gestattet. Die veröffentlichten Schaltungen können unter Patent oder Gebrauchsmusterschutz stehen. Herstellen, Feilhalten, Inverkehrbringen und gewerblicher Gebrauch der Beiträge sind nur mit Zustimmung des Verlages und ggf. des Schutzrechtsinhabers zulässig. Nur der private Gebrauch ist frei. Bei den benutzten Warenbezeichnungen kann es sich um geschützte Warenzeichen handeln, die nur mit Zustimmung ihrer Inhaber warenzeichengemäß benutzt werden dürfen. Die geltenden gesetzlichen Bestimmungen hinsichtlich Bau, Erwerb und Betrieb von Sende- und Empfangseinrichtungen und der elektrischen Sicherheit sind unbedingt zu beachten. Eine Haftung des Herausgebers für die Richtigkeit und Brauchbarkeit der veröffentlichten Schaltungen und sonstigen Anordnungen sowie für die Richtigkeit des technischen Inhalts der veröffentlichten Aufsätze und sonstigen Beiträge ist ausgeschlossen.

© Elektor International Media b.v. 2021
www.elektormagazine.de
Printed in the Netherlands



Vorhersage statt Vorausschau –

Wartung in Zeiten von KI

Wie maschinelles Lernen Instandhaltungssysteme verändert

Von Stuart Cording (Elektor)

Industrielle Systeme in Betrieb zu halten, ist wie das Drehen von Tellern auf Stäben - man versucht ständig zu vermeiden, dass welche herunterfallen und kaputtgehen. Zwar funktionieren optimal umgesetzte präventive Wartungssysteme sehr gut, kritische Anlagen müssen dennoch regelmäßig für Wartungsarbeiten vom Netz genommen werden. Außerdem ist ein vorzeitiger Austausch von Teilen und Betriebs- und Schmiermitteln unnötig kostspielig und schlecht für die Umwelt. Deshalb wird zunehmend eine vorhersagende Instandhaltung betrieben, die zu Mitteln der statischen, dynamischen und statistischen Analyse bis hin zum Einsatz von maschinellem Lernen greift, um bevorstehende Ausfälle rechtzeitig zu prognostizieren. Das übergeordnete Ziel: die Betriebszeit zu maximieren und die Wartungskosten zu reduzieren.



Die Kosten für die Aufrechterhaltung der Betriebsbereitschaft von Fertigungsanlagen und die potenziellen Gefahren im Falle eines Fehlers sind seit langem bekannt. In Ingenieurskreisen gibt es die bekannte Geschichte eines ehemaligen Mitarbeiters, der zurückgeholt wird, um eine störrische Maschine zu reparieren [1]. Nachdem das Problem behoben wurde, stellt er eine detaillierte Rechnung, auf der die Reparaturmaßnahme (Klopfen mit einem Hammer oder Markieren der Fehlerstelle mit einem Kreidekreuz) nur ein Hundertstel der Gesamtsumme ausmacht. Der Rest der Rechnungssumme ist für das Wissen, wo zu klopfen oder das Kreidekreuz anzubringen ist.

Eine planmäßige einwöchige Schließung einer Produktionsanlage für Wartungsarbeiten ist nichts Außergewöhnliches. In dieser Zeit der regelmäßigen Wartungsarbeiten gehen die üblichen Mitarbeiter mit ihren Arbeitsgeräten in den Zwangsurlaub, währenddessen Maschinen zerlegt und umgebaut, Rohrleitungen gereinigt und Sichtkontrollen durchgeführt werden. Doch ist es nicht ein wenig absurd, dass ein ganzes Werk für eine Woche geschlossen werden muss, um die Auswirkungen eines möglichen Maschinenausfalls zu verhindern?

Laut Behrtech [2] kosten ungeplante Ausfälle bei industriellen Herstellern 50 Milliarden US-Dollar pro Jahr, wobei ein einzelner Vorfall mit etwa 30...50.000 US-Dollar pro Stunde zu Buche schla-

gen kann (Bild 1). Zu den greifbaren Folgen gehören der Verlust von Produktionskapazitäten, verschwendete Arbeitskosten, die Erschöpfung des Lagerbestands und Lieferverzögerungen. Auf der immateriellen Seite können häufige Maschinenausfälle die Arbeitsmoral beeinträchtigen, Innovationen dämpfen, die Mitarbeiter unter Stress setzen und längerfristig zu einem Verlust von Kunden aufgrund eines beschädigten Rufs führen.

Die meisten Unternehmen setzen deshalb vorbeugende Wartungspläne ein, nicht unähnlich dem Ansatz bei der jährlichen Fahrzeugwartung. Klüber Lubrication, ein Hersteller von Industrieschmierstoffen, bietet unter anderem Softwarelösungen für Wartungsaufgaben an [3]. Darüber hinaus wird von Klüber auch die Messung des Energiebedarfs von Industrieanlagen in Verbindung mit einer Schmierstoffzustandsanalyse angeboten. Dadurch kann die Lebensdauer von Maschinen erhöht werden, was zu einer Reduzierung des Energiebedarfs und des jeweils eingesetzten Schmierstoffs führt. Natürlich ist es das ultimative Ziel, alle verfügbaren Daten, die in einer Industrieanlage oder einem Industriekomplex anfallen, zu sammeln und damit proaktiv nach drohenden Anlagenausfällen zu suchen. Dies ist ein wichtiger Bestandteil von dem, was wir unter Industrie 4.0 und dem industriellen Internet der Dinge (IIoT) verstehen. Die Herausforderung besteht darin, dass in den meisten Anlagen die Sensoren und Steuerungen eingesetzt werden, um etwas herzustellen. Wenn ein beheizter Tank nur einen Temperatur- und einen Flüssigkeitsvolumensensor hat, kann das System auch nur erkennen, ob die Heizung oder eine Pumpe oder ein Ventil defekt ist. Doch dann ist das Kind schon in den Brunnen gefallen. Durch die kontinuierliche Überwachung der Temperaturdaten während des Heizvorgangs aber kann ein Heizungsdefekt schon im Voraus erkannt werden. Durch die Differenzierung der Daten zur Aufheizrate könnte jede Veränderung der Heizungsfunktion erkannt werden, indem akzeptable Grenzen für die Aufheizrate definiert werden. Andere Fehler können durch zusätzliche Sensoren erkannt werden: Elektrische Ventile benötigen möglicherweise Stromsensoren, die abnormale Änderungen der Stromaufnahme feststellen, an Pumpen könnten Schwingungssensoren einen bevorstehenden Lagerausfall erkennen.

Die Glaskugel des Wartungstechnikerns

Die Fähigkeit, einen bevorstehenden Ausfall oder einen Wartungsbedarf zu erkennen, ist die Krönung der Instandhaltungstechnik. Ein solcher vorausschauender Wartungsansatz ermöglicht es, die Zeiten ungeplanten und geplanten Stillstands einer Anlage zu minimieren und notwendige Stillstandszeiten besser zu planen. Das industrielle Schwergewicht Bosch Connected Industry bietet mit seinem Nexeed Industrial Application System [4] eine Lösung. Bestehend aus einer Reihe von Paketen, die je nach Bedarf zusammengestellt werden können, erfasst es Produktions- und Maschinendaten, visualisiert sie in einem abgestimmten Ausgabe-Dashboard und ermöglicht es Anwendern, Regeln zu definieren, die einen Betrieb außerhalb zu erwarteter Normen anzeigen.

OSRAM in Berlin hat auf Basis dieser Plattform seinen Ticketmanager aufgebaut, um die Erkenntnisse der vorausschauenden Instandhaltung zu nutzen. Diese geschichtsträchtige Firma ist bekannt durch die manuelle Herstellung von Glühlampen seit den 1920er Jahren und durch ständige Innovationen in der Lampenherstellung [5]. Heute produziert Osram die Xenarc-Scheinwerferreihe. Dank eines lang andauernden und intensiven Fokus auf Qualität hatte ein bestehender Verbesserungsprozess einen Punkt erreicht,

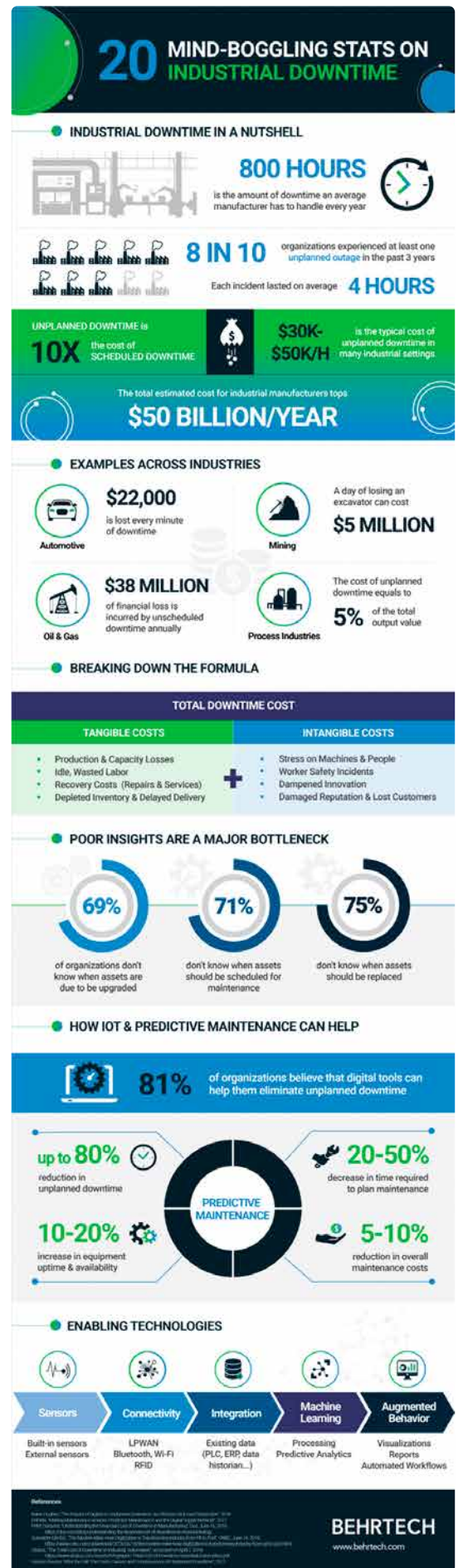


Bild 1. Ungeplante Ausfallzeiten in der industriellen Fertigung kosten schätzungsweise 50 Milliarden Dollar pro Jahr, in der Automobilindustrie etwa 22.000 Dollar pro Minute (Copyright: BehrTech [2]).

Nexeed Industrial Application System: Condition Monitoring

Rules overview

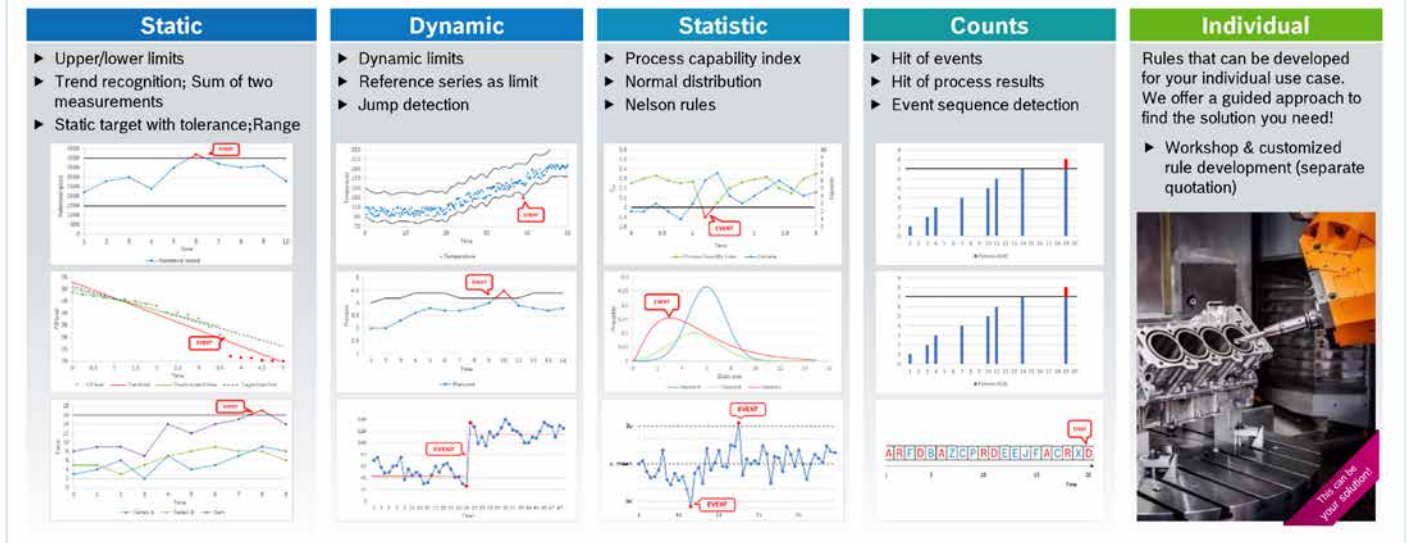


Bild 2. Regeln für die statische, dynamische und statistische Überwachung des Zustands können im Nexeed Industrial Application System konfiguriert werden, um eine vorausschauende Wartung zu realisieren (Copyright: Bosch).

an dem keine weiteren Erfolge mehr erzielt werden konnten [6]. Doch durch den Einsatz von Nexeed in ihren Produktionsanlagen konnte Osram die Fertigungs- und Wartungsprozesse weiter verbessern. Die Nexeed-Plattform liefert die benötigten Daten in einem für das Wartungsteam nutzbaren Format und gibt ihm die Möglichkeit, Grenzwerte zu programmieren, die bei Überschreitung „Tickets“ für Wartungseinsätze auslösen. Die Tickets werden automatisch priorisiert, sind über Handheld-Geräte zugänglich und werden an den für die Aufgabe am besten geeigneten Techniker weitergeleitet. Die Auslöserregeln können einfach sein und auf statischen Grenzwerten oder Trenderkennung basieren, dynamisch sein und unerwartete Sprünge in den Prozesswerten erkennen - oder sogar statistische Analysen verwenden (Bild 2). Bei Bedarf lassen sich komplexere Regeln je nach individuellem Anwendungsfall definieren.

Die Auswirkungen von ML-gestützter Instandhaltung

Die massenhafte Vernetzung von Industriekomplexen für die Industrie 4.0 macht sie sehr geeignet für neue Ansätze der Datenanalyse. Techniken des maschinellen Lernens (ML) sind ideal, um die Millionen von täglich erfassten Datenpunkten zu analysieren. Allerdings erfordert die Anwendung von ML erhebliche Fähigkeiten, die mit der Überprüfung der Eignung der Daten beginnen. ML benötigt große Datenmengen, um die Merkmale zu bestimmen, die erwünschtes und unerwünschtes Verhalten ausmachen. Um beispielsweise einem Algorithmus beizubringen, Zebras zu erkennen, zeigt man ihm zunächst viele Bilder von Zebras. Beim Testen ist es jedoch wahrscheinlich, dass der Algorithmus andere schwarz-weiß gemusterte Tiere wie weiße Tiger, Lemuren, Dachse und Stinktiere falsch als Zebras klassifiziert. Daher müssen Sie auch Bilder dieser Tiere bereitstellen und dem Modell mitteilen, dass sie keine Zebras darstellen. Diese Kombination aus gültigen und ungültigen Beispielen verbessert die Genauigkeit eines ML-Algorithmus. Da die Datensätze aber in erster Linie Daten über funktionierende Systeme innerhalb von Industriekomplexen enthalten, insbesondere wenn diese gut gewartet sind, ist es eine Herausforderung, dem Algorithmus die Anzeichen für eine Verschlechterung einer Anlage beizubringen.

Die nächste Hürde ist die Kennzeichnung, das Labeling. Prozessdaten werden typischerweise von Sensoren erfasst, denen nur eine Größe wie Temperatur, Geschwindigkeit und Druck zugeordnet ist. Es ist daher unklar, ob sich die Daten auf einen korrekten oder fehlerhaften System- oder Prozessbetrieb beziehen.

Eine letzte Herausforderung ist das Fehlen von Datenpunkten aufgrund fehlender Sensoren oder ungleicher Datenmengen von einem Sensor im Vergleich zu anderen. Um zu unserem Beispiel des beheizten Tanks zurückzukehren: Der Prozess kann jede Sekunde einen Temperaturdatenpunkt liefern, aber lediglich einen Auf/Zu-Status für Ventile und Ein/Aus-Status für die Pumpen. Idealerweise benötigt eine Pumpe aber Vibrations-, Temperatur- und Stromsensoren, um Anomalien im Betrieb zu erkennen, die durch Mangel an Schmiermittel oder übermäßigen Verschleiß der Lager verursacht werden. Alternativ müssen Daten generiert werden, aus denen diese Informationen abgeleitet werden können (zum Beispiel Füllzeiten).

Für die Anwendung des ML gibt es eine Reihe von Ansätzen [7]. Die Berechnung der Restnutzungsdauer (RUL) kann verwendet werden, um zu bestimmen, wann ein Maschinenteil wahrscheinlich ausfallen wird, was bei der Wartungsplanung hilft. Dies kann in Form von Betriebsstunden für Maschinen, die kontinuierlich laufen, oder bei Flugzeugturbinen in Form von Zyklen erfolgen. Alternativ kann anomales Verhalten in Echtzeit anhand eines eingehenden Datenstroms erkannt werden, was als Zeitreihenanalyse bezeichnet wird. Ein weiterer Ansatz ist die Unterstützung der Fehleranalyse durch den Einsatz von ML, um mögliche Problemlösungen vorzuschlagen, etwa den Austausch der Pumpe statt des Ventils, wenn ein Fehler auftritt.

RUL kann auf unterschiedliche Weise angewendet werden [8]. Ein Ansatz ist die binäre Klassifizierung, um die Frage „Wird meine Maschine nächste Woche ausfallen?“ zu beantworten, auf die wir eine Ja/Nein-Antwort erwarten. Alternativ kann eine Mehrfachklassifikation verwendet werden, die Ja/Nein-Antworten auf die Frage bezogen auf verschiedene Zeiträume liefert (Ausfall in zwei, vier oder sechs Wochen). ML-Modelle, die eine Regression bestimmen können, lassen sich relativ schnell mit verfügbaren Open-Source-Tools wie scikit-learn [9], programmiert in Python, entwickeln. Um den Entwicklungsprozess zu unterstützen, stellen

Organisationen wie das Prognostics Center of Excellence der NASA Repositories mit gekennzeichneten Daten zur Verfügung, die für die Entwicklung von ML-Ausfallvorhersagemodellen geeignet sind. Ein nützlicher Datensatz ist der Turbofan Engine Degradation Simulation Data Set [10] (C-MAPSS-Datensatz). Er liefert Daten von 21 Sensoren mit Sensorausfällen, wie es in realen Daten auftreten würde. Jeder Datensatz endet mit einem Triebwerksausfall, ein sogenannter Run-to-Failure-Datensatz. Die RUL-Werte sind ebenfalls enthalten, was den Entwicklern von ML-Algorithmen ermöglicht, ihre Vorhersagemodelle mit der Realität zu vergleichen. Jeder simulierte Motor beginnt außerdem mit einem unterschiedlichen, aber akzeptablen Verschleiß, was den Datensatz noch realistischer macht.

In einem dokumentierten Projekt [11] zur Entwicklung eines RUL-Modells durch doubleSlash Net-Business (München) zeigt die Fehler- oder Konfusionsmatrix, dass deren Vorhersagealgorithmus 63-mal den Ausfall der Turbine in den nächsten 30 Tagen richtig, aber 12-mal einen bevorstehenden Ausfall falsch bestimmt hat (**Bild 3**). Wenn man bedenkt, welche gravierenden Auswirkungen eine nicht funktionierende Turbine auf die Sicherheit eines Flugzeugs hätte, kann die erreichte Genauigkeit als sehr gut angesehen werden. Darüber hinaus hat das Modell keinen Nicht-Ausfall-Fall vorhergesagt, wenn ein Ausfall aufgrund eines Defekts aufgetreten wäre. In einem anderen Projekt [12], in dem dieselben C-MAPSS-Daten mit scikit-learn und H2O.ai [13] analysiert wurden, verbesserte das Entfernen der Daten bestimmter Sensoren aus dem Datensatz den mittleren quadratischen Vorhersagefehler (Root-Mean-Square-Error, RMSE). Dass nicht alle Daten im Datensatz den gleichen Einfluss oder Wert auf die Qualität der Modellausgabe haben, unterstreicht die kritische Rolle der Datenwissenschaftler bei der Entwicklung von ML-Modellen.

Eine solche ML-gestützte vorausschauende Wartung wird bereits in der Luftfahrtindustrie eingesetzt. Die Lufthansa hat durch den Einsatz der Data Science Plattform von RapidMiner [15] eine 20%-ige Reduzierung der Ausfallzeiten [14] erreicht. Die Implementierung profitiert dabei von den leicht verfügbaren Daten, die durch bestehende präventive Wartungsprogramme gesammelt werden. Natürlich ist nicht jeder in Programmiersprachen wie Python bewandert und bevorzugt vielleicht einen Point-and-Click-Ansatz.

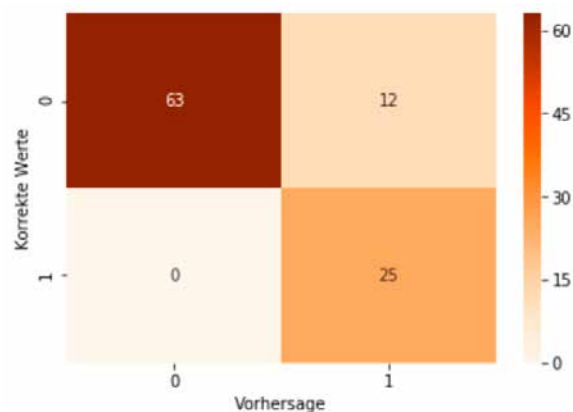


Bild 3. Die Fehlermatrix, die sich aus dem ML-Algorithmus zur prädiktiven Fehleranalyse für ein Turbofan-Triebwerk ergibt (Copyright: doubleSlash Net-Business GmbH).

Talend [16] hat eine Demonstration entwickelt, in der Beschleunigungssensor-Daten von Mobiltelefonen analysiert und diese dann als ruhend, gehend oder laufend klassifiziert. Basierend auf ihrer Enterprise-Big-Data-Plattform nimmt sie die gestreamten Daten der Beschleunigungsmesser in Echtzeit über eine Kafka-Nachrichtenqueue [17] entgegen und analysiert sie dann mit einem Random-Forest-Modell aus der Spark MLlib [18]. Die Ergebnisse werden in einem Dashboard [19] angezeigt. Obwohl es sich nicht um ein Beispiel für vorausschauende Wartung handelt, zeigt es den alternativen Implementierungsansatz auf.

ML in der Edge

Die Ausführung von ML-Algorithmen ist eine recht Prozessor-intensive Aufgabe. Aus diesem Grund gibt es viele Cloud-basierte Plattformen für künstliche Intelligenz im Angebot. Da eine der großen Sorgen der Industrie rund um ML jedoch die Kontrolle der Daten ist, auf denen die Algorithmen basieren, werden Cloud-basierte ML-Implementierungen oft abgelehnt und stattdessen Lösungen gesucht, die im eigenen Haus betrieben werden können.

Jetzt informieren & gratis LoRa Kit sichern
thomas-krenn.com/lo-ra

Große Veränderungen
beginnen mit kleiner Technik

Fortschritt entsteht nicht immer durch revolutionäre Großprojekte. Oft sind es kleine Bauteile, die einen technologischen Wandel herbeiführen. So kann zum Beispiel in Zukunft die Überwachung von Feinstaubbelastung und Emissionswerten in Städten und Ballungszentren vollständig autonom erfolgen – durch wenige unscheinbare LoRa-Sensoren an den Messstationen. Und das ist nur der Anfang: Dank hoher Übertragungreichweiten bei sehr niedrigem Energieverbrauch eignet sich LoRa-Sensorik ideal für viele weitere innovative IoT-Projekte.

#gratis

THOMAS
KRENN®

Serverhersteller

Lösungen wie das Edge AI Gateway von RapidLab [20] bieten eine Alternative. Der Begriff „Edge“ bedeutet, dass die Verarbeitungskapazität vor Ort bei den Geräten sitzt, die die Daten generieren, und nicht entfernt in der Cloud. Dadurch wird nicht nur sichergestellt, dass die Daten das Gebäude nicht verlassen, sondern es ist oft auch die einzige Möglichkeit, die benötigte Echtzeit-ML-Unterstützung mit geringer Latenz zu implementieren. Mit dem NVIDIA Jetson Nano System-on-Module (**Bild 4**) lassen sich Sensoren direkt in bestehende industrielle Netzwerke (PROFIBUS, IO-Link, CAN) integrieren. Außerdem verfügt das Gateway über zwei MIPI CSI-2-Anschlüsse für die Anbindung von Kameras, die eine weitere Quelle für visuelle oder thermische Daten für vorausschauende Wartungsalgorithmen darstellen können.

Während die ganzheitliche Analyse von Industrieanlagen zu Zwecken der vorausschauenden Wartung ein Ansatz ist, besteht die Alternative darin, die „Intelligenz“ direkt in die Anlagen zu integrieren. Intelligente Motoren, Ventile und Pumpen könnten ML nutzen, um ihren Verschleißgrad mit Hilfe hochintegrierter Sensoren und einer für den Betrieb auf Mikrocontrollern geeigneten Software zu bestimmen. Ein Kandidat für diesen Ansatz ist tinyML [21] [22], das mit einer Leistung von nur 1 mW und 1 KB Arbeitsspeicher (RAM) auskommen soll. Ein anderer ist AIFES (Artificial Intelligence for Embedded Systems), entwickelt vom Fraunhofer-Institut für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme. Der Vorteil dieser C-Sprachbibliothek ist, dass das Training direkt auf dem Mikrocontroller durchgeführt wird, anstatt das Modell auf einer leistungsfähigeren Verarbeitungsplattform zu entwickeln. Bislang wurden einfache Anwendungen zur Klassifizierung von Luftgesten und handgeschriebenen Zahlen mit einem Arduino Uno [23] erstellt (**Bild 5**).

Von präventiv zu prädiktiv

Es ist klar, dass Fortschritte in Data Science und ML mit den laufenden Anstrengungen der Industrie 4.0 kombiniert werden können. Eine große Herausforderung ist jedoch die Beschaffung von Daten, die für das Training von ML-Modellen geeignet sind. Da die vorhandenen Sensoren in erster Linie für die Prozesssteuerung und nicht für die Anlagenüberwachung verwendet werden, ist es schwierig, einem ML-Algorithmus den Unterschied zwischen einem regulären Betrieb und einem bevorstehenden Ausfall beizubringen.

Die Verwendung genauer Modelle zur Generierung von „Run-to-Failure“-Datensätzen, wie etwa die NASA für den Betrieb von Turbofan-Triebwerken zur Verfügung stellt, ist eine Möglichkeit. Diese erfordern jedoch erhebliche Investitionen, und im Gegensatz zu Flugzeugtriebwerken sind industrielle Systeme vielfältig, was es schwierig macht, standardisierte Modelle für alle Systeme zu definieren. Vielleicht liegt die wirkliche Lösung in der Einbettung von ML (wie tinyML) in einzelne Pumpen, Ventile und größere Systeme wie Förderbänder und Roboterarme. Bestehende Wartungsplattformen wie Nexeed könnten dann die „Out-of-band-Überwachung“ der ML-Bewertung des Verschleißgrads jeder Komponente übernehmen, anstatt sie über eine komplexe Sammlung von vernetzten Sensoren abzuleiten. Es ist klar, dass ML, wenn es angewandt wird, eine signifikante positive Rolle in vorausschauenden Wartungsanwendungen spielen kann.



(210264-02)



Bild 4. ML mit niedriger Latenz wird durch Lösungen wie das „Edge AI Gateway“ von RapidLab mit dem Jetson Nano von NVIDIA ermöglicht (Quelle: rapidLAB.io).



Bild 5. Das AIFES des Fraunhofer-Instituts für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme betreibt Handschrifterkennung auf einem Arduino Uno (Copyright: Fraunhofer IMS).

Sie haben Fragen oder Kommentare?

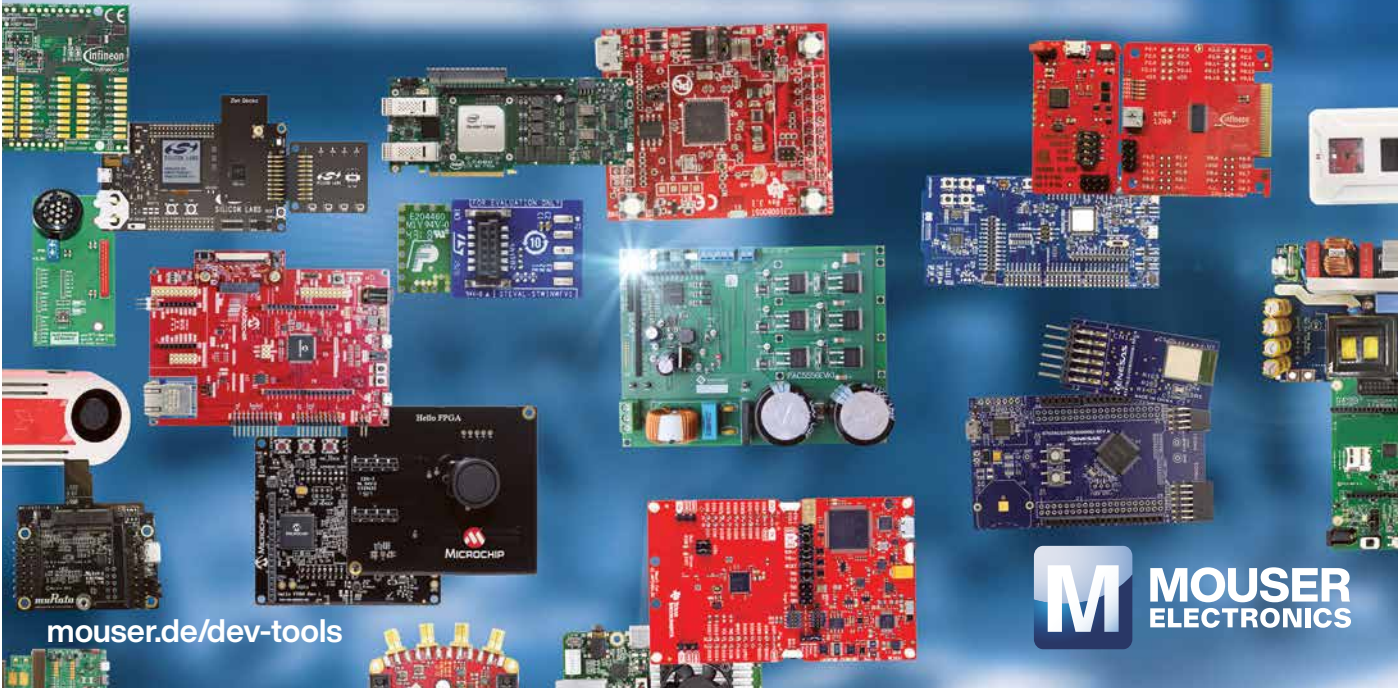
Wenn Sie technische Fragen zu diesem Artikel haben, können Sie sich gerne per E-Mail an den Autor wenden: stuart.cording@elektor.com.

WEBLINKS

- [1] „Knowing Where To Tap“, Quote Investigator, März 2017: <https://bit.ly/2OGQe9o>
- [2] „20 Mind-Boggling Stats on the Cost of Industrial Downtime“, BehrTech: <https://bit.ly/3dY4cfz>
- [3] KlüberEfficiencySupport-Webseite: <https://bit.ly/3mHcXie>
- [4] Nexeed Industrial Application System-Webseite: <https://bit.ly/2QjNNKx>
- [5] A. Burghart, B. Müller, W. Hanseder, „100 Jahre OSRAM - Licht hat einen Namen“, OSRAM GmbH, Dezember 2006: http://ceolas.net/Docs/Osram_Geschichte.pdf
- [6] „A Guide to Robotics and Automation“, Distrelec (Seite 76): <https://bit.ly/3mJGtUG>
- [7] A. Gonfalonieri, „How to Implement Machine Learning For Predictive Maintenance“, Towards Data Science, November 2019: <https://bit.ly/32dv0D2>
- [8] J. Mehne, „So setzen Sie Predictive Maintenance richtig um“, Computerwoche, Januar 2021: <https://bit.ly/3teHTZE>
- [9] Webseite scikit-learn: <https://scikit-learn.org>
- [10] Turbofan Engine Degradation Simulation Data Set: <https://go.nasa.gov/3uMH5M4>
- [11] J. Mehne, Predictive Maintenance Jupyter Notebook, GitHub, September 2019: <https://bit.ly/3mJE6RO>
- [12] R. Alwis, S. Perera, „Machine Learning Techniques for Predictive Maintenance“, InfoQ, Mai 2017: <https://bit.ly/3mIBy67>
- [13] Webseite H2O.ai: <https://www.h2o.ai/>
- [14] „Using Machine Learning for Predictive Maintenance“, RapidMiner, September 2020: <https://bit.ly/2RrJY6p>
- [15] RapidMiner-Website: <https://rapidminer.com/>
- [16] N. Krupa, „Applying Machine Learning to IoT Sensors“, Talend, April 2017: <https://bit.ly/2PQ15P5>
- [17] Kafka-Website: <https://kafka.apache.org/>
- [18] Webseite Apache Spark MLlib: <https://spark.apache.org/mllib/>
- [19] „Analytics Dashboard - Talend IoT Demo“, Talend, April 2017: <https://bit.ly/3dcm5Z2>
- [20] RapidLab Edge AI Gateway: <https://rapidlab.io/edge-ai-gateway/>
- [21] Webseite tinyML-Foundation: <https://www.tinyml.org/>
- [22] C. J. Abate, „Was ist tinyML?“, elektormagazine.de, Februar 2021: <https://www.elektormagazine.de/articles/was-ist-tinyml-1>
- [23] „Machine Learning für Sensoren“, Fraunhofer IMS, Juni 2019: <https://bit.ly/3dDqjQd>

Development Tools alle an einem Ort

Tausende Tools von hunderten zuverlässigen Herstellern



mouser.de/dev-tools

MOUSER
ELECTRONICS

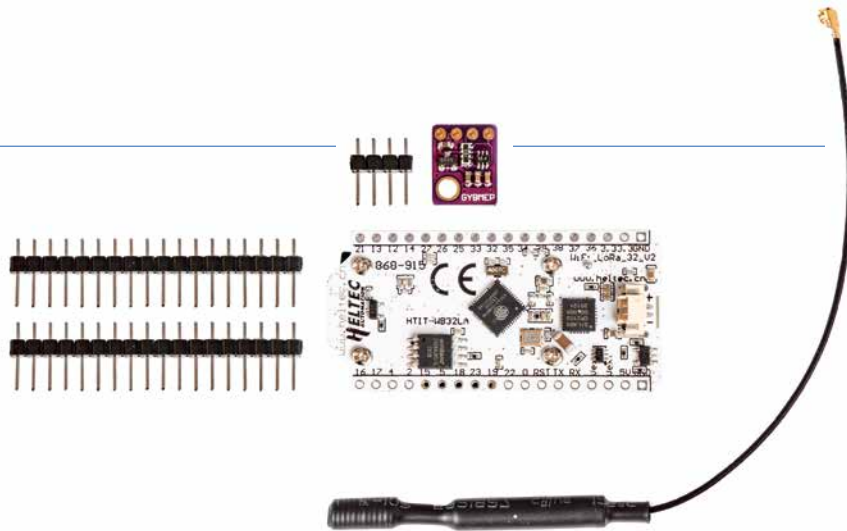


Kostenlose **LoRa** Entwicklungskits

Serverhersteller Thomas-Krenn unterstützt IoT-Entwickler beim Einstieg in Low-Power-Datenübertragung

Ein Beitrag von Thomas-Krenn

Der Serverhersteller Thomas-Krenn vergibt kostenlose Developer-Kits für die LoRaWAN-Technologie (Long Range Wide Area Network) an IoT-Entwickler. Die Kits enthalten jeweils zwei Boards mit ESP32-Mikrocontroller, LoRa-Modul, OLED-Display und WiFi-, Bluetooth- und Micro-USB-Interface sowie die passenden USB-Anschlusskabel. Ebenfalls enthalten ist ein Sensor BME280 zur Messung von Temperatur, Luftdruck und Luftfeuchtigkeit. Damit sind alle Komponenten vorhanden, um sofort mit einem Projekt zur Datenerfassung und -übertragung zu starten. Interessenten können sich mit einer kurzen Beschreibung der geplanten Anwendung direkt auf der Website von Thomas-Krenn bewerben [1].



LoRaWAN ist eine Technologie zur drahtlosen Datenübertragung bei geringem Datenaufkommen über Entfernungen von mehreren Kilometern. Es zeichnet sich durch seinen sehr geringen Energiebedarf aus und eignet sich – in Verbindung mit den passenden Sensoren – für Messdaten in IoT-Netzwerken, etwa in Industrie, Logistik, Smart Buildings, Umwelttechnik, Verkehr oder Landwirtschaft.

Als offener Standard bietet LoRaWAN die Möglichkeit, an alle IoT-Frameworks anzudocken, braucht im Gegensatz zu anderen Low-Power-Netzwerken keinen zusätzlichen Provider und bildet somit eine kostengünstige und zukunftsfähige Möglichkeit der Automatisierung.

„Wir sehen in der LoRaWAN-Technologie ein großes Potenzial im IoT-Bereich“, sagt Bernhard Seibold, als Vice President Systems Engineering verantwortlich für die IoT- und Edge-Strategie des Unternehmens. „Mit den kostenlosen LoRa-Kits möchten wir IoT im wahrsten Sinn des Wortes begreifbar machen. Wir wollen Entwick-

lern die Möglichkeit geben, Erfahrungen zu sammeln, aber auch selbst mehr über Anwendungsmöglichkeiten lernen und unser Know-how natürlich auch weitergeben.“

So hat Thomas-Krenn in seinem Technik-Wiki umfangreiche Informationen über die verwendete Technik und eine Schritt-für-Schritt-Anleitung zur Installation und Programmierung mittels Arduino-IDE veröffentlicht und stellt außerdem Daten für den 3D-Druck von Gehäusen für die Boards zur Verfügung [2]. Statt des mitgelieferten Sensors lassen sich auch weitere Sensoren oder Aktoren mit den Boards verwenden, etwa nach dem I²C-Standard. Neben klassischen Industrie-Bus-Systemen für Echtzeit-Daten oder IT-Protokollen mit hohen Bandbreiten – etwa für Bild- und Videoverarbeitung – sind drahtlose Übertragungen kleiner Datenmengen über größere Entfernungen und über Gebäudegrenzen hinweg ein wichtiger Bestandteil im Technologiemix für IoT. „Im Bereich Systems Engineering sind

wir bei Thomas-Krenn immer wieder mit unterschiedlichsten Anforderungen zur Integration von Sensorik und Messdatenerfassung in die IT konfrontiert“, so Seibold. „Die hardwareseitige Umsetzung solcher individuellen Projekte ist derzeit der am schnellsten wachsende Bereich unseres Unternehmens, bei dem wir eng mit Entwicklern und Integratoren zusammenarbeiten. Das Erfassen und Verstehen der Anforderungen des Kunden ist dabei ein entscheidender Schritt, der oft den gesamten Erfolg des Projekts bestimmt, nicht nur in der Sensorik.“

Thomas-Krenn hat deshalb unter der Domain *custom-hardware.com* ein Portal für kundenspezifische Entwicklungen an den Start gebracht. Anwender können hier in ähnlicher Weise wie beim Thomas-Krenn-Serverkonfigurator Schritt für Schritt ihre individuellen Anforderungen definieren. So erhalten sie in kürzester Zeit ein genau passendes Custom-Hardware-Angebot. 

210262-02

Über Thomas-Krenn

Die Thomas-Krenn.AG ist ein führender, wachstumsstarker Hersteller individueller Server- und Storage-Systeme. Seit 2002 beliefert das Unternehmen Endanwender, Wiederverkäufer und Betreiber von Rechenzentren mit hochwertiger Hardware nach dem Build-to-Order-Prinzip. Auch als Lösungsanbieter für individuelle Kundenprojekte steht die Thomas-Krenn.AG für höchste Servicequalität bei hardwarenaher Entwicklung, Auftragsfertigung, Produktveredelung und Logistik. Sie ist damit ein anerkannt zuverlässiger Partner für Industrie, Systemhäuser, Dienstleister sowie mittelständische Endkunden aus jeder Branche. Die Thomas-Krenn.AG produziert mit derzeit rund 160 Mitarbeitern alle Server in Deutschland am Standort Freyung.

WEBLINKS

- [1] Kostenlose LoRaWAN-Entwicklerboards: <https://www.thomas-krenn.com/de/unternehmen/kampagnen/lora-sensorik.html>
- [2] Einrichtung von LoRaWAN-Verbindungen mit dem Developer-Kit:
https://www.thomas-krenn.com/de/wiki/LoRaWAN_P2P_Verbindung_Transceiver_Receiver_einrichten
- [3] Custom-Hardware-Portal: <https://www.custom-hardware.com>

Vier bahnbrechende Sensorentwicklungen

Nominiert für den Innovationspreis des AMA Fachverbands Sensorik und Messtechnik

Von Helmuth Lemme

10.000 Euro winken kreativen Erfindern, die außergewöhnliche Neuerungen entwickeln, um nichtelektrische Größen elektrisch zu messen. 29 Teams haben sich in diesem Jahr um den Preis beworben, vier davon sind nominiert.

Die entscheidenden Kriterien für die Vergabe sind Innovationshöhe, Originalität der Lösung und Marktrelevanz. Geehrt werden ganz bewusst die Menschen, nicht ihre Firmen oder Institute. Die Jury besteht aus Branchenexperten von Hochschulen, Forschungseinrichtungen und Unternehmen; die Leitung hat Prof. Andreas Schütze (Universität des Saarlandes).

FMCW-Radarsystem für 126 bis 182 GHz

Ein verbreitetes Mittel zur Messung von Abständen und Entfernungen sind Radarwellen. Zwei verschiedene Prinzipien sind üblich: Zum einen mit kurzen Impulsen fester Frequenz, wobei die Laufzeit zwischen Aussendung und Echoempfang gemessen wird, zum anderen mit einem Dauerstrichsignal, dessen Frequenz periodisch moduliert wird (*frequency modulated continuous wave*, FMCW). Hier hat das vom Objekt reflektierte Signal bei der Rückkehr zum Empfänger eine

etwas andere Frequenz als das momentan ausgesendete; die Differenz ist ein Maß für die Entfernung. Bei Objekten, die aus Schichten mit verschiedenen Brechungsindizes bestehen, wird die Welle an jeder Grenzfläche reflektiert - so sind Dickenmessungen möglich.

Bei derzeitigen Versionen liegt die Sendefrequenz meist im Bereich 75 bis 85 GHz. Die theoretisch damit mögliche Modulationsbandbreite von 10 GHz wird aber höchst selten genutzt, sondern meist nur 4 GHz. Damit ist eine Messauflösung bis herab zu ca. 1 mm erreichbar. Das von Timo Jaeschke und seinem Team bei der Firma 2Pi Labs in Bochum entwickelte System überstreicht nun ein Frequenzband von 126 bis 182 GHz. Die Modulationsbandbreite von 56 GHz bringt eine um einen Faktor 5,6 bis 14 gesteigerte Auflösung. Mittels einiger weiterer Verbesserungen ist letztlich eine Genauigkeit bis in den einstelligen µm-Bereich möglich.

Sender, Empfänger und Signalauswertung

befinden sich alle auf einem Chip (**Bild 1**). Der hier verwendete Halbleiter ist Silizium-Germanium (SiGe; Hersteller Infineon), das sehr viel höhere Frequenzen verarbeiten kann als reines Silizium. Konkrete Anwendungen liegen vor allem im industriellen Bereich, z. B. bei der berührungslosen Messung der Wanddicke von Kunststoffrohren, Beschichtungen und mehr.

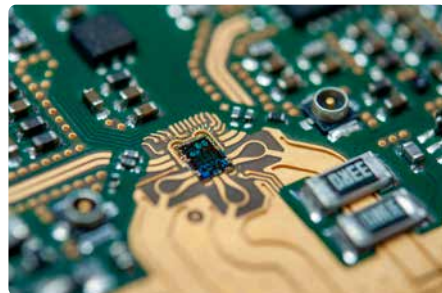


Bild 1. SiGe-Radarchip für den ultraweiten Frequenzbereich von 126 bis 182 GHz (Bild: 2Pi Labs).

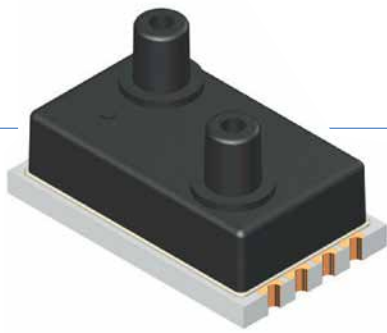


Bild 3. Mehrere verschiedene Gassensoren in einem Gehäuse erfassen die einzelnen Anteile in Gemischen (Bild: First Sensor).



Bild 4. Der Multisensor misst alle relevanten Parameter zum Bierbrauen (Bild: Endress + Hauser).

Gasmessung mit wesentlich verbesserter Linearität

Ein verbreitetes, kostengünstiges Prinzip zur Messung der Konzentration von Gasen verwendet eine halbleitende Metalloxidschicht, deren elektrischer Widerstand sich ändert, wenn das nachzuweisende Gas an der Oberfläche adsorbiert; je nach Gasart (oxidierend oder reduzierend) steigt oder sinkt er. Standardmaterial ist Zinndioxid (SnO_2), aber auch einige andere sind üblich, häufig mit Zusatzstoffen dotiert. Durch geeignete Oberflächenbeschichtungen ist eine Selektivität für einzelne Gase erreichbar. Ein Nachteil dieser Sensoren ist allerdings das nichtlineare Verhalten, das eine aufwändige Kalibration an mehreren Punkten erfordert.

Eine deutliche Verbesserung haben hier Radislav Potyailo und sein Team bei General Electric in Niskayuna (USA) entwickelt. Bei dem in **Bild 2** gezeigten Chip läuft die Messung nicht mit Gleichstrom, sondern mit Wechselstrom. Die Impedanz des Sensorelements hängt stark von der Frequenz ab, sie zeigt einen oder mehrere Relaxationsvorgänge, die in der komplexen Ebene als Halbkreise erscheinen. Die Messfrequenz liegt je nach Halbleitertyp (p- oder n-leitend) entweder am oberen oder am unteren Ende eines solchen Relaxationsbereichs. Ausgewertet wird der Imaginärteil der komplexen Impedanz (Z''), der mit sehr guter Linearität mit der Gaskonzentration zusammenhängt. Auf diese Weise lässt sich ein über sechs Dekaden reichender Messbereich abdecken.

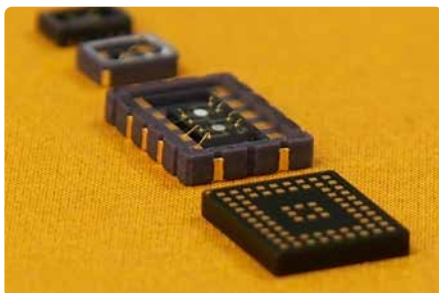


Bild 2. Hochlineare Metalloxid-Gassensoren für Betrieb mit Wechselstrom (Bild: General Electric).

Analyse komplexer Gasgemische

Um die Menge von durch Rohrleitungen strömenden Gasen zu erfassen, sind viele verschiedene Sensorprinzipien in Gebrauch. Die meisten davon sind nur auf ein bestimmtes Gas spezialisiert, bei anderen wird die Messung fehlerhaft. Probleme entstehen bei Gasgemischen mit schwankender Zusammensetzung. Ein Beispiel ist Erdgas, das je nach Gasfeld sehr unterschiedliche Anteile des Hauptbestandteils Methan enthalten kann, ein weiteres Biogas (je nachdem aus welchen Ausgangsstoffen es erzeugt wird). Bei Änderung der einzelnen Anteile zeigen die gängigen Sensoren häufig falsche Werte. Wenn solche Gasgemische industriell genutzt werden sollen - in Motoren, Heizungen oder chemischen Anlagen - muss ihre Zusammensetzung genau bekannt sein, damit die Vorgänge passend gesteuert werden können. Bei einer Verbrennung ist der Heizwert entscheidend, wichtig z.B. in Fällen, wo Prozesstemperaturen präzise eingehalten werden müssen. Man braucht Sensoren, die die Zusammensetzung des Gasgemischs beim Durchfluss durch ein Rohr (Masse pro Zeit) ermitteln. Wie sich zeigt, ist das mit einem einzelnen nicht zu schaffen. Es geht nur mit mehreren, die unterschiedliche physikalische Parameter messen und deren Signale dann in geeigneter Weise miteinander verrechnet werden. Auf diese Weise lässt sich jeder Gasart ein eindeutiger „Fingerabdruck“ zuordnen.

Die Neuentwicklung von Oleg Grudin, Entwicklungsleiter bei der Firma First Sensor in Berlin, vereint jetzt mehrere verschiedenartige Sensoren in einem gemeinsamen Gehäuse (**Bild 3**). Die erfassten Messgrößen sind Druck, Temperatur, Dichte, Viskosität und thermische Leitfähigkeit. Aus den primären Messsignalen der Einzelsensoren ermittelt die zugehörige Software die Anteile der einzelnen Gasarten, deren pro Zeiteinheit durchfließende Mengen (etwa kg/s) und weitere Größen wie - bei brennbaren Gasen - den Heizwert. Der Sensor arbeitet ohne mecha-

nisch bewegte Teile, hat eine kurze Ansprechzeit (20 ms) und kommt mit wenigen mW Betriebsleistung aus. Seine Anwendungsgebiete liegen bei industriellen Prozessen, der Erdgas- und Biogasgewinnung sowie auch in der Medizin (Anästhesiegase, Beatmung).

Cloudbasierter Sensor für Fermentations-Kontrolle

Bier brauen ist ein überaus komplexer Vorgang. Die Ausgangsstoffe unterliegen als landwirtschaftliche Produkte natürlichen Schwankungen, das Bier soll trotzdem immer gleich schmecken. Das erfordert eine präzise Regelung des Gärvorgangs, wozu diverse Parameter ständig zu überwachen sind. Bisher dienen dazu mehrere Einzelsensoren.

Tobias Brengartner bei Endress + Hauser SE+Co KG in Maulburg hat alle nötigen Sensoren zusammengefasst. Der InQGuard Brew QWX43 (**Bild 4**) ist ein Multisensorsystem, das mehrere verschiedene Sensorfunktionen in einem robusten Edelstahlgehäuse vereint und dadurch sehr praktisch in der Handhabung ist. Kernelement ist eine piezoelektrisch erregte Stimmgabel, deren Eigenfrequenz - hier um 1 kHz - durch die Dichte des umgebenden Mediums bestimmt wird; dessen Viskosität beeinflusst die Resonanzgüte. Weiterhin wird mit denselben Piezoelementen die Laufzeit von Ultraschallimpulsen (hier 4 MHz) gemessen, die ein Maß für die Kompressibilität der Flüssigkeit ist. Außerdem sind noch zwei Pt1000-Tempersensoren eingebaut. Die Roh-Messwerte werden an die E+H-Cloud gesendet; dort ermitteln spezielle Algorithmen daraus die für den Brauvorgang relevanten Größen wie den Gehalt an Alkohol, Zucker, Stammwürze, Feststoffen, den Fermentationsgrad und weitere.

Wer von den vier Nominierten letztlich das Preisgeld erhält oder ob es eventuell geteilt wird, erfährt die Öffentlichkeit am ersten Messtag der „Sensor + Test“, dem 4.5.2021 - in diesem Jahr notgedrungen wieder nur online. 

210260-02

Messtechniklösungen für die Entwicklung von Leistungselektronik

Ein Beitrag von Siglent Technologies

In den letzten Jahren hat die Bedeutung der Leistungselektronik stark zugenommen und dies wird auch so bleiben. Was sind die Gründe dafür? Ein Blick auf die aktuellen Trends zeigt, dass bei fast allen die Verfügbarkeit und die effiziente Nutzung von elektrischer Energie ein wichtiger Bestandteil ist. Angetrieben durch die globalen Herausforderungen, so wie Klimaerwärmung und Umweltverschmutzung, finden technische Themen wie erneuerbare Energie und alternative Antriebe große Beachtung. Darüber hinaus führt die immer weiter zunehmende Mobilität und die explodierende Anzahl von drahtlos kommunizierenden IoT-Knoten zu immer mehr batteriebetriebenen Endgeräten. Die Kriterien des magischen Quadrats der Entwicklung sind Effizienz, EMV-Konformität, Größe/Gewicht und Kosten.

Zur Bestimmung und Optimierung der Kenngrößen des magischen Quadrats ist der Einsatz von leistungsfähiger Messtechnik unverzichtbar. Zusätzlich verändern die neuen Technologien die Anforderungen an die Messtechnik. Beides führt zu einer stark wachsen-

den Nachfrage von Messtechnik zur Analyse von Konverter- bzw. Inverterschaltungen.

Die Minimalausstattung eines typischen Entwicklungsplatzes besteht aus einem Oszilloskop mit differentiellen Tastköpfen und einer Stromzange, einem Multimeter, einem Labornetzteil (AC oder DC) und einer elektronischen Last (AC oder DC). Ein Spektrum-Analysator mit Nahfeldsonden zur entwicklungsbegeleiteten Überprüfung der Abstrahlung sollte ebenfalls nicht fehlen. Siglent hat in den letzten Jahren sein Messtechnikangebot stark erweitert, so dass heute eine große Auswahl an Messgeräten für den Einsatz in der Leistungselektronik zur Verfügung steht.

Die Oszilloskope der SDS2000X Plus und der SDS5000X Serie bieten neben der sehr umfangreichen Standardkonfiguration viele weitere Optionen, die sie zu leistungsstarken und flexiblen Werkzeugen für alle allgemeinen Aufgaben im Labor machen. Mit einer Bandbreite von bis zu 500 MHz (SDS2000X plus) bzw. 1 GHz (SDS5000X) können alle Anwendungen im Bereich der



Bild 1. Um die Phasen- und Amplitudenreserve von rückgekoppelten Systemen zu messen, werden typischerweise Bode-Diagramme verwendet.



Bild 2. Die Lasten von Siglent (SDL1000X) sind für Eingangsspannungen bis zu 150 V ausgelegt.



Bild 3. Mit dem optionalen EMV-Messpaket sind die Spektrum-Analysatoren von Siglent bestens für entwicklungsbegleitende Abstrahlungsmessungen geeignet.

Leistungselektronik abgedeckt werden. Beide Serien haben eine Bode-Plot-Funktion integriert. Bode-Diagramme werden typischerweise verwendet, um die Phasen- und Amplitudenreserve von rückgekoppelten Systemen zu messen und um damit die Stabilität des Designs zu bestimmen (**Bild 1**). Beide Serien verfügen außerdem über eine Leistungsanalyse-Option. Die Option unterstützt den Entwickler durch die Automatisierung der Messungen, mit welchen alle üblichen Eigenschaften bestimmt werden. Zusammen mit dem Angebot an Siglent Stromzangen und Differenzspannungstastköpfen ist diese Option ein Muss für die Optimierung von SMPS-Designs.

Zur Analyse des Lastsprungverhaltens wird der Laststrom zwischen z.B. 10% und 90% des Maximalstroms sprunghaft geändert und parallel die Reaktion des Netzteils mit dem Oszilloskop aufgezeichnet. Diese Sprünge können sehr einfach mit elektronischen DC-Lasten hergestellt werden. Die Lasten von Siglent (SDL1000X) sind für Eingangsspannungen bzw. -ströme bis zu 150 V bzw. 30 A ausge-

legt und in einer 200-Watt- und einer 300-Watt-Version erhältlich (**Bild 2**). Die Lasten können ebenfalls im Rahmen von Batterietests eingesetzt werden und dort bei der Leistungsbestimmung helfen. Die Spektrum-Analysatoren von Siglent (SSA3000X plus) punkten mit einem starken Preis-Leistungsverhältnis und sind mit dem optionalen EMV-Messpaket bestens geeignet für entwicklungsbegleitende Abstrahlungsmessungen (**Bild 3**).

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass Siglent ein leistungsstarkes Angebot für den Bereich Leistungselektronik anbieten kann. Nach weniger als 20 Jahren seit der Gründung ist SIGLENT TECHNOLOGIES bereits heute ein weltweit führender Anbieter von elektronischer Test- und Messtechnik. Die Produkte verbinden innovative Features und Funktionalitäten mit dem Bekenntnis zu Qualität und Leistung. ◀

210258-01

Edge Impulse:

KI für Mikrocontroller



Ein intuitives SDK für Neuronale Netze

Von Andrea Garrapa

Das Interesse am Thema „Maschinelles Lernen“ ist in letzter Zeit extrem angewachsen. Heute gibt es viele Cloud-basierte Lösungen mit enormer Leistung. Wenn eine Anwendung aber begrenzte Netzverfügbarkeit aufweist, mit sensiblen Daten arbeitet oder eine geringe Latenzzeit erfordert, wäre es jedoch besser, alles lokal mit Mikrocontrollern zu realisieren. Ein Beispielprojekt rund um das Software-Entwicklungs-Kit Edge Impulse demonstriert, wie man Maschinelles Lernen auch auf kleinen, stromsparenden und preiswerten Mikrocontrollern möglich machen kann.

Der lokale Einsatz von für Maschinelles Lernen (ML) geeigneten Algorithmen [1], z.B. innerhalb einer Anlage in einem Industriekomplex, wird als „Edge Computing“ bezeichnet. Lokales ML bei Industrie-4.0- und IoT-Anwendungen stellt sicher, dass sensible Daten vor Ort bleiben und ML-basierte Entscheidungen sofort mit geringer Latenz ausgeführt werden. Das Training der entsprechenden Modelle erfordert viel Rechenleistung, doch die Ausführung kann auf kleinen, preiswerten Mikrocontrollern erfolgen. Dieser asymmetrische Ansatz für ML wird derzeit intensiv erforscht und hat zur Gründung der „tinyML Foundation“ [2] geführt. Es gibt drei Gründe für die Ausführung von ML-Modellen auf MCUs:

- **Lokale Verarbeitung:** Vermeidung der Übertragung von Sensor-Daten. Da keine Internetverbindung erforderlich ist, ergeben sich geringere Einsatzbeschränkungen.
- **Geringer Stromverbrauch:** Mikrocontroller verbrauchen sehr wenig

Energie. Bilderkennungsalgorithmen laufen auf Mikrocontrollern bis zu einem Jahr mit einer einzigen Knopfzelle.

- **Kosten und Einfachheit:** Mikrocontroller sind preiswert und leicht verfügbar – eine perfekte Basis für ML-Modelle. Für neue oder verbesserte Modelle reicht ein einfaches Software-Update, ohne dass Hardware ausgetauscht werden muss.

Obwohl tinyML ein relativ neues Forschungsgebiet ist, sind seine Anwendungen bereits zahllos und reichen von der Landwirtschaft über die Medizin bis hin zur vorausschauenden Wartung.

Edge Impulse

Edge Impulse, auch bekannt als „tinyML as a service“, stellt Entwicklern Maschinelles Lernen über ein Open-Source-SDK zur Verfügung. Es ermöglicht die einfache Datenerfassung von Sensoren, die Signalverarbeitung in Echtzeit sowie das Testen

und die Bereitstellung auf einem beliebigen Zielgerät. Mit dem SDK können Daten von einem beliebigen Gerät gesammelt oder auf diesem bereitgestellt werden.

Anwender können sowohl Algorithmen als auch Unterstützung für die Zielgeräte beitragen und erweitern. Die Gerätesoftware einschließlich SDK, Client und generiertem Code wird als Open-Source unter der Lizenz Apache 2.0 bereitgestellt. Die Kooperation mit dem Projekt „TensorFlow Lite Micro“ ermöglicht die Unterstützung für eine breite Palette von ML-Architekturen, Operatoren und Zielgeräten. Das SDK ist für einzelne Entwickler kostenlos. Außerdem ist eine Unternehmensversion für Teams per Abonnement erhältlich, welche tinyML in innovativen Produkten implementieren.

Nach der Erstellung eines Kontos und dem Einloggen [3] kann man mit dem intuitiv und einfach zu bedienenden SDK sofort ein erstes eigenes tinyML-Projekt starten. **Bild 1** zeigt die übersichtliche Benutzeroberfläche.

Nach dem Einloggen zeigt das *Dashboard* eine Übersicht über Projekte samt Informationen dazu. Außerdem steht eine Anleitung zur Verfügung, wie ein neues Projekt angelegt oder ein bestehendes fortgeführt wird. Weitere Optionen sind links beim Dashboard aufgeführt. Die Reihenfolge der Optionen spiegelt die Entwicklungsstufen wider, die zur Realisierung eines Projekts erforderlich sind. *Devices* listet beispielsweise angeschlossene Geräte auf und

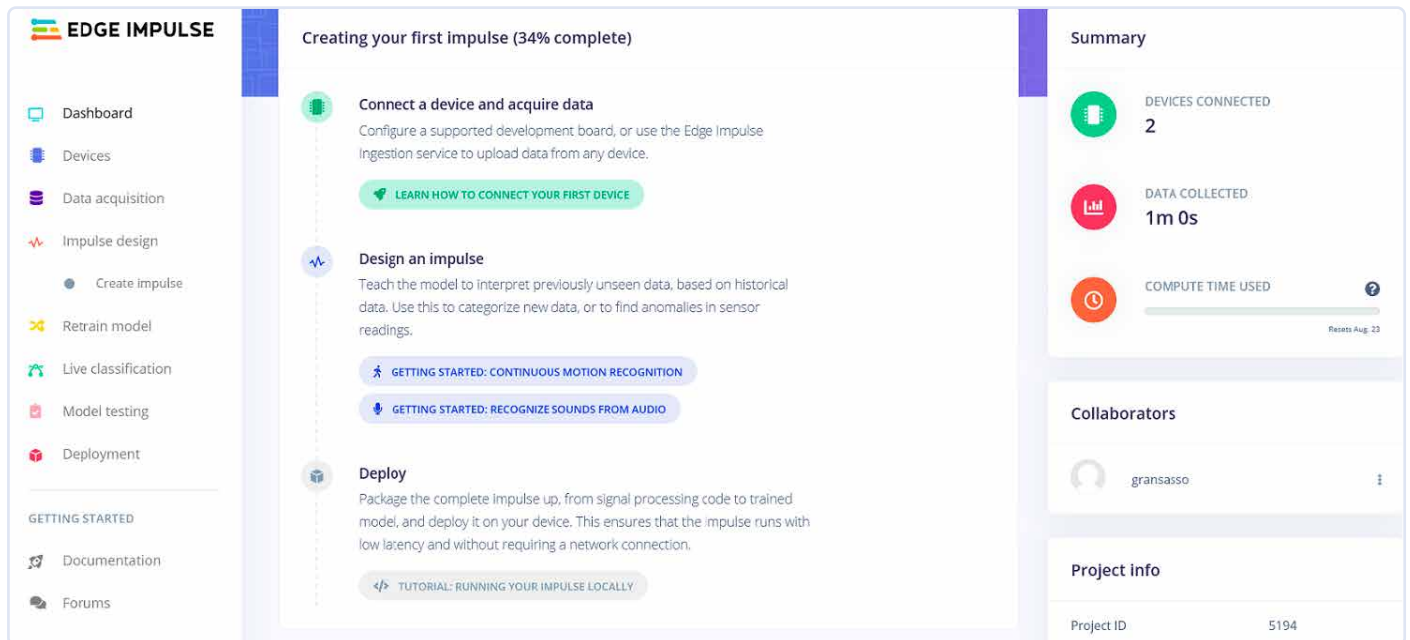


Bild 1. Dashboard von Edge Impulse.

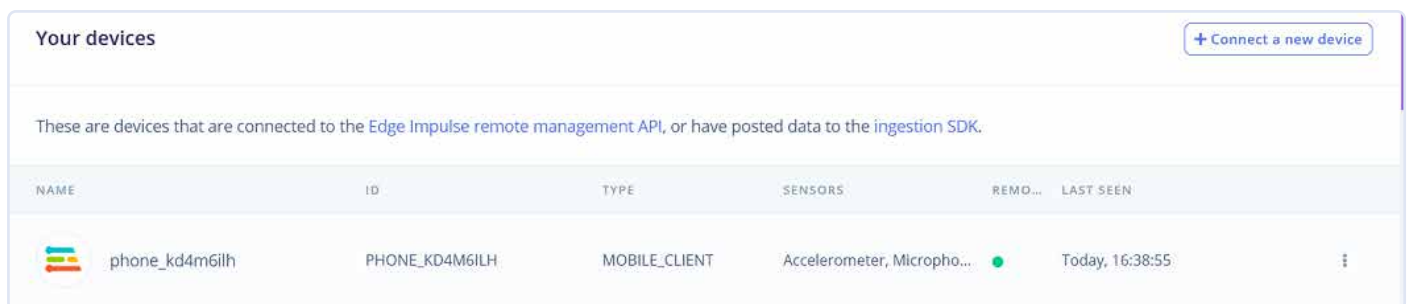


Bild 2. Die Schaltfläche Devices listet die angeschlossenen Geräte auf.

ermöglicht den Anschluss neuer Geräte. *Data acquisition* zeigt die zum Testen und Trainieren gesammelten Daten. *Impulse design* unterstützt das Erstellen eines sogenannten „Impulse“: einer Prozedur, die Rohdaten akzeptiert, Merkmale via Signalverarbeitung extrahiert und diese mit Hilfe eines Lernblocks klassifiziert. Um ein Embedded-Device anzuschließen, folgt man den Anweisungen im mittleren Abschnitt des Dashboards. Dieser Vorgang kann auch über *Devices* und einen Klick auf *Connect a new device* durchgeführt werden. Folgende Geräte werden unterstützt:

- **ST IoT Discovery Kit:** Das Entwicklungs-Board B-L475E-IOT01A verfügt über eine MCU mit einem Cortex-M4-Prozessor, MEMS-Bewegungssensoren, ein Mikrofon und WLAN.
- **Arduino Nano 33 BLESense:** Das kleine Entwicklungs-Board verfügt über eine Cortex-M4-basierte MCU, Bewegungssensoren, ein Mikrofon und BLE.
- **AI ECM3532 Eta Compute Sensor:** Dieses winzige Board beherbergt

den SoC ECM3532 von TENSAT (mit Cortex-M3-MCU) und einen separaten CoolFlux-DSP zur ML-Beschleunigung. Enthalten sind weiter zwei Mikrofone, ein 6-Achsen-Accelerometer/Gyroskop und ein Druck-/Temperatursensor. Der SoC unterstützt Continuous Voltage Frequency Scaling. Die damit mögliche Skalierung von Taktfrequenz und Spannung zur Laufzeit optimiert die Energieeffizienz für stromsparendes ML.

- **Smartphone:** Ist ein moderner Browser verfügbar, werden auch Smartphone-Clients vollständig unterstützt. Das Smartphone verhält sich wie andere Geräte auch und alle erstellten Daten und Modelle können auf Embedded-Devices bereitgestellt werden.

Alle gelisteten Geräte erlauben die Erfassung von Rohdaten, Erstellung von Modellen und die Bereitstellung trainierter ML-Modelle. Wenn ein oder mehrere Geräte angeschlossen sind, werden diese in der Tabelle *Devices* aufgelistet (Bild 2). Mit Edge Impulse verbundene Geräte können mit einem Modell versehen werden, das

auch historische Daten interpretiert. Die Geräte eignen sich auch zur Klassifikation neuer Daten oder zur Detektion von Anomalien in Sensor-Daten.

Im *Dashboard* werden zwei Tutorials angeboten: eines für Audio und eines für die Gestenerkennung. Das Audio-Tutorial wird nachfolgend beleuchtet.

Geräuscherkennung

In diesem Tutorial geht es um ein ML-System, das erkennen kann, wann ein bestimmtes Geräusch auftritt. Diese Funktion ist auch als Audio-Klassifikation bekannt. Das entwickelte System wird in der Lage sein, das Geräusch von fließendem Wasser aus einem Wasserhahn zu erkennen, auch wenn Hintergrundgeräusche vorhanden sind. Es wird gezeigt, wie Audio-daten von Mikrofonen erfasst und daraus per Signalverarbeitung die wichtigsten Informationen extrahiert werden. Weiter wird ein sogenanntes tiefes neuronales Netzwerk (DNN) trainiert, um nach dem Geräusch fließenden Wassers in einem Audio-Clip zu suchen. Schließlich wird das Modell auf einem Embedded-Gerät eingesetzt, um seine Funktion zu bewerten.

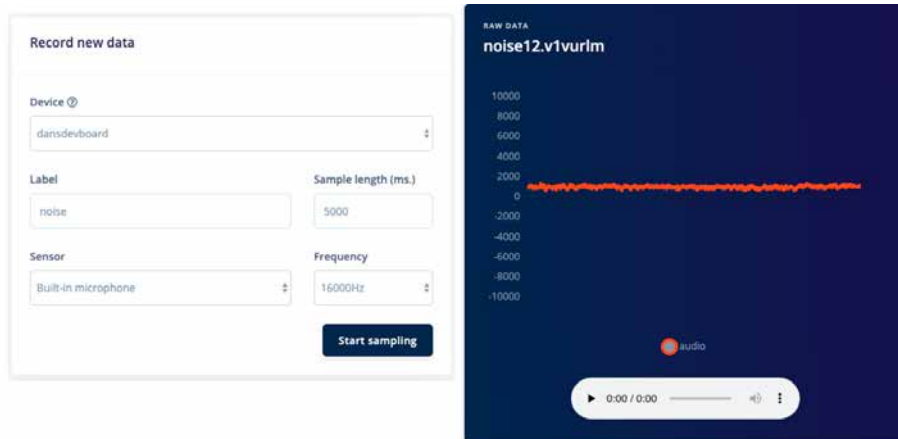


Bild 3. Aufnahme und Wiedergabe von Audiodaten unter Data acquisition.

Collected data			
			Upload data
SAMPLE NAME	LABEL	ADDED	LENGTH

Bild 4. Hochladen vordefinierter Datensätze unter Data acquisition.

Datenerfassung

Zunächst werden Audiodaten zum Training des ML-Modells gesammelt. Das Ziel ist die Erkennung des Geräusches von fließendem Wasser aus einem offenen Wasserhahn. Neben geeigneten Clips werden auch Beispiele für typische Hintergrundgeräusche benötigt, die nicht das Geräusch des Wasserhahns enthalten, um zwischen beiden unterscheiden zu können. Die beiden Geräuscharten repräsentieren die beiden Klassen im Modell: „Hintergrundgeräusch“ oder das „Geräusch fließenden Wassers“. Die Sensordaten können vom Gerät via Data acquisition im SDK erfasst werden. Wenn das Gerät mit der Remote

Management API verbunden ist, werden alle Rohdaten gespeichert und es kann die Erfassung neuer Daten gestartet werden. Zuerst werden Hintergrundgeräusche ohne das Geräusch des offenen Wasserhahns aufgezeichnet. Bei Record new data wird das Gerät ausgewählt und das Label auf „noise“ gesetzt. Als sample length eignet sich der Wert 1000 und als Sensor dient das eingebaute Mikrofon. Mit diesen Einstellungen wird eine Sekunde Audio aufgenommen und die Aufnahme dann als Rauschen (noise) gekennzeichnet. Die Beschriftungen können später bei Bedarf bearbeitet werden. Nach dem Klick auf Start sampling zeichnet das Gerät 1 s Audio auf

und überträgt dies an Edge Impulse. Sobald die Daten geladen sind, erscheint eine neue Zeile unter Collected data. Im Abschnitt Raw Data lässt sich die aufgezeichnete Signalkurve analysieren und die Aufzeichnung mit den entsprechenden Bedienelementen anhören (Bild 3).

Datensatz erstellen

Jetzt kann man einen Datensatz erstellen. Für dieses einfache Audio-Klassifikationsmodell sollten etwa zehn Minuten Daten ausreichen. Da zwei Klassen definiert wurden, sollten die Daten idealerweise gleichmäßig auf beide Klassen verteilt sein:

- 5 min Hintergrundgeräusche, beschriftet mit „noise“.
- 5 min Geräusch des geöffneten Wasserhahns, beschriftet mit „faucet“.

In der realen Welt gibt es in der Regel Geräusche, die den eigentlichen Geräuschen überlagert sind. Zum Beispiel wird ein offener Wasserhahn oft von dem Geräusch des Geschirrspülers oder einer Unterhaltung in der Küche „gestört“. Hintergrundgeräusche können auch von einem Fernseher, spielenden Kindern oder vorbeifahrenden Autos kommen. Die Trainingsdaten müssen diese Geräusche der realen Welt enthalten. Wenn das Modell nicht während des Trainings damit konfrontiert wird, lernt es nicht, sie zu berücksichtigen und wird nicht wirklich gut funktionieren. Eine gute Aufteilung wäre etwa:

Bild 5. Einen „Impulse“ erstellen.

- Hintergrundgeräusche:
 - 2 min ohne viel zusätzliche Aktivität.
 - 1 min mit TV- oder Musikwiedergabe.
 - 1 min mit gelegentlicher Sprache oder Konversation.
 - 1 min mit Geräuschen von Haus-haltsarbeiten.
- Geräusch eines offenen Wasserhahns:
 - 1 min offener Wasserhahn.
 - 1 min ein anderer offener Wasserhahn.
 - 1 min ein offener Wasserhahn, während ein Fernseher oder Musik läuft.
 - 1 min offener Wasserhahn mit beiläufigem Geplauder oder Gespräch.
 - 1 min eines laufenden Wasserhahns mit Geräuschen von Haus-haltsarbeiten.

Wenn es nicht möglich ist, diese Vielfalt an Sound-Schnipseln aufzunehmen, ist das kein großes Problem. Man sollte einfach fünf Minuten an realen Daten für jede Klasse haben, da das resultierende Modell besser funktioniert, wenn es mit repräsentativen Daten trainiert wurde. Es gibt aber keine Garantie dafür, dass das Modell auch bei Geräuschen gut funktioniert, die nicht im Trainingssatz enthalten waren. Deshalb ist es wichtig, den Datensatz so vielfältig und repräsentativ wie möglich unter realen Bedingungen zu gestalten. Alternativ können vorgefertigte Datensätze heruntergeladen werden, die etwa zehn Minuten an Daten der benötigten Klassen enthalten [4]. Nach dem Herunterladen des Datensatzes entpackt man die Datei und klickt auf das in **Bild 4** sichtbare Icon *Upload data*. Dann wählt man die Dateien aus und beschriftet sie gleich passend.

Die Menge nutzbarer Audiodaten variiert mit dem Speicher der Hardware. Das Board B-L475E-IOT01A hat genug Speicher, um 60 s Audio auf einmal aufzunehmen. Ein Arduino Nano 33 BLE Sense hingegen hat nur genug Speicher für 16 s. Zur Aufzeichnung von 60 s Audio muss der Sample-Wert auf 60.000 eingestellt werden. Da das Board die Daten recht langsam überträgt, dauert es gut 7 Minuten, bis ein 60-s-Sample in Edge Impulse angezeigt wird. Nachdem Sie die benötigten zehn Minuten Daten erfasst sind, kann mit der Gestaltung eines „Impulse“ begonnen werden.

Einen „Impulse“ konzipieren

Ein Impulse zerlegt die Rohdaten in kleinere Fenster und verwendet dann:

- Signalverarbeitung, um Merkmale zu extrahieren.
- Lernen, um neue Daten zu klassifizieren.

Signalverarbeitungsblöcke geben immer die gleichen Werte für die gleiche Eingabe zurück und vereinfachen die Verarbeitung von Rohdaten. Lernblöcke lernen aus vergangenen Erfahrungen. Bei diesem Tutorial wird der Signalverarbeitungsblock MFCC verwendet. MFCC ist ein Akronym von Mel-Frequency Cepstral Coefficients [5]. Das hört sich schräg an, ist aber im Grunde nur eine Möglichkeit, unbearbeitetes Audiomaterial mit vielen redundanten Informationen in eine vereinfachte Form zu bringen. Die vereinfachten Audiodaten werden dann an ein Neuronales Netz (Lernblock) übergeben. Dieser lernt, zwischen den beiden Audio-klassen (Wasser und Rauschen) zu unterscheiden. Er wird mit *Create Impulse* konfiguriert. Beim Öffnen dieses Bereichs sieht man zuerst *Raw Data*.

Wie schon erwähnt, teilt Edge Impulse die Rohsamples in Fenster auf, die während des Trainings in das ML-Modell einfließen. Das Feld *Window size* enthält die Länge der Datenfenster in ms. Ein Audio-Sample mit 1 s reicht zur Entscheidung aus, ob ein Wasserhahn geöffnet ist oder nicht. *Window size* muss also auf 1000 ms eingestellt sein. Jedes Rohsample wird in mehrere Fenster aufgeteilt, und das Feld *Window increase* steuert den Versatz jedes nachfolgenden Fensters zum vorhergehenden. Zum Beispiel würde ein *Window increase* von 1000 ms dazu führen, dass jedes Fenster eine Sekunde nach dem Start des vorherigen Fensters beginnt.

Wird *Window increase* niedriger als *Window size* eingestellt, ergeben sich überlappende Fenster. Eine gute Idee: Obwohl sie ähnliche Daten enthalten, ist jedes überlappende Fenster trotzdem ein einzigartiges, repräsentatives Audiobeispiel. Mit überlappenden Fenstern kann man das Beste aus den Trainingsdaten herausholen. Mit einer Fenstergröße von 1000 ms und einem Inkrement von 100 ms lassen sich zehn einzigartige Fenster aus nur zwei Sekunden Daten generieren. Für dieses Beispiel wird ein *Window size* von 1000 und ein *Window increase* von 300 eingestellt. Mit einem Klick auf *Add a processing block* wird ein MFCC-Block ausgewählt. Ein Klick auf *Add a learning block* dient zur Auswahl des Blocks *Neural Network (Keras)*. Zum Schluss folgt ein Klick auf *Save impulse*. Der erstellte Impulse sollte dem von **Bild 5** entsprechen.

You CAN get it...

Hardware und Software für CAN-Bus-Anwendungen...



NEU

PCAN-MicroMod FD Grundplatten

Konfigurierbare I/O-Module mit CAN-FD-Interface. In verschiedenen Versionen für analoge oder digitale I/O-Anwendungen erhältlich.

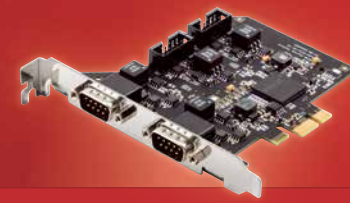
ab 275 €



PCAN-Router FD

Frei programmierbarer Router für CAN und CAN FD mit 2 Kanälen. Erhältlich mit D-Sub- oder Phoenix-Anschlusssteckern inklusive Entwicklungspaket.

250 €



PCAN-PCI Express FD

CAN-FD-Interface für PCI Express-Steckplätze mit Datenübertragungsraten bis 12 Mbit/s. Lieferung inklusive Monitor-Software und APIs.

ab 240 €

Alle Preise verstehen sich zzgl. MwSt., Porto und Verpackung. Irrtümer und technische Änderungen vorbehalten.

www.peak-system.com



Otto-Röhm-Str. 69
64293 Darmstadt
Germany
Tel.: +49 6151 8173-20
Fax: +49 6151 8173-29
info@peak-system.com

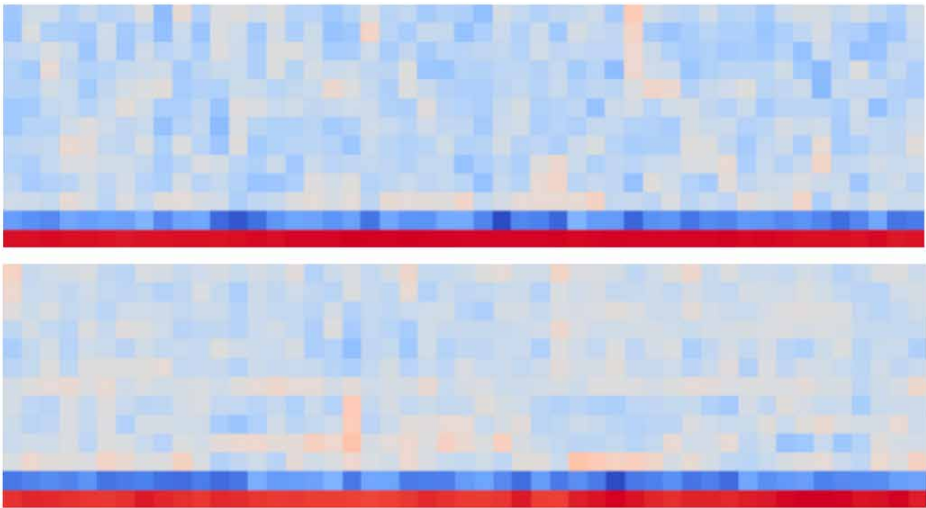


Bild 6. Vergleich der Spektren von Rauschen (oben) und Wassergeräusch (unten).

MFCC-Konfiguration

Nachdem der Impulse erstellt ist, kann man jeden einzelnen Teil konfigurieren. Ein Klick im linken Navigationsmenü auf MFCC führt auf die Konfigurationsseite. Dort zeigt eine Vorschau, wie die Daten transformiert werden sollen. Auf der rechten Seite ist eine Visualisierung der MFCC-Ausgabe einer Audiospur zu sehen: ein sogenanntes Spektrogramm. Der MFCC-Block verwandelt ein Audiofenster in eine Tabelle, in der die Zeilen die Frequenzbereichen und die Spalten die Zeitspannen enthalten. Die in den Zellen enthaltenen Werte enthalten die Amplitude im zugehörigen Frequenzbereich während der jeweili-

Last training performance

%

ACCURACY

83.5%

📈

LOSS

0,35

📊

CLASSES

2

Confusion matrix

	FAUCET	NOISE
faucet	156	36
noise	29	173

On-device performance

INFERRING TIME

16 ms.

🕒

PEAK MEMORY USAGE

13,1K

📊

MODEL BINARY SIZE

10,7K

📄

Available optimization types: ?

Quantized (int8) ▾

Bild 7. Leistung des Netzwerks nach dem Training.

Test data

Set the 'expected outcome' for each sample to the desired outcome to automatically score the impulse.

Classify selected (3)

ACCURACY

73.42%

%

☒	SAMPLE NAME	EXPECTE...	ADDED	LENGTH	ACC...	RESULT
☒	noise.12uvcljru.cb...	noise	Today, 11:25:38	1m 0s	67%	132 noise, 45 uncertain, 20 fau...
☒	noise.15v23ir0c.cb...	noise	Today, 11:24:40	1s	0%	1 faucet
☒	faucet.1v1m71av.c...	faucet	Today, 11:24:09	1m 0s	80%	158 faucet, 25 uncertain, 14 no...

Bild 8. Ergebnisse der Klassifizierung der Testdaten.

gen Zeitspanne. Das Spektrogramm zeichnet jede Zelle als farbigen Block, wobei die jeweilige Farbe die jeweilige Amplitude indiziert. **Bild 6** zeigt die Spektren von Rauschen (oben) und Wasser (unten).

Die Unterschiede sind für Menschen schwer zu erkennen. Ihre Unterschiede reichen aber dazu aus, dass sie von einem Neuronalen Netz unterschieden werden können. Es gibt viele Möglichkeiten, den MFCC-Block im Feld *Parameters* zu konfigurieren. Edge Impulse bietet vernünftige Standardwerte, die für viele Anwendungsfälle ausreichen – auch für dieses Beispiel. Die vom MFCC-Block erzeugten Spektrogramme werden an ein Neuronales Netz übergeben, das sehr gut Muster in solchen Tabellendaten erkennen kann.

Bevor aber das Neuronale Netz trainiert wird, müssen MFCC-Blöcke für alle Audiofenster erzeugt werden. Hierzu folgt ein Klick auf *Generate feature* oben. Bei den zehn Minuten an Trainingsdaten wird dieser Vorgang einige Minuten dauern. Sobald dieser Prozess abgeschlossen ist, wird im *Features explorer* eine Visualisierung des Datensatzes angezeigt. Dabei werden mit einer sogenannten Dimensionalitätsreduktion die Features auf einen 3D-Raum abgebildet. Hier kann man überprüfen, ob die verschiedenen Klassen gut getrennt sind oder nach falsch beschrifteten Daten fahnden.

Konfiguration des Neuronalen Netzes

Neuronale Netze sind Algorithmen, die entfernt dem menschlichen Gehirn nachempfunden sind. Sie lernen Muster in Trainingsdaten zu erkennen. Das hier trainierte Netzwerk bezieht seine Daten von MFCC und versucht, sie einer von zwei Klassen zuzuordnen: Rauschen oder Wasser. Wenn Sie im linken Menü auf *NN Classifier* klicken, öffnet sich das Konfigurationsfenster. Ein Neuronales Netz besteht aus Schichten von virtuellen Neuronen, wie links dargestellt. Die Eingabe bzw. das MFCC-Spektrogramm wird in die erste Schicht von Neuronen eingespeist, die es basierend auf dem speziellen internen Zustand jedes Neurons filtert und transformiert. Die Ausgabe der ersten Schicht wird dann in die zweite Schicht eingespeist und so weiter, wodurch die ursprüngliche Eingabe schrittweise in etwas radikal Anderes gewandelt wird. In diesem Fall wird das Spektrogramm über vier Zwischenschichten in nur zwei Zahlen

umgewandelt: die Wahrscheinlichkeit, dass es Rauschen enthält, sowie die Wahrscheinlichkeit, dass es das Geräusch eines laufenden Wasserhahns enthält.

Während des Trainings wird der interne Zustand der Neuronen allmählich optimiert und verfeinert, so dass das Netz seine Eingabe auf die richtige Weise transformiert und die richtige Zuordnung trifft. Dies geschieht durch die Trainingsdaten, die Überprüfung des Unterschieds zwischen der Netzwerkausgabe und der korrekten Antwort (seiner Beschriftung) und der Anpassung des internen Zustands der Neuronen. Mit den Durchgängen steigt die Wahrscheinlichkeit, dass beim nächsten Mal die richtige Antwort erfolgt. Nach tausenden Durchgängen erhält man schließlich ein trainiertes Neuronales Netz. Eine bestimmte Anordnung von Schichten wird als Architektur bezeichnet – verschiedene Architekturen eignen sich für verschiedene Aufgaben. Die bereitgestellte Standardarchitektur funktioniert gut für das aktuelle Projekt, aber es lassen sich auch eigene Architekturen definieren. Vor dem Training sollten einige Werte in der Konfiguration geändert werden. Die *Number of training cycles* wird auf 300 gesetzt. Der gesamte Trainingsdatensatz wird also 300 Mal durch das Neuronale Netz laufen. Bei zu wenigen Zyklen lernt das Netz nicht alles, was aus den Trainingsdaten extrahiert werden kann. Bei zu vielen Zyklen allerdings kann das Netz zu stark an die Trainingsdaten angepasst sein und bei neuen Daten dann vielleicht nicht mehr gut funktionieren. Dieses Problem ist als „Overfitting“ bekannt.

Als Nächstes muss der Wert für *Minimum confidence rating* auf 0,7 eingestellt werden. Wenn nun das neuronale Netzwerk die Wahrscheinlichkeit einschätzt, dass ein Audiosample das Geräusch fließenden Wassers enthält, wird Edge Impulse dies bei einem Wert von unter 0,7 ignorieren – bei einer erzielten Wahrscheinlichkeit von z.B. 0,8 ist alles gut. Mit einem Klick auf *Start training* geht es los und man hat paar Minuten Pause. Nach Abschluss des Trainings zeigt sich unten auf der Seite die *Last training performance* (**Bild 7**).

Das Neuronale Netz in Edge Impulse ist jetzt vollständig trainiert. Doch was bedeuten all diese Zahlen? Zu Beginn des Trainings werden 20 % der Daten für die Validierung reserviert. Sie werden folglich nicht zum Trainieren, sondern zum Bewerten der Modellleistung verwendet. Das Panel *Last*

SIGLENT®

**Das Beste
Preis-Leistungs-Verhältnis
in der Messtechnik**

Schneller zur Marktreife dank
innovativer Messtechnik



- Oszilloskope 50MHz → 1GHz
- Signal Generatoren 10MHz → 500MHz
- Labornetzteile → 200W
- Elektronische Lasten 200 → 300W
- Multimeter 4½ → 6½ Stellen

**Siglent HF-Messgeräte: Helfer
bei der Entwicklung fehlerfreier
und zuverlässiger Kommunikation**



Spektrum- und Vektornetzwerkanalysator

- EMI-Pre-Compliance
- Modulationsanalyse
- Distance-to-Fault Analyse

HF-Signalquellen

- mit/ohne IQ-Modulation

Siglent Technologies Germany GmbH
www.siglenteu.com
Info-eu@siglent.com

training performance zeigt die Ergebnisse dieser Validierung und liefert einige Informationen über das Modell und seine Funktionsweise. Die Zahlen können von denen in diesem Tutorial abweichen. Der Parameter *Accuracy* bezieht sich auf den Prozentsatz der Audiofenster, die korrekt klassifiziert wurden. Je höher die Zahl, desto besser. Eine Genauigkeit von fast 100 % ist eher unwahrscheinlich und oft ein Zeichen von Overfitting. Vielfach kann eine Genauigkeit von mehr als 80 % als sehr gut angesehen werden. Eine Konfusionsmatrix [6] ist eine Tabelle, die das Verhältnis zwischen richtig und falsch klassifizierten Fenstern zeigt.

Neue Daten klassifizieren

Die Leistungszahlen des vorherigen Schritts zeigen, dass das Modell mit seinen Trainingsdaten gut funktioniert. Es ist aber wichtig, das Modell vor dem Einsatz auch mit neuen Daten zu testen. So kann man prüfen, ob das Modell nicht durch Overfitting beeinträchtigt ist. Edge Impulse bietet einige nützliche Tools zum Testen des Modells, einschließlich der Erfassung von Echtzeitdaten vom Gerät und deren sofortiger Klassifikation. Zum Test klickt man im linken Menü auf *Live classification*. Das Gerät sollte jetzt bei *Classify new data* erscheinen. Ein Klick auf *Start sampling* erfasst fünf Sekunden Hintergrundgeräusch.

Testen des Modells

Mit *Live classification* lässt sich das Modell schnell testen und sein Verhalten beurteilen. Um sich über seine Leistung sicher zu sein, muss man aber gründlichere Tests durchführen. Hier kommt die Schaltfläche *Model testing* ins Spiel. Ideal wäre ein Datensatz, der mindestens 25 % des Umfangs der Trainingsdaten enthält. Bei den zehn Minuten Trainingsdaten sind also mindestens 150 s an Testdaten notwendig. Diese Testdaten sollten natürlich einen breiten Bereich möglicher Bedingungen repräsentieren, um so die Leistung des Modells in vielen Szenarien zu bewerten.

Eine gute Idee ist das Sammeln von Testdaten mehrerer Wasserhähne. Hierzu nutzt man wieder die Schaltfläche *Data Acquisition*. Einem Klick darauf folgt ein Klick auf *Test data* oben. Mit einem Klick auf *Upload* werden die Testdaten hochgeladen. Die Datensätze sollten adäquat beschriftet sein. Wenn Sie fertig sind, geht es weiter mit *Model testing*.

Wählen Sie die Datensätze aus und klicken auf *Classify selected*.

Bild 8 zeigt das Ergebnis der Klassifizierung. Das Modell hat hier mit einer Genauigkeit von 73,42 % gearbeitet. Für jedes Testmuster wird die individuelle Leistung angezeigt. Eine der Proben wurde hier mit einer Genauigkeit von nur 67 % klassifiziert. Samples mit vielen Fehlklassifizierungen sind wertvoll, da sie Beispiele enthalten, auf die das Modell derzeit nicht passt. Es lohnt sich oft, diese zu den Trainingsdaten hinzu zu fügen.

Installation auf Hardware

Nachdem der Impulse designt, trainiert und verifiziert wurde, ist die Übertragung des Modells auf externe Hardware möglich. Dadurch läuft das Modell ohne Internetverbindung mit minimaler Latenz und arbeitet mit geringem Energieverbrauch. Edge Impulse kann den gesamten „Impulse“ inklusive MFCC-Algorithmus, Gewichten des Neuronalen Netzes und den Klassifizierungscodes in eine einzige C++-Bibliothek packen, die in die Embedded-Software eingebunden werden kann. Zum Export des Modells klickt man im Menü auf *Deployment*. Unter *Build firmware* wird die richtige Entwicklungs-Schaltfläche ausgewählt und dann auf *Build* geklickt. Jetzt wird der Impuls exportiert und eine Binärdatei erstellt, die direkt auf dem Ziel-Board ausgeführt werden kann. Nach Abschluss wird man aufgefordert, eine Binärdatei herunterzuladen. Legen Sie diese einfach passend auf Ihrem PC ab. Ein Klick auf Schaltfläche *Build* führt zu einem Popup-Fenster mit Text- und Video-Tutori-



als, die bei der Installation der Binärdatei auf dem ausgewählten Gerät helfen. Folgt man diesen Anweisungen, kann man das Modell anschließend testen. Außerdem kann man über eine serielle Schnittstelle zur gerade geflashten Firmware Verbindung aufnehmen. Hierzu öffnet man ein Terminal-Programm und gibt ein:

```
$ edge-impulse-run-impulse
```

Jetzt werden Daten via Mikrofon erfasst, der MFCC-Code ausgeführt und dann das resultierende Spektrogramm klassifiziert.

Fazit

Als junges Forschungsgebiet wirkt ML auf Mikrocontrollern für Anfänger kompliziert. Das SDK Edge Impulse erleichtert den Einstieg, indem es die Erfassung und Analyse von Daten sowie das Training und die Erstellung von Neuronalen Netzwerken für Mikrocontroller vereinfacht. Es gibt endlose Anwendungen für diese Art von Modellen, von der Überwachung von Industriemaschinen bis hin zur Erkennung von Sprachbefehlen. Edge Impulse ist einfach zu bedienen, intuitiv und kostenlos. Mit ihm können Sie sofort mit der Erforschung von tinyML für Embedded-Anwendungen beginnen.

Dieser Artikel wurde zuerst auf Italienisch von Elettronica Open Source (<https://it.emcelettronica.com>) veröffentlicht. Elektor hat ihn mit Genehmigung übersetzt.

210259-02

WEBLINKS

- [1] „What is Machine Learning? A Definition“, Expert.ai, Mai 2020: <https://bit.ly/3tfuyQL>
- [2] tinyML Foundation: <https://www.tinyml.org/>
- [3] Website von Edge Impulse: <https://www.edgeimpulse.com/>
- [4] Datensatz von Wasserhahngeräuschen: <https://cdn.edgeimpulse.com/datasets/faucet.zip>
- [5] „Mel Frequency Cepstral Coefficients“, Wikipedia: https://de.wikipedia.org/wiki/Mel_Frequency_Cepstral_Coefficients
- [6] „Simple guide to confusion matrix terminology“, data school, März 2014: <https://bit.ly/32eaoup>

Die technische Evolution der Sensoren

Vielfältige Sensoren für vielfältige Anwendungen

Von Daniele Valanzuolo

Bei der Entwicklung neuer Sensoren spielte früher vor allem der Erfindungsreichtum bei der Verbesserung bestehender, mechanischer Messverfahren eine wichtige Rolle. In den letzten zwei Jahrzehnten haben sich die Sensorhersteller jedoch zunehmend neue Prinzipien zu Nutze gemacht. Das Ergebnis sind hochintegrierte, preiswerte Sensoren für drahtgebundene und drahtlose Anwendungen.

Die Entwicklung neuer Sensoren, die den sich schnell ändernden Marktanforderungen gerecht werden müssen, ist eine spannende, manchmal auch schwierige Herausforderung. Der Siegeszug der Wearables und Smartphones hat winzige Sensoren mit zunehmender Genauigkeit und geringer Stromaufnahme hervorgebracht. Solche Sensoren unterstützen auch die Digitalisierung in anderen Bereichen, wie zum Beispiel dem Internet der Dinge (IoT). Sicherere Fahrzeuge und autonomes Fahren dagegen erfordern verbesserte Radar- und Lidar-Technologien. Verbesserte Sensoren im medizinischen Bereich wiederum haben durch die Erfassung und Analyse von Patientendaten das Gesundheitswesen vorangebracht. Viele dieser Sensoren werden zunehmend in Wireless Sensor Networks (WSN) integriert.

Zu Beginn des vergangenen Jahrzehnts wurde viel über Mikro-Elektro-Mechanische Systeme (MEMS) diskutiert, eine ehrgeizige Technologie, die das Beste aus Chipdesign und Mikromechanik vereinen sollte. Eine ganz neue Miniaturwelt sollte erfunden und für fortschrittliche Experimente erschlossen werden. Jetzt, nach einem Jahrzehnt, ist das, was einmal innovativ erschien, alltäglich geworden.

Die MEMS-Technologie ist zum Beispiel in Form von Trägheitssensoren und Dehnungsmessern heutzutage nicht nur in Smartphones und Maschinen der Industrie, sondern auch in vielen Geräten des täglichen Gebrauchs zu finden.

Luft nach oben im MEMS-Bereich

Obwohl die MEMS-Sensor-Technologie einen Aufschwung erlebt hat, ist sie noch lange nicht am Ende ihrer Möglichkeiten angelangt. Ein Grund für die anhaltende Beliebtheit und den weiteren Einsatz ist die Zuverlässigkeit und die Fähigkeit, sich an jede Anforderung anzupassen. Kontinuierliche Innovationen haben zu einer Verringerung der Größe und der Kosten geführt, aber es liegt noch ein langer Weg vor uns. Die Konsolidierung, die bei dieser Technologie erreicht wurde, wird innerhalb der nächsten zehn Jahre zu einer breit gefächerten Verwendung in zukünftigen Geräten führen. Im Moment bleibt sie jedoch eine der Kerntechnologien, in die viele Unternehmen ernsthafte technische und wirtschaftliche Ressourcen investieren.

STMicroelectronics hat im Jahre 2019 mit dem LPS33HW die Entwicklung von wasserfesten MEMS-Drucksensoren angekündigt, die über eine hohe Stabilität und Genauigkeit verfügen und eine Verträglichkeit gegenüber den in Industrieanlagen verwendeten Chemikalien aufweisen. Es bleiben jedoch noch eine Menge Herausforderungen, die es auf diesem Sektor zu lösen gilt. Dazu gehören die Optimierung der Fertigungstechnologien, die Entwicklung neuer, zunehmend integrierter Sensoren, die Lösung von Kalibrierungsproblemen und der Energieverbrauch, um nur einige zu nennen. Es ist daher kein Zufall, dass Innovationen bei MEMS-Sensoren nach wie vor in den allgemeinen Markttrend-Charts der großen Hersteller und Distributoren elektronischer Komponenten enthalten sind. Das gilt speziell auch für den Consumer- und Automotive-Bereich.



Von Mikro nach Nano

Wenn in der Mikro-Ebene schon fast alles erreicht zu sein scheint, warum dann nicht noch einen Schritt weiter auf die Nano-Ebene gehen? Neue Forschungen untersuchen ganz spezielle Materialien im Nanobereich, um die Herausforderungen der extremen Miniaturisierung zu lösen. Das versprochene Ziel sind Sensoren mit größerer Empfindlichkeit, Selektivität des Messbereichs und Stabilität. Eine von vielen möglichen Anwendungen erfolgt zum Beispiel in der Medizin durch den Einsatz von Nano-FET-Sensoren. Diese nanometrischen Sensoren können in Zellen integriert werden und ermöglichen so eine Messung des inneren Zustands einer lebenden Zelle an einem genau bestimmbar Ort. Mit einer nahezu eindimensionalen Halbleiter-Nanostruktur nutzen sie die Empfindlichkeit gegenüber elektrischen Feldern, um die Ladungen von Molekülen zu detektieren.

Neben den Nano-FETs umfasst der Bereich der Nanomaterialien alle Objekte, die kleiner als 100 Nanometer sind. Im Vergleich zu herkömmlichen Sensoren zeichnen sich Nanomaterialien durch ein höheres Oberflächen-Volumenverhältnis aus. Sie versprechen verbesserte optische, mechanische, elektrische, strukturelle und magnetische Eigenschaften. Eine Reihe von Anwendungen könnte potenziell von diesen Technologien profitieren, wie folgende Aufzählung zeigt:

- Erkennung der chemischen Zusammensetzung von Gasen. Dies hilft, die Qualität von Produkten zu verbessern, die in chemischen Prozessen verwendet werden, um die Qualitätsstandards zu erfüllen oder eine Überwachung der Verunreinigung durchzuführen.
- Verbesserte Erkennung von physikalischen Standardparametern auf lokaler Ebene, wie z. B. Temperatur, Durchfluss und Druck.
- Botanik-Bereich: Überwachung der Umwelt in landwirtschaftlichen Anwendungen.

Faseroptik

Faseroptische Sensoren haben im letzten Jahrzehnt stark an Bedeutung gewonnen. Solche Sensoren bieten einzigartige Eigenschaften wie geometrische Vielseitigkeit, hohe Empfindlichkeit, Immunität gegen elektrisches Rauschen, elektrische Isolierung und Temperaturextreme. Darüber hinaus sind sie sehr gut für den Einsatz in Umgebungen geeignet, in denen korrosive oder stressauslösende Mittel vorhanden sind. Im Allgemeinen fallen diese Sensoren in zwei Hauptkategorien: Amplitudensensoren und Interferometer (Phasensensoren).

Amplitudensensoren reagieren auf physikalische Veränderungen, denen die Faser ausgesetzt ist, was zu einer Beeinflussung der Lichtintensität in der Faser oder in daran angeschlossenen Geräten führt. Die Einfachheit dieser Messtechnik macht sie trotz ihrer geringen Kosten sehr geeignet für den Einsatz unter schwierigen Umgebungsbedingungen. Interferometer hingegen sind auf hohe Präzision angewiesen und können sehr vielseitig aufgebaut sein. Solche Techniken sind extrem empfindlich, um auch winzige Variationen messen zu können. Trotz der großen Fortschritte in der Fasertechnologie gibt es noch viel Entwicklungsspielraum in Bezug auf Anwendung, Rauschunterdrückung und Beschichtung.

3D-Sensoren

Wir denken nur selten darüber nach, dass Videokameras eine Dimension unserer 3D-Welt ausblenden. Sensoren zur Erfassung der dritten Dimension haben seit ihrer Einführung bei Spielkonsolen an Leistungsfähigkeit gewonnen. Im Gegensatz zu regulären Kameras erfassen und speichern 3D-Sensoren zusätzlich Tiefeninformationen. Sie können

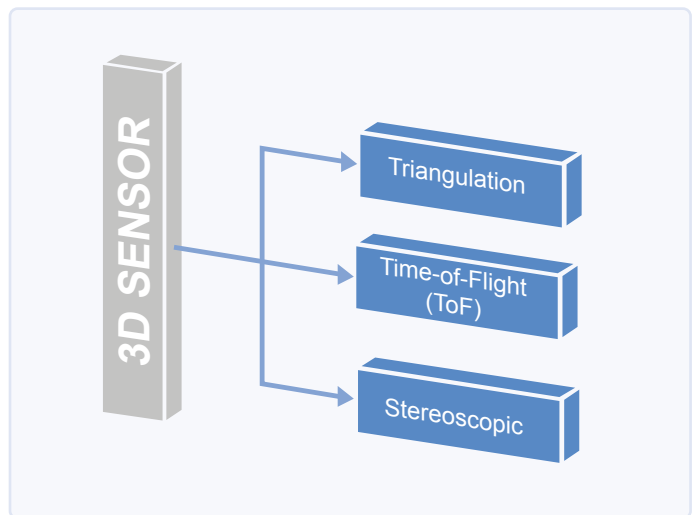


Figure 1. 3D-Sensor-Kategorien.

wie folgt klassifiziert werden (**Bild 1**):

- Sensoren, die Lichtquellen zur Beleuchtung des Objekts verwenden (z. B. einen Laser) und die Daten mit normalen 2D-Sensoren erfassen. Die Tiefenmessungen werden mithilfe von Triangulationsalgorithmen und unter Ausnutzung der Verzerrung des reflektierten Lichts berechnet.
- Time-of-Flight (ToF)-Sensoren, die die Tiefe der Umgebung aus der Zeitverzögerung zwischen der Lichtemission und Licht-Erfassung ermitteln (Laufzeit des Belichtungsstrahls).
- Stereoskopisches Sehen durch zwei versetzte Kameras, die das menschliche Sehen nachbilden.

3D-Sensoren werden in solch unterschiedlichen Anwendungen wie dem autonomen Fahren, dem Überwachungsbereich und der Objekterkennung in der industriellen Fertigung eingesetzt. Es gibt jedoch eine Reihe von Herausforderungen hinsichtlich ihrer Robustheit. Dazu gehören Störungen durch andere Lichtquellen und Unterschiede bei Tag- und Nacht-Erfassungen. Auch der Temperaturbereich, der das Laufzeitverhalten in der Flüssigkeit, in der sich das Licht ausbreitet, beeinflusst, spielt eine Rolle, genauso wie die Oberflächen, die sich wiederum auf die Reflexion der Lichtstrahlen auswirken.

Wasserdichte Sensoren

Die Erforschung unserer Meere wurde von hochmoderner und ausgereifter Sensortechnologie begleitet. Sensoren, die hier bei der Untersuchung von Klimawandel und Umweltverschmutzung helfen können, sind von wachsendem Interesse. Sie müssen wasserbeständig sein und auch bei hohem Druck in den Tiefen des Ozeans arbeiten können. Wissenschaftliche Teams schlagen auch die Entwicklung von Sensornetzwerken auf dem Meeresgrund vor. Solche Pläne sind mit einer Reihe von Herausforderungen verbunden, die mit dem Austausch von Daten unter Wasser beginnen. Bisher wurden bereits akustische Technologien entwickelt, wobei es jedoch Einschränkungen bei der Bandbreite gab und Multipath-Phänomene auftraten. Auch die Latenz wurde durch die begrenzte Geschwindigkeit beeinflusst.

Zusätzlich bleibt die Frage der Stromversorgung solcher Sensornetzwerke und nach dem geeigneten Sensortyp. Heutige, preiswerte Sensoren können in solchen Systemen traditionelle Parameter wie Druck, Temperatur oder Helligkeit messen. Allerdings benötigt dieser Bereich auch spezialisierte Sensoren zur Beurteilung der Wassertrübung, Sonar-Sensoren zur Erfassung von Objekten auf dem Meeresboden, CO₂-Sensoren und Fluorometer, um nur einige zu nennen.

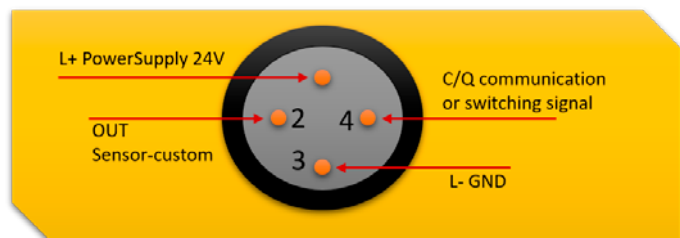


Figure 2. IO-Link-Standard.

Der IO-Link-Standard

Natürlich nützen alle Sensoren der Welt nichts, wenn ihre Messwerte nicht zur Analyse gesammelt werden können. Während sich bei IoT-Netzwerken zunehmend die drahtlose Variante durchsetzt, sticht im Bereich der industriellen Anwendungen der kabelgebundene IO-Link hervor. Fast alle Hersteller bieten heute smarte Sensoren an, die mit diesem bidirektionalen Kommunikationsbus ausgestattet sind. Ihre Beliebtheit resultiert aus der Kombination klassischer I/O-Systeme (Sensorversorgung und Signal proportional zur Messgröße) mit einem Mastergerät, meist eine SPS, die die vorhandenen Sensoren intelligent abfragt. Der Standardstecker und die Pinbelegung sind in **Bild 2** dargestellt.

IO-Link überwindet die Probleme, die üblicherweise mit analoger Sensorik verbunden sind, wie zum Beispiel Signalstörungen und EMV-Kompatibilität. Diese digitale Technologie ermöglicht außerdem eine wesentlich einfachere Verkabelung. Die Abwärtskompatibilität stellt sicher, dass IO-Link-Sensoren weiterhin in bestehenden Anlagen verwendet werden können, während sie gleichzeitig auch komplexe Installationen im Bereich *Industrie 4.0* unterstützen können. Außerdem werden neben Sensoren auch Aktoren eingebunden, die zusätzliche Möglichkeiten bieten.

Drahtlose Sensornetzwerke

In den letzten Jahren haben drahtlose Sensornetzwerke (WSN) aufgrund ihrer vielseitigen Anwendbarkeit erhebliche Aufmerksamkeit erlangt (**Bild 3**). Studien zu ihren Fähigkeiten sind aufgrund der großen Bandbreite von Anwendungsfällen noch im Gange. Ein Großteil

davon konzentriert sich unter anderem auf den Energieverbrauch und die Zuverlässigkeit der Kommunikation. Abhängig von der jeweiligen Aufgabe sind auch die Abmessungen und das Gewicht von Bedeutung. Angesichts der großen Bereiche, die diese Netzwerke abdecken können, finden sie breite Anwendung in der Umweltüberwachung (sowohl an Land als auch im Meer) und bei der Kontrolle des Gesundheitszustands von Wild- oder Nutztieren. Dabei geht es auch um die Aufrechterhaltung der drahtlosen Kommunikation bei Ausfall eines oder mehrerer Knoten und die Gewährleistung einer angemessenen Übertragungsqualität (Quality of Service).

Zukünftige Herausforderungen

Sensoren sind ein wesentliches Element des neuen digitalen Zeitalters und finden eine breite Anwendung in professionellen Bereichen, wie zum Beispiel in der Elektromedizin, beim autonomen Fahren, im Katastrophenschutz, bei der optimierten industriellen Fertigung und im Umweltbereich. Auch im Freizeitbereich wie bei Wearables und bei Spielen können Sensoren als Beitrag zur Verbesserung unserer Lebensqualität betrachtet werden. Die Forschung unternimmt erhebliche Anstrengungen zur Entwicklung innovativer Lösungen, die sich an die unterschiedlichen Anforderungen der Sensor-Anwendungen anpassen können. Wir arbeiten an immer kleineren und spezifischeren Sensoren, müssen sie aber gleichzeitig in immer größeren Bereichen einsetzen und unter extremen Bedingungen betreiben; zum Beispiel unter Wasser und in Gegenwart von Verunreinigungen und aggressiven Chemikalien.

Die Herausforderungen bestehen auch darin, den Stromverbrauch von Sensoren zu senken und sie so preiswert wie möglich zu fertigen, um sie dort zu integrieren, wo sie gebraucht werden. Tatsache ist, dass Sensoren weiterhin Teil unseres täglichen Lebens sein werden, zu unserer Gesundheit und Sicherheit beitragen und Verbesserungen in unserer Umwelt vorantreiben.. 

Dieser Artikel wurde zuerst auf Italienisch von Elettronica Open Source (<https://it.emcelettronica.com>) veröffentlicht. Elektor hat ihn mit Genehmigung übersetzt.

210284-02

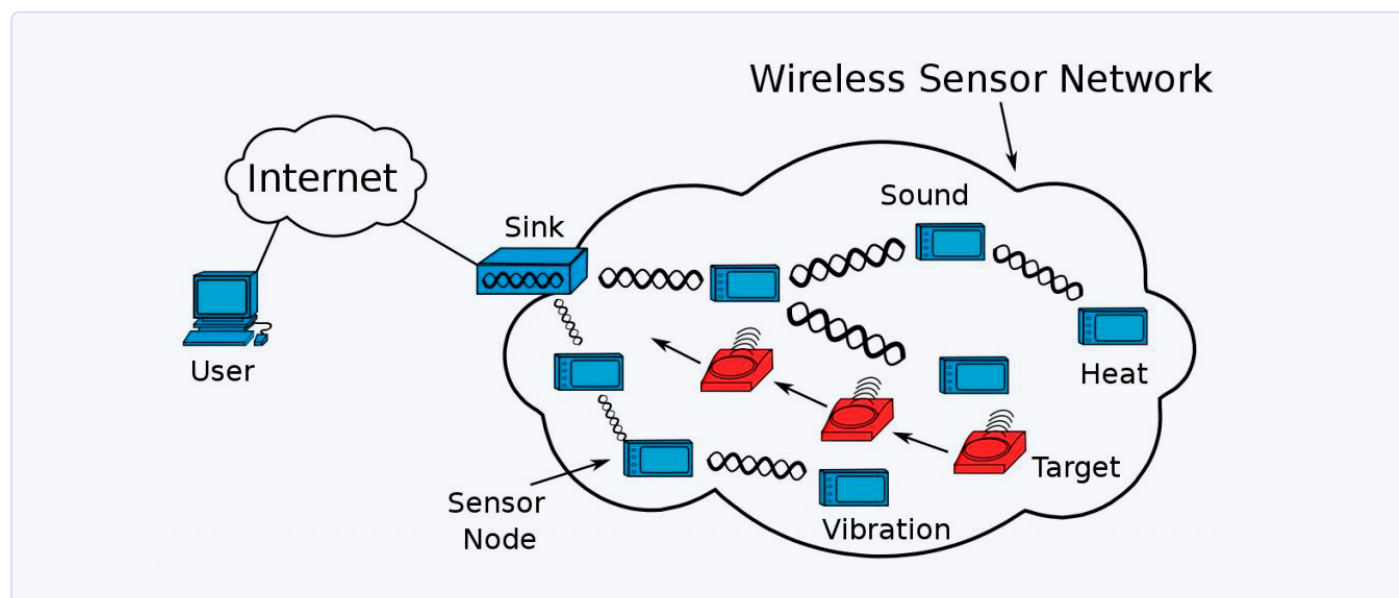


Bild 3. Darstellung eines Sensornetzwerks (Quelle: https://en.wikipedia.org/wiki/File:Wireless_Sensor_Network_General_Structure.svg).

MEMS

Sensormodule mit integrierten Algorithmen

Gebrauchsfertige Messwerte

Ein Beitrag von Würth Elektronik eiSos

In den Signalen, die ein Sensor ausgibt, stecken eine Fülle von Informationen. Gerade MEMS-basierende (Micro-Electro-Mechanical Systems) Sensoren liefern hier extrem viele Werte pro Zeiteinheit; und das mit einer beeindruckenden Genauigkeit. Allerdings müssen durch Datenverarbeitung und Interpretation der Rohdaten des Sensors erst die nützlichen Informationen separiert werden. Um diesen Aufwand zu reduzieren, hat Würth Elektronik eiSos ihren Sensoren eine Intelligenz in Form von integrierten Algorithmen spendiert.

Sensoren müssen kalibriert werden, denn erst durch den Abgleich mit einem Bezugssystem wird aus einem Ausgangswert eine brauchbare Information. Ferner gilt es zu entscheiden, in welchem Spektrum, mit welcher Auflösung und mit welcher Abtastrate Messwerte erzeugt werden sollen. Soll ein System lediglich durch einen bestimmten Schwellwert „aufgeweckt“ werden oder ist ein Messwert durch eine hochfrequente Abtastrate permanent zu überwachen? Aus diesem Grund hat Würth Elektronik eiSos MEMS-Sensoren entwickelt, die sich möglichst einfach in Applikationen integrieren lassen und gleichzeitig eine hohe Fertigungsqualität aufweisen, die für industrielle Anwendungen gefordert wird. Zudem unterstützt Würth Elektronik eiSos die Innovationen seiner Kunden durch einen beispiellosen Design-In-Support.

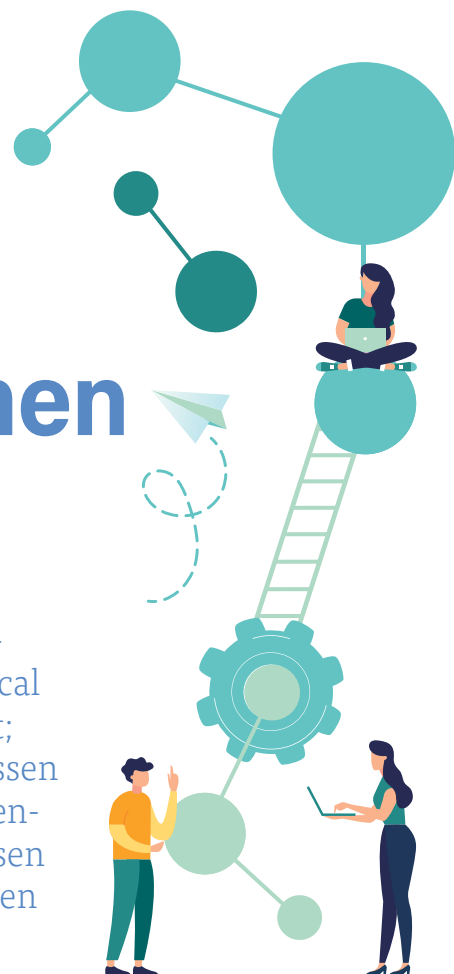
Kalibriert und programmierbar

Was umfasst das Angebot an Produkten? Der Temperatursensor WSEN-TIDS von Würth Elektronik hat beispielsweise einen Messbereich von -40 °C bis 125 °C mit einer Genauigkeit von $\pm 0,25$ °C. Besonderheiten sind neben der Kalibrierung ab Werk beispielsweise auch eine vom Kunden einstellbare Ausgangsdatenrate bis maximal 200 Hz oder die Option eines programmierbaren Schwellwertes, der direkt einen Interrupt-Pin ansteuert. Mit einer Stromaufnahme von lediglich 1,75 μ A ist das Modul für batteriebetriebene Anwendungen ideal geeignet. Ähnlich verhält es sich auch beim kalibrierten und temperaturkompensierten Feuchtesensor WSEN-HIDS, bei dem der Interrupt-Pin des Sensors genutzt werden kann, um so z.B. den für die Gesamtapplikation notwendigen Mikrocontroller

bei einer Änderung der Luftfeuchtigkeit aufzuwecken – ideal für sparsame und wartungsarme Überwachungsfunktionen. Auch der Absolutdrucksensor WSEN-PADS enthält einen ASIC (anwendungsspezifische integrierte Schaltung) sowie einen Temperatursensor, um bereits kalibrierte Ausgangswerte zu erzeugen. Über einen zusätzlichen Interrupt-Pin lässt sich auch hier die Funktion vom Anwender modifizieren. Die Output-Datenrate kann zwischen 1 und 200 Hz gewählt werden. Ein Anwendungsbeispiel ist die Verwendung des Drucksensors als Altimeter. Durch die hohe Auflösung ist beispielsweise eine Positionszuordnung einzelner Stockwerke in Gebäuden möglich.

Anwendungsbeispiel

Sensoren können unterschiedlich genutzt werden. Der kalibrierte 3-Achsen-Beschleunigungssensor WSEN-ITDS von Würth Elektronik kann beispielsweise mit einer Ausgangsdatenrate von bis zu 1,6 kHz und einer Signalbandbreite von bis zu 400 Hz in einer Vibrationsüberwachung (vorausschauende Wartung von Maschinen) genutzt werden. Andererseits lässt sich der Sensor aber auch im Low-Power-Modus zur Erfassung eines einzelnen Impulses verwenden, beispielsweise als Schalter, der angetippt wird. Zudem stehen vier Messbereiche zur Auswahl (± 2 , ± 4 , ± 8 oder ± 16 g) und über Register-Settings können die anwendungsspezifischen Funktionalitäten Freifall-, Aufwach-, Tipp-, Aktivitäts-, Bewegungs- und Orientierungserkennung gewählt werden. Am Beispiel eines Sturzerkennungssystems lässt sich gut zeigen, wie aus diesen von Würth Elektronik bereits „mitgelieferten“ Algorithmen



men eine Anwendung zusammengestellt wird. Mit der Verfügbarkeit voreingestellter Funktionen und auswählbarer Parameter gleicht die Entwicklung einer Anwendung zur Sturzerkennung eher einem Konfigurieren als einem Programmieren. Der große Vorteil: Durch die eingebauten Funktionen ist es nicht erforderlich, die Beschleunigungsdaten kontinuierlich vom Sensor abzurufen, um komplexe Berechnungen durchzuführen. Dies spart auf Applikationsebene Energie und Rechenleistung.

Sturzerkennungssensoren in Hausnotrufsystemen für Senioren sollen automatisch erkennen, wenn eine Person stürzt und regungslos liegen bleibt. Ein Sturz bedeutet physikalisch ausgedrückt, dass ein kurzer Moment der Schwerelosigkeit auftritt, also eine Beschleunigung von annähernd 0 g gemessen wird, gefolgt von einer hohen negativen Beschleunigung, die durch das Auftreffen auf dem Boden verursacht wird. Werden daraufhin für eine gewisse Zeit keine Änderungen der Beschleunigungswerte gemessen, kann daraus die Reglosigkeit der Person, die den Sensor trägt, abgeleitet werden.

Programmierbare Interrupt-Pins

Der 3-Achsen-Beschleunigungssensor WSEN-ITDS verfügt über zwei programmierbare Interrupt-Pins INT_0 und INT_1. Die Interrupt-Pins können einzeln aktiviert oder deaktiviert werden. Die Interrupt-Signale der Sensorfunktionen werden auf diese beiden Pins geleitet (**Bild 1**).

Für die Nutzung als Sturzerkennung werden die drei Funktion „Free Fall“, „Wake up“ und „Stationary/Motion“ benötigt. Die Kombination dieser Sensorfunktionen gibt zuverlässig Auskunft darüber, ob eine Person fällt und ob sie sich danach bewegen kann oder nicht. Die Interrupt-Signale aus diesen Ereignissen werden an die Pins INT_0 und INT_1 geleitet. Hier kann dann das Überwachungssystem ansetzen, das bei Bedarf den Alarm auslöst. Während des Freifall-Ereignisses geht der Beschleunigungswert aller drei Achsen gegen null. Im Register des Sensormoduls müssen zwei anwendungsspezifische Werte definiert werden, bei deren Eintreten das Interruptsignal zur Meldung eines Sturzes erzeugt wird: der Schwellenwert, ab wann von einem freien Fall ausgegangen wird und die Dauer des freien Falls. Damit die Sensordaten auf die Frage „Sturz oder kein Sturz“ hin interpretiert werden können, muss auch das Aufwecken des Sensors definiert werden, wiederum durch Definition eines Schwellenwerts geänderter Beschleunigung und einer Mindestzeitdauer dieses Impulses. Um den Schwerkraftvektor und sehr niederfrequente Störungen während der Erkennung des Aufwachereignisses auszuschließen, sollte der integrierte Hochpassfilter verwendet werden. Der integrierte „Stationary/Motion“-Algorithmus ist die Funktion, mit der die Alarmfunktion darüber informiert wird, ob der Träger des Sensors nach dem Sturz reglos liegen bleibt. Die Stationary-Funktion kombiniert die beiden Erkennungereignisse „Schlafen“ und „Aufwachen“, um Reglosigkeit zu registrieren. Die Parameter Weckschwelle und Dauer können je nach Benutzeranwendung definiert werden.

Die Grafik (**Bild 2**) zeigt, wie durch die Definition von Schwellenwerten die integrierten Funktionen auf die Phasen eines Sturzeignisses angewendet werden:

- Vor dem Fall wird die Vektorsumme der Beschleunigungswerte aus allen drei Achsen nahe bei 1 g liegen.
- Im Zustand des freien Falls tendiert die Beschleunigung gegen

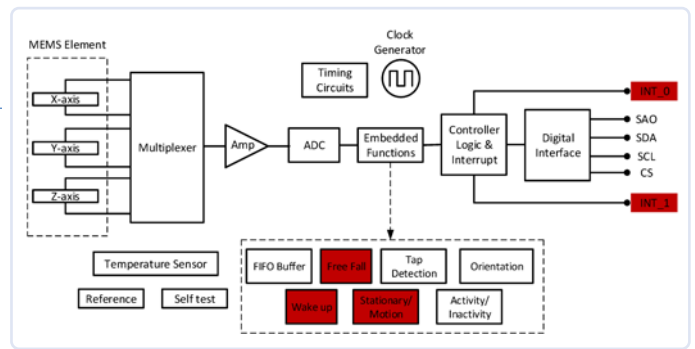


Bild 1. Funktionsblockdiagramm des 3-Achsen-Beschleunigungssensors WSEN-ITDS.

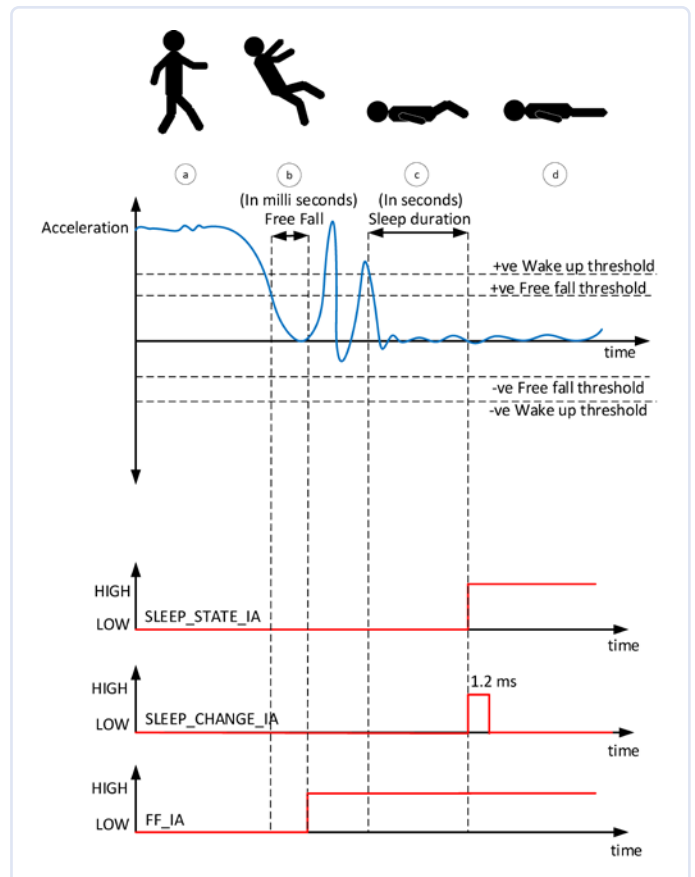


Bild 2. Erkennung der Bewegungslosigkeit über Wake-up- und Sleep-Schwellenwerte.

das 0-g-Niveau (Interrupt-Signal FF_IA), aber direkt danach tritt eine starke Beschleunigungsspitze auf.

c. Unmittelbar nach dem Sturz wird die Person versuchen, sich zu bewegen; oder sie ist nicht dazu in der Lage.

d. Wenn sich die Person nach einer bestimmten Zeit, die in der Stationary-Funktion konfiguriert wurde, nicht bewegt, werden das Interrupt-Signal SLEEP_STATE_IA und SLEEP_CHANGE_IA erzeugt. Durch den Vergleich der Ausrichtung des resultierenden Beschleunigungsvektors vor und nach dem Sturz kann das Sturzerkennungssystem angewiesen werden, einen Alarm zu erzeugen.

Fazit

MEMS-Sensoren mit werkseitiger Kalibrierung und Interrupt-Funktionen, gesteuert durch implementierte intelligente Algorithmen, lassen sich, über SPI- oder I²C-Schnittstelle mit Mikrocontrollern verbunden, leicht in Applikationen integrieren. Derzeit bietet Würth Elektronik Sensormodule und Evaluation-Kits für die Erfassung von Temperatur, Beschleunigung, Differenzdruck, Absolutdruck und Feuchtigkeit. 

Hier kommt die digitale Ergonomie!

Ein Beitrag von AXS Motionssystem

Arbeitsplätze, die auf Basis zuverlässiger Ergonomieanalysen entworfen wurden, schaden nicht der Gesundheit der Arbeitskräfte, sondern sie erhöhen die Arbeitssicherheit und ermöglichen eine effiziente Produktion. Als bahnbrechender Lösungsanbieter für digitale Ergonomieanalysen eröffnet AXS Motionssystem Kft. neue Dimensionen in der Welt der Expertensysteme und des Wearable Computing.



Bild 1. Bewegungs-Digitalisierungseinheit bei der Datenerfassung.

Die AXS Motionssystem Kft. wurde 2014 auf Anregung von Audi Hungaria gegründet, um ein Expertensystem für Ergonomie zu entwickeln. Anstelle von subjektiven Analysen, deren Daten zu 90 Prozent auf Beobachtungen basieren, bestand das Ziel darin, ein System zu schaffen, das verlässliche Daten liefert. Zu 90 Prozent basiert das System auf Messungen, was objektive Bewertungen unterstützt. 2016 gewann AXS die internationale Ausschreibung von Audi Hungaria zur Beschaffung eines Expertensystems für Ergonomie. Mit dem Ergonomischen Bewertungssystem von AXS wurde die Digitale Ergonomie ins Leben gerufen. Das System ist eine integrierte Einheit aus zwei Elementen. Mit dem AXS Bewegungs-Digitalisierungssystem können alle Bewegungsabläufe, sowie die Belastungskraft auf der Hand exakt digital aufgezeichnet werden. Auf Basis der Daten kann mit der AXS Ergonomischen Bewertungssoftware die ergonomische Bewertung fast vollständig automatisch durchgeführt werden, direkt am Aufnahmeort und binnen Minuten.

Bewegungs-Digitalisierungssystem

Die Bewegungs-Digitalisierungseinheit ist ein Sensornetz, das aus 18 Einheiten besteht, die die für ergonomische Analysen erforderlichen Daten erfassen können, und mit denen die Körperbewegung kontinuierlich digital aufgezeichnet werden kann (Bild 1). Das Besondere am System ist, dass es keine Ausrichtung über Magnetfelder benötigt, um die räumliche Position der einzelnen Sensoren zu bestimmen, somit funktioniert es in jeder industriellen Umgebung zuverlässig. Das patentierte Verfahren von AXS bestimmt die aktuelle Position des Körpers aus den Winkeln, die die Sensoren miteinander bilden. Die Daten der Sensoren werden von der Zentraleinheit erfasst; daraus wird eine Datendatei generiert, die zur Bearbeitung geeignet ist. Diese Datei kann entweder über eine WLAN-Verbindung oder von einer SD-Karte in die Bearbeitungssoftware eingelesen werden. Einlegesohlen und Handschuhe, die mit dem Sensornetz verbunden werden können, enthalten Drucksensoren, die die Belastungskraft auf einer bestimmten Oberflä-

Erster Preis

Im November 2020 gewann AXS Motionssystem den ersten Preis beim electronica Fast Forward Startup Award. Im Rahmen des Ungarischen Accelerator Programms des Generalkonsulats von Ungarn in Bayern, hat das ungarische Ministerium für Außenhandel und Auswärtige Angelegenheiten im vergangenen Jahr unsere Teilnahme am Startup-Wettbewerb electronica Fast Forward 2020 unterstützt.

che aufzeichnen (**Bild 2**). Das Sensornetz wird mit einer speziell entwickelten Sensorkleidung an dem Probanden befestigt. Die Kleidung wurde aus der Sicht des Arbeitsschutzes getestet und kann sicher verwendet werden, während man die Kleidung an Arbeitsplätzen trägt.

Ergonomische Bewertungssoftware

Die Datendatei, die von der Zentraleinheit erstellt wird, wird in der AXS Ergonomischen Bewertungssoftware verarbeitet. Mithilfe der Software kann ein Ergonom eine vollständige Ergonomieanalyse des jeweiligen Arbeitsplatzes durchführen. Die Entscheidungen, die während der Analyse zu treffen sind, werden durch eine Kontroll-Videoaufnahme unterstützt, die gleichzeitig mit der digitalen Aufzeichnung aufgezeichnet wurde und vollständig mit der digitalen Aufzeichnung synchronisiert werden kann. Ein Ergonom kann auf Basis der gemessenen exakten Bewegungsdaten und Druckwerte fundierte Entscheidungen treffen, während er sich ohne das Ergonomische Bewertungssystem nur auf seine Beobachtungen und Schätzungen verlassen kann. Die Ergebnisse der Analyse können in der Ergebnistabelle der jeweiligen ergonomischen Bewertungsmethode angezeigt und in eine Excel- oder PDF-Datei exportiert werden. Darüber hinaus lässt sich der gesamte Analyseprozess in eine Videodatei exportieren, sodass der Ergonom den Ingenieuren am Arbeitsplatz genau zeigen kann, wo das potenzielle Problem auftritt. Basierend auf den Ergebnissen von Tausenden von Messungen kann man mit Sicherheit sagen, dass das AXS Ergonomische Bewertungssystem viel genauere Ergebnisse liefert, als dies durch Beobachtungen möglich ist; Analysen lassen sich auch viel schneller als üblicherweise durchführen.



Bild 2. Einlegesohlen und Handschuhe enthalten Drucksensoren.



Bild 3. Die digitale 3D-Aufnahme kann aus jedem Blickwinkel wiedergegeben werden.

Gründe für das AXS Ergonomische Bewertungssystem

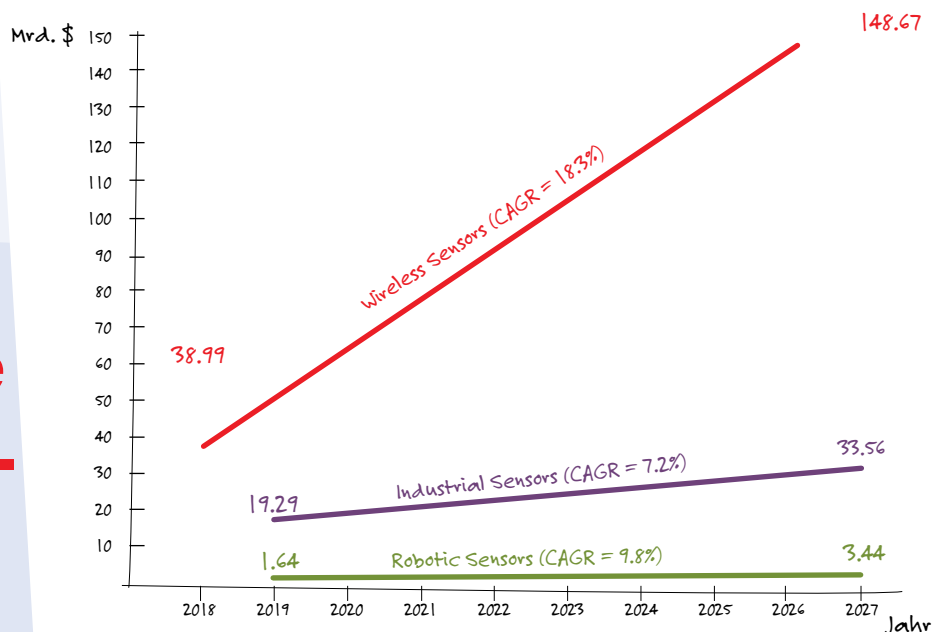
Die Ergebnisse ergonomischer Risikoanalysen basieren zu 90 Prozent auf Schätzungen und nur zu 10 Prozent auf Messdaten. Die Körperhaltung, auf der die Analyse basiert, und die ständige Veränderung der Körperhaltung, sowie die zwischenzeitlich auftretenden Kräfte können mit einer Beobachtungsmethode nicht exakt gemessen werden. Die Basisdaten der Analyse hängen von der Erfahrung und Beobachtungsfähigkeit des Ergonom ab, der die Beobachtungen durchführt. Das AXS Bewegungsdigitalisierungssystem ist auf einzigartige Weise in der Lage, Körperbewegungen, Kräfte und die Beugung/Verdrehung der Wirbelsäule mithilfe der 18 eingesetzten Sensoren genau zu messen. Basierend auf den Messdaten kann unmittelbar nach der Aufzeichnung mit der AXS Ergonomischen Bewertungssoftware eine Bewertung gemäß der gewünschten ergonomischen Methode durchgeführt werden. Die Untersuchung und Bewertung eines Arbeitsplatzes dauert durchschnittlich 20 bis 30 Minuten. Digitale 3D-Aufzeichnungen lassen sich aus jedem Winkel immer wieder abspielen, wodurch Bewegungen sofort sichtbar werden, die eine Gefahr darstellen. So kann der Ergonom den Konstrukteuren adäquate und nachweisbare Daten zur Verbesserung des Arbeitsplatzes zur Verfügung stellen. 

210209-01

Das leistet das AXS Ergonomische Bewertungssystem:

- Einfach zu verwendendes integriertes System
- Digitale Aufzeichnung von Bewegungsdaten und Druckwerten
- Genaue Aufzeichnung der Beugung und Verdrehung der Wirbelsäule
- Erkennung von Bewegungsvorgängen
- Synchronisation von Kontroll-Videoaufnahme und digitaler Aufzeichnung
- Erkennung von Bewegungsvorgängen
- Erzeugung einer sofortigen Ergonomiebewertung anhand APSA- und EAWS-Analyseverfahren
- Aufzeichnung von Aufnahmen und Analysen in einer durchsuchbaren Datenbank
- Möglichkeit der Durchführung von „Was-wäre-wenn“-Analysen
- Exportieren von Bewertungsergebnissen in PDF- und Excel-Dateien
- Export des Bewertungsprozesses in mp4

Beeindruckende Wachstumsraten



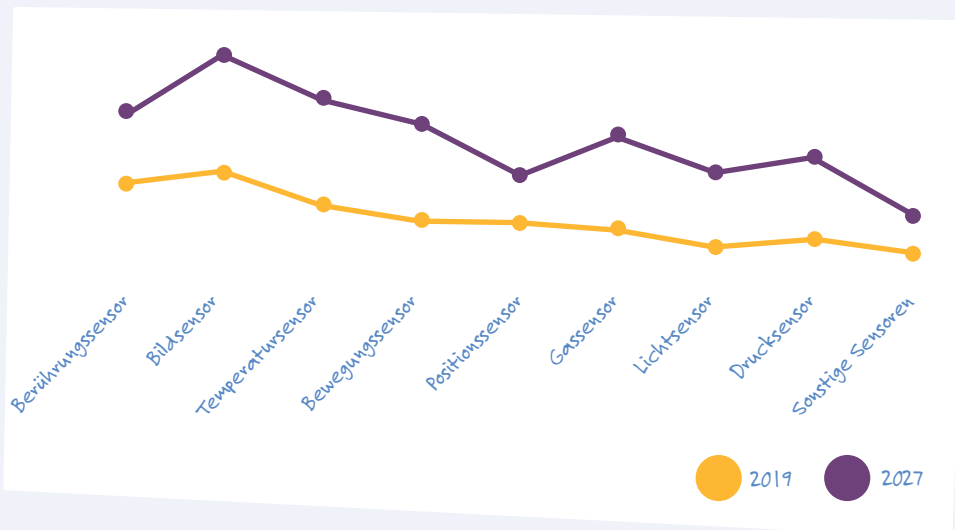
Drahtlose Sensoren bilden den mit Abstand größten Teil des globalen Marktes, und die in diesem Bereich zu erwarteten Wachstumsraten für die kommenden Jahre sehen sehr

beeindruckend aus. Warum? Weil die Vielfalt der Anwendungen für drahtlose Sensoren atemberaubend ist: von der Verkehrsoptimierung über die Luftverschmutzung bis hin

zur Diebstahlsicherung im Kfz-Bereich. Allerdings gibt es einige Überschneidungen wie zum Beispiel mit den Märkten für Industrie- und Robotersensoren.

(Quelle: Fortune Business Insights)

Smarte Sensoren können alles

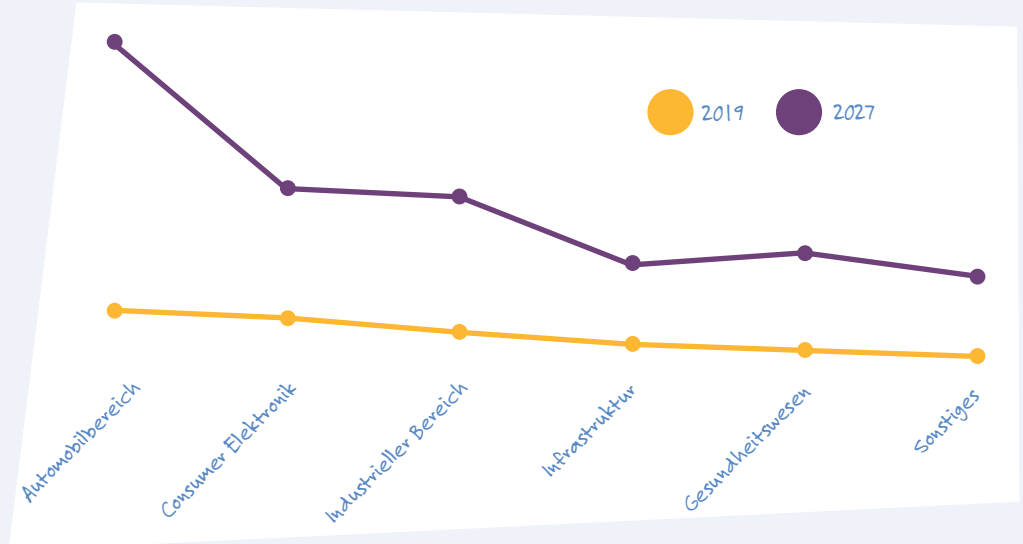


Smarte Sensoren können jede Aufgabe übernehmen. Während intelligente Systeme vor Ort am Rande des Internets die Nachfrage nach smarten Sensoren vorantreiben werden, gewinnen auch Berührungssensoren und Bildsensoren immer weiter an Bedeutung. Darüber hinaus kommt den intelligenten Gassensoren eine besondere Rolle zu. Sie müssen sowohl extrem empfindlich als auch sehr genau sein, um zum Beispiel NOX- und CO₂-Emissionen im Kampf gegen den Klimawandel zu bestimmen.

(Quelle: Allied Market Research, Fortune Business Insights)

Wo Wireless und Smart zusammenkommen

Drahtlose Sensoren wie zum Beispiel Füllstandssensoren müssen nicht zwangsläufig intelligent sein, und intelligente Sensoren müssen nicht zwangsläufig kabellos sein – man denke nur an Berührungssensoren. Es gibt jedoch eine Welt, in der drahtlose und intelligente Sensoren zusammenkommen: die Automobilindustrie. Hier können beide Versionen bei der Optimierung von vorbeugenden Wartungskontrollen und vielen anderen Anwendungen eine Rolle spielen. Kein Wunder also, dass sich die Automobilindustrie als der wichtigste Markt für drahtlose und intelligente Sensoren in den kommenden Jahren erweisen wird.



(Quelle: Allied Market Research)

Just Married
together forever

Software in Sensoren

Unter einem Sensor stellt man sich ein Stück Hardware vor, doch das ist nicht alles. Heutzutage setzen Sensoren auf das Zusammenspiel von Hardware und Software. Mehr noch: Der Ansatz von +/-50% Hardware und +/-50% Software wird in den kommenden Jahren für ein weiteres Wachstum sorgen. Laut Allied Market Research wird der Markt für intelligente Sensoren (die Kombination aus Hard- und Software schlechthin) zwischen 2020 und 2027 um 14,3% wachsen.

(Quellen: Allied Market Research, ARC Advisory Group, Fortune Business Insights; u.a.)

Was sind die Auswirkungen von Covid-19?

Kann man schon sagen, wie sich Covid-19 auf den globalen Sensormarkt auswirken wird? Da fast alle Marktforschungsunternehmen fünf oder mehr Jahre in die Zukunft blicken, deuten ihre Untersuchungen derzeit darauf hin, dass die Sensormärkte alle negativen Auswirkungen innerhalb des Zeitraums von 2021 bis 2026 überwinden werden. Optimistische Schätzungen gehen davon aus, dass die Einflüsse von Covid-19 in einem Jahr bzw. bis zum Ende dieses Jahres, spätestens aber innerhalb von zwei Jahren der Vergangenheit angehören werden.

(Quellen: Allied Market Research, Fortune Business Insights, Research and Markets; u.a.)



Verzerrungen bei 10 MHz messen

Mit Filtern und Spectrum Analyzer

Von Alfred Rosenkränzer (D)

Wer misst, misst Mist? Das muss nicht sein – wer die Qualität von Signalen erfassen will, kann auf bewährte Rezepte zurückgreifen. Nachfolgend wird das Messen von Verzerrungen bei einer Frequenz von 10 MHz beschrieben. Das ist fast die obere Grenze des Audiobandes, nicht wahr? Doch Scherz beiseite: Wer mit 10-MHz-Signalen umgehen kann, der kann sicherlich auch Audiosignale korrekt messen. Das ist sogar einfacher, denn Spectrum Analyzer für den Audiobereich haben passende Filter bereits eingebaut. Bei 10 MHz muss man selbst Hand anlegen.

Folgendes Szenario: Sie brauchen für Ihr Projekt einen verzerrungsarmen Operationsverstärker, haben einen aussichtsreichen Kandidaten gefunden und sogar ein Evaluations-Board mit diesem IC vom Hersteller gekauft. Jetzt möchten Sie wissen, was dieser Verstärker wirklich kann und daher seine Verzerrungen messen. Laut Datenblatt liegen die unerwünschten Signalanteile, die dieser Verstärker produ-

ziert, bei einer Signalfrequenz von 10 MHz und einem Signalpegel von 0 dBm im Bereich von -70 bis -80 dBc. Aha! Was genau bedeutet das?

Erläuterungen

Zunächst: Ein Pegel von 0 dBm entspricht 223 mV_{eff} bzw. bei Sinus-signalen 632 mV_{SS} an einer Last von 50 Ω. Doch das wäre nicht der einzige zu klärende Terminus.

Was bedeutet eigentlich THD? Es handelt sich dabei um das englische Akronym von **Total Harmonic Distortion** und bedeutet Verhältnis der Summe der Leistungen einer Anzahl von Harmonischen Signalkomponenten relativ zum Signal (Carrier), also schlicht ein bestimmtes Pegelverhältnis, das die gesamten Störungen im Verhältnis zum Nutzsignal angibt. Die THD wird gewöhnlich in der Einheit **dBc** angegeben, wobei das „c“ für **Carrier** steht. Wie viele Oberwellen berücksichtigt werden, ist Definitionssache. Da im MHz-Bereich zumeist die 1. und 2. Oberwelle dominieren, die 3. und 4. in der Regel noch gut im Spektrum zu sehen sind und der Rest pegelmäßig oft keine wirkliche Rolle mehr spielt, beschränkt man sich in der Praxis gerne auf die Pegel der ersten vier Oberwellen. Im Audio-Bereich kann das aufgrund gestiegener Qualitätsansprüche an audiophile Hardware (mit einer 24-bit-A/D-Wandlung und einer 192-kHz-Abtastrate usw.) anders sein. Bei Audioelektronik werden daher oft wesentlich mehr Oberwellen berücksichtigt. Zu einem THD-Wert gehört daher auch immer die Angabe, wie viele Harmonische denn genau berücksichtigt wurden. Der THD-Wert selbst sagt natürlich nichts darüber aus, wie die Verteilung der Einzelleistungen auf die einzelnen Oberwellen genau aussieht. Es kann eine

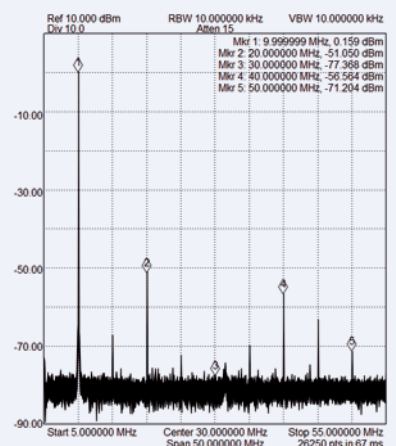


Bild 1. Spektrum des 10-MHz-Signals vom Signal-Generator, direkt mit dem Spectrum Analyzer gemessen.

bestimmte Oberwelle dominieren, oder die Energie verteilt sich mehr oder minder gleichmäßig auf mehrere Oberwellen.

Messpraxis

Legen wir los: Für unser Beispiel mit dem Operationsverstärker wird mit Hilfe eines Signalgenerators ein Sinussignal mit 10 MHz bei einem Pegel von 632 mV_{SS} eingestellt und sein Ausgang mit dem Eingang des Opamps verbunden. An den Ausgang des Opamps kommt dann ein Spectrum Analyzer (SA). Für einen ersten Überblick über das sich ergebende Spektrum stellt man den Frequenzbereich des SA auf 5 MHz bis 55 MHz ein. Der Bildschirm des Spectrum Analyzers sieht dann zum Beispiel so aus wie in **Bild 1**.

Da stellt sich Ernüchterung ein. Die sichtbaren Oberwellen sind deutlich größer als das, was man eigentlich bei so einem OP haben möchte. Das Spektrum oberhalb von 55 MHz kann man da getrost erst einmal ignorieren. Ein Grund für die überraschend hohen Peaks bei den Oberwellen könnte ganz simpel der sein, dass der Generator selbst nicht so toll ist und schon einen hohen Oberwellengehalt in seinem Signal verursacht.

Tiefpass

Abhilfe sollte hier mit dem Tiefpass-Filtern des Ausgangssignals ganz einfach möglich sein. So ein signalverbessernder Tiefpass sollte die 10-MHz-Grundwelle möglichst ungedämpft passieren lassen, aber die Oberwellen bei 20, 30 und mehr MHz möglichst stark unterdrücken.

Bild 2 zeigt den Amplitudenverlauf eines Tiefpasses, der statt des Opamps eingeschleift wurde. Bevor das Signal des Generators zum Eingang des Spectrum Analyzers gelangt, muss es jetzt einen Fertig-Tiefpass des Typs SLP-10.7 von Mini Circuits (siehe [1]) passieren. Man kann natürlich auch selbst einen Tiefpass aufbauen, doch so ein Fertigexemplar bietet immerhin garantierte Eigenschaften und ist mit knapp über 30 € zumindest nicht übertrieben teuer.

Die Marker sind auf 10 MHz und ganzzahlige Vielfache davon eingestellt. Die Dämpfungen bei 30, 40 und 50 MHz liegen im Bereich von -70 dB. Bietet der Generator von Hause aus nur eine Signalqualität von 40 dBc, so würde man mit diesem Filter bei der zweiten und den weiteren Oberwellen bei deutlich besseren 110 dBc landen, was „Headroom“ ergibt, um die zu erwartenden 70 bis 80 dBc des Opamps vernünftig messen zu können. Bei 20 MHz bietet der Filter allerdings lediglich eine Dämpfung um 37 dB. Der Generator müsste hier also schon mindestens auf einen Störabstand von 53 dBc kommen, um mit den resultierenden 90 dBc noch einen Spielraum von wenigstens 10 dBc zu erhalten. Das reicht also noch nicht.

Was könnte man hier noch tun? Man könnte beispielsweise die Signalfrequenz leicht (z.B. auf 11,3 MHz) erhöhen, denn dadurch erhöht sich die Dämpfung der Oberwellen bei diesem Filter. Der Frequenzgang des Filters in **Bild 3** zeigt, wie sich die Erhöhung der Generatorfrequenz auf 11,3 MHz auswirkt. Die Dämpfung der 1. Oberwelle bei 22,6 MHz liegt nun nämlich bei 45,5 dB. Zusammen mit dem Störabstand des Generators von 40 dBc kommt man so auf immerhin fast brauchbare 85,5 dBc des Testsignals.

Doppel-Tiefpass

Als weitere Verbesserung könnte man schlicht zwei solche Tiefpässe in Serie schalten. **Bild 4** zeigt, wie sich das auswirkt. Offenbar beeinflussen sich die beiden Filter aber gegenseitig, so dass man diese Anord-

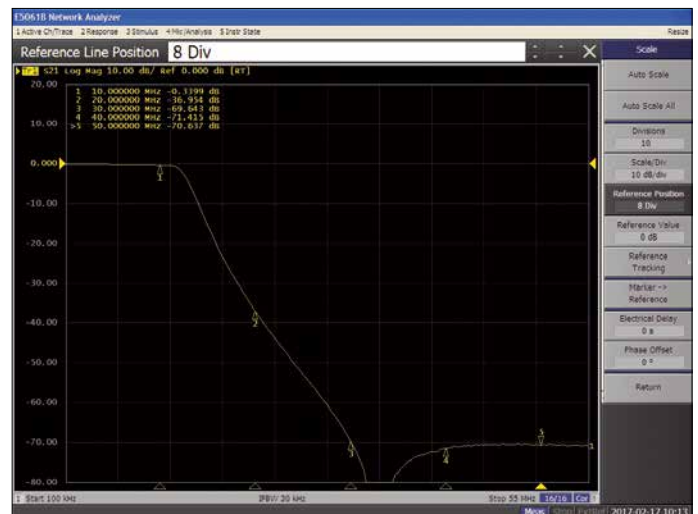


Bild 2. Amplitudenverlauf des Tiefpasses SLP-10.7 von Mini Circuits.

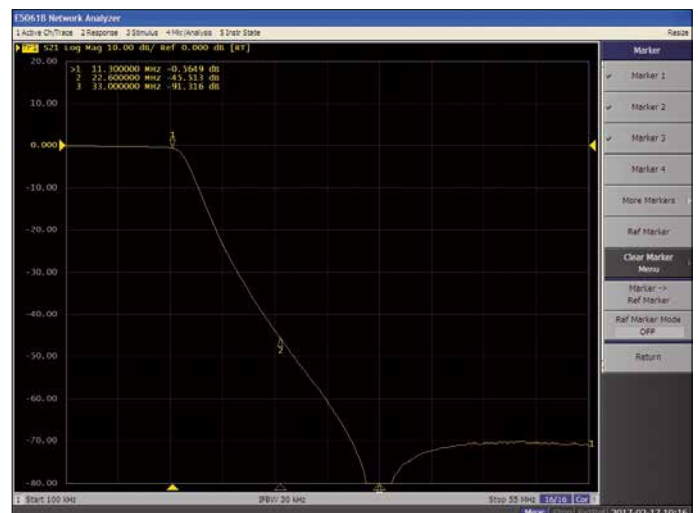


Bild 3. Signal bei 11,3 MHz. Die Dämpfung der 1. Oberwelle bei 22,6 MHz ist nun 45,5 dB.

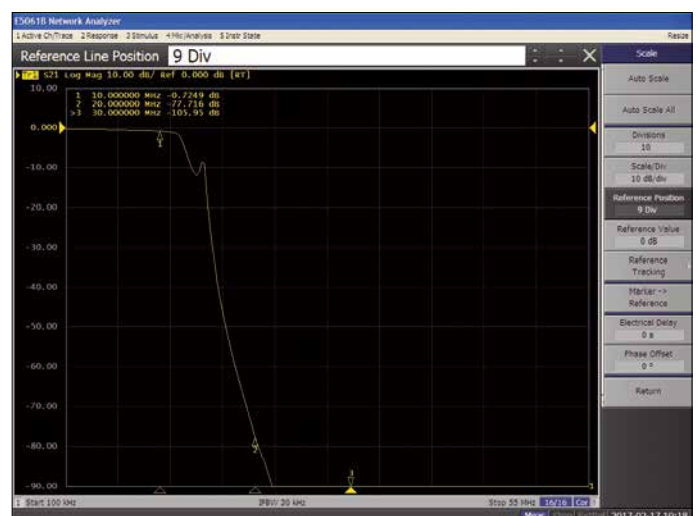


Bild 4. Frequenzgang von zwei SLP-10.7 in Serie.

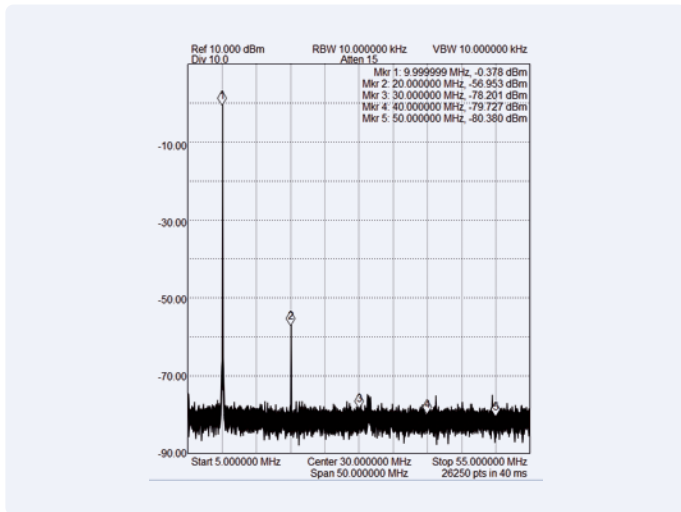


Bild 5. Spektrum nach Filterung durch zwei SLP-10.7-Tiefpässe.

nung kaum vernünftig bei Frequenzen oberhalb von 10 MHz anwenden kann. Dafür hat sich die Dämpfung bei 20 MHz auf fast 78 dBc nun soweit erhöht, dass für rationales Messen genügend Spielraum bleibt. Hier muss man allerdings erwähnen, dass Filter in einer realen Welt keine idealen Eigenschaften aufweisen, sondern selbst auch Verzerrungen und damit Oberwellen erzeugen können. Die Ursachen dafür liegen in den nichtidealen Eigenschaften der Bauteile eines Filters. Die Spulen eines 10-MHz-Filters haben zumeist einen Ferritkern, der ein nichtlineares Verhalten aufweist. Dies kann bei höheren Signalpegeln sogar noch steigende Verzerrungen mit sich bringen. Schlechte Kondensatoren können ebenfalls unerwünschte Signalkomponenten hinzufügen. Diese Aspekte sollte man bei einem eventuellen Selbstbau von Filtern auf jeden Fall berücksichtigen, sonst spart man schnell am falschen Ende.

Interessant ist, wie das Signal nach zwei SLP-10.7-Tiefpässen in Serie aussieht (Bild 5). Die Oberwellen bei 20, 30, 40 und 50 MHz gehen im Rauschen unter, doch der Peak bei 20 MHz liegt bei -57 dBm, hat sich also nur um 6 dB verbessert. Warum das? Es hört sich erstaunlich an, aber eigentlich ist das nur logisch: Hohe Signalpegel können in der

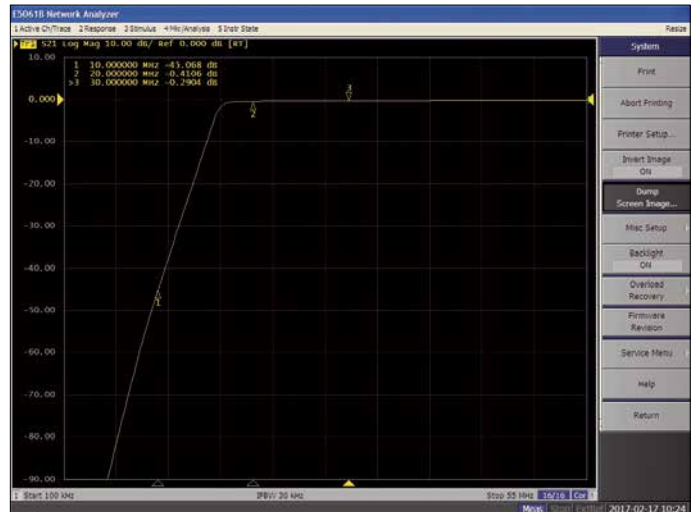


Bild 6. Frequenzgang des Hochpass-Filters SHP-20+ von Mini Circuits.

ebenfalls nicht perfekt verstärkenden Eingangsstufe des Spectrum Analyzers natürlich auch selbst Oberwellen erzeugen. Also braucht es auch hierfür noch eine Lösung.

Plus Hochpass

Um die Verzerrungen der SA-Eingangsstufe zu vermindern kann man einen passenden Hochpass direkt vor den Eingang des Spectrum Analyzers schalten (später also zwischen Opamp-Ausgang und SA-Eingang einschleifen). Dieser Hochpass vermindert den Pegel des 10-MHz-Signals stark. Bild 6 zeigt den Frequenzgang eines geeigneten Hochpassfilters des Typs SHP-20+ von Mini Circuits. Das 10-MHz-Signal wird um volle 45 dB gedämpft, während die Oberwellen nur wenig beeinflusst werden. Bild 7 veranschaulicht die Veränderungen, wenn der Spectrum Analyzer mit Tiefpässen und zusätzlichem Hochpass quasi ohne störendes Messsignal betrieben wird. Wie erwartet liegt der Pegel des 10-MHz-Signals nun bei -45 dBm und die Oberwellen sind im Rauschen verschwunden. Nun kann man die Eingangsstufe des SA wesentlich empfindlicher einstellen, da sie ja jetzt nicht mehr durch ein hohes Nutzsignal übersteuert werden kann. Der Maximal-

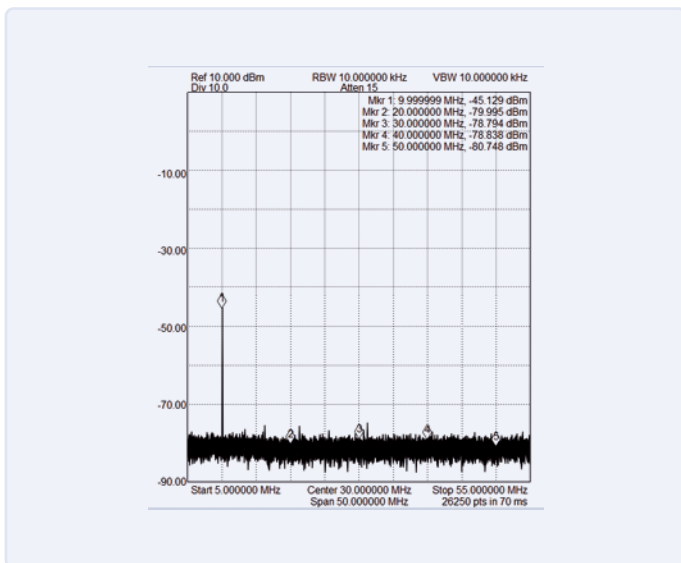


Bild 7. Spektrum des mit zwei Tiefpässen und einem Hochpass gefilterten Signals.

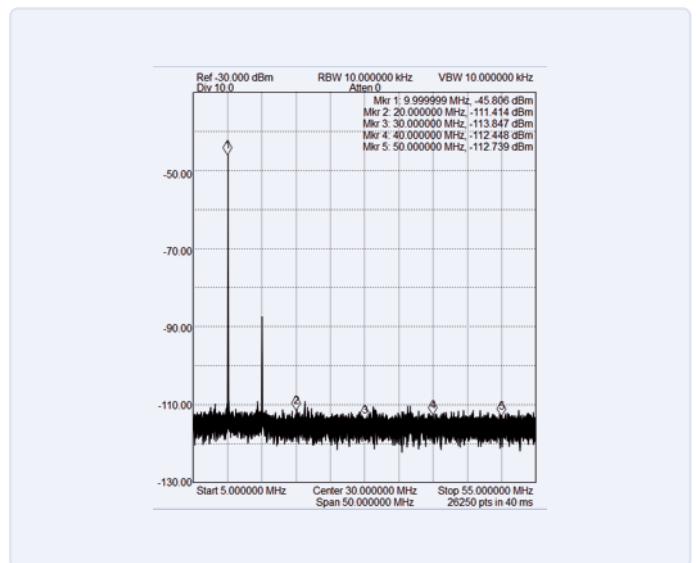


Bild 8. Spektrum mit eingeschleiftem Opamp und erhöhter SA-Empfindlichkeit.



So misst man keinen Mist!

pegel von Bild 8 liegt jetzt ja bei -30 dBc. Dadurch reduziert sich auch der Rauschteppich des Spektrums auf unter -110 dBc. Damit kann man messen. Der merkwürdige Peak bei 15 MHz kommt vom Signalgenerator und ist wohl ein Artefakt seiner Implementierung einer DDS (Direkte Digitale Synthese).

Um nun die erste Oberwelle bei 20 MHz sicher messen zu können, kann man die Mittenfrequenz der Anzeige auf die Oberwelle (also 20 MHz) stellen und den Span drastisch (z.B. auf 100 kHz) verringern. In der Folge sinkt der Rauschpegel auf etwa -125 dBc, da nun die Filterbandbreite des Spectrum Analyzers viel kleiner ist. **Bild 9** demonstriert eindrucksvoll, dass die erste Oberwelle jetzt sichtbar wird, obwohl ihr Pegel jetzt nur noch -110 dBm beträgt. Der Rauschabstand liegt hier immer noch bei akzeptablen 15 dB. Die Pegel der Oberwellen höherer Ordnung sind noch kleiner.

Endlich messen

Nachdem nun die Messanordnung so optimiert wurde, dass die zu erwartenden Verzerrungen des Opamps tatsächlich akzeptabel erfasst werden können, ist es Zeit, Nägel mit Köpfen zu machen. Hierzu geht man in zwei Schritten vor (siehe **Bild 10**):

- Zunächst wird der Ausgang des Generators über die beiden Tiefpass-Filter mit dem Eingang des OPs verbunden. Er muss dort mit 50 Ω abgeschlossen werden. Der Ausgang des Opamps treibt zunächst über einen 50- Ω -Widerstand den Eingang des Spectrum Analyzers (Setup 1). Der gewünschte Pegel des 10-MHz-Testsignals wird am Generator eingestellt und am Spectrum Analyzer gemessen, denn dieser dient als Referenz für 0 dB.

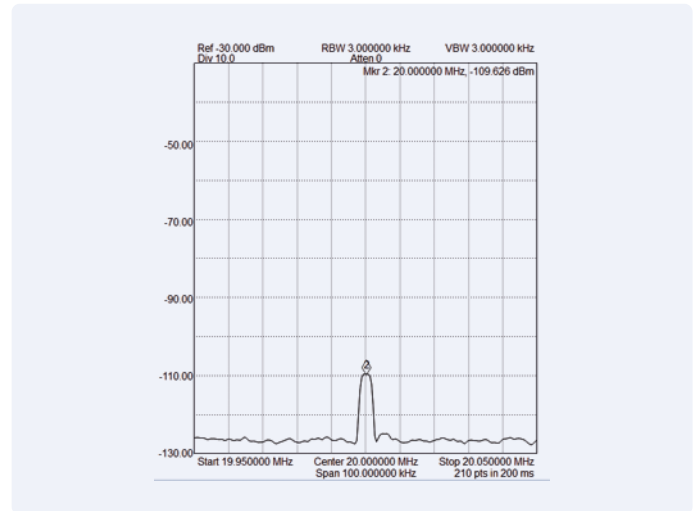


Bild 9. Ein spektraler Zoom bei 20 MHz ± 50 kHz erniedrigt das Rauschen und zeigt die 1. Oberwelle bei 20 MHz nun mit 15 dB Rauschabstand.

- Dann werden der Hochpass zwischen Verstärker und Spectrum Analyzer eingefügt (Setup 2) und die Oberwellen gemessen. Alles ist jetzt gut.

Nachtrag

An Messgeräten wurde neben den drei Filtern der Signal-Generator Siglent SDG1025 und der USB Spectrum Analyzer Signalhound SA44B eingesetzt. Die Frequenzgänge wurden mit dem Networkanalyzer E5061B gemessen. ◀

160416

WEBLINKS

- [1] www.minicircuits.com/WebStore/dashboard.html?model=SLP-10.7%2B
- [2] www.minicircuits.com/WebStore/dashboard.html?model=SHP-20%2B

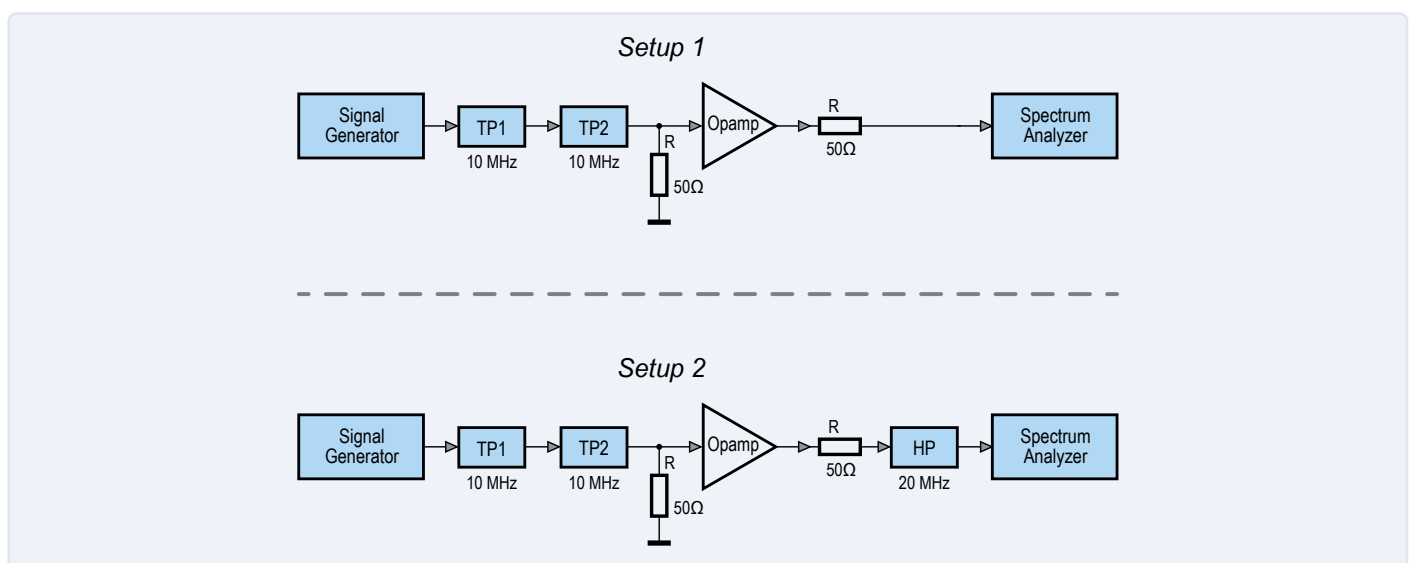


Bild 10. Die zweistufige Messanordnung. Setup 1 misst den Referenzpegel und Setup 2 die Oberwellen.



Smartes Prüf- und Programmiergerät für IO-Link-Sensoren

Von Michael Schultze, Marketing Manager,
Carlo Gavazzi GmbH

IO-Link macht aus smarten Sensoren umfangreiche Informationen verfügbar, die sich für die Prüfung und Anpassung von Sensoren nutzen lassen. Flexibilität und Schnelligkeit durch komfortables Arbeiten vor Ort erzielen Effizienzgewinne. Das Handprogrammiergerät Smart Configurator von Carlo Gavazzi ist das passende Werkzeug dafür.

Sensoren erfassen Messwerte, smarte IO-Link-Sensoren neben der eigentlichen Messgröße zahlreiche weitere Informationen, die mittels der Aufbereitung durch integrierte Mikroprozessoren in nahezu vollem Umfang zur Verfügung gestellt werden können. Aber erst der Austausch dieser Sensor-Informationen mit übergeordneten Steuerungs- oder IT-Systemen macht die Angaben nutzbar, insbesondere für Diagnosezwecke und für die Einstellung von Parametern. Dies ermöglicht der Kommunikationsstandard IO-Link, so dass sich Status- und Diagnoseinformationen für vorausschauende Wartung und die bessere Planung von Wartungs- und Instandhaltungszyklen nutzen lassen; Diagnose-daten in Echtzeit reduzieren den Aufwand bei der Fehlersuche. Zudem steigt durch die Möglichkeit, die Sensor-Parameter beispielsweise bei einem Produktwechsel oder bei unterschiedlichen Produktionsbedingungen schnell anzupassen, die Auslastung der Maschinen.

Autark vor Ort arbeiten

Bislang werden Sensoren über ein mit dem Netzwerk verbundenes Master-Gerät oder einen IO-Link-Master programmiert. Die Geräte haben in der Regel kein eigenes Display und häufig keine unabhängige Spannungsversorgung und sind nur im Verbund mit einem PC oder Laptop und der entsprechenden Software verwendungsfähig. Für Service-Techniker vor Ort lässt sich der Komfort bei der Diagnose und Parametrierung von Sensoren durch einen Handheld wie den Smart Configurator von Carlo Gavazzi enorm verbessern. Das Gerät wurde für die Verwendung mit den Sensoren nach dem IO-Link-Standard konzipiert und enthält mit Touchscreen, Speicher, Apps, Kommunikationsschnittstelle und Stromversorgung für mindestens fünf Betriebsstunden alle Komponenten, die dem Techniker ein autarkes Vorgehen ermöglichen. LED-Anzeigen informieren ihn über Batterie- und Gerätestatus.

Sensor anstecken, fertig, los geht's

Nach dem Einschalten ist das Gerät sofort einsatzfähig. Die Funkverbindung wird aktiviert, um die Internetverbindung herzustellen. Updates für die Apps lassen sich via WLAN herunterladen. Dann verbindet der Techniker den gewünschten Sensor mit dem Gerät. Sensoren mit Gewinde steckt er auf die passende Buchse an der abgewinkelten Oberseite des Smart Configurators (**Bild 1**), angeboten werden ein dreipoliger und ein vierpoliger M8-Anschluss sowie eine M12-Buchse. Kabel-Versionen werden mit einem Adapterkabel angeschlossen. Die WLAN-Verbindung verschafft dem Benutzer den Zugang zur Gerätebeschreibung, der IODD (IO Device Description), die die



Bild 1: Sensoren mit Gewinde werden auf die passende Buchse an der abgewinkelten Oberseite des Smart Configurators aufgesteckt.



Bild 2: Der Smart Configurator von Carlo Gavazzi gibt Service-Technikern Zugriff auf Parameter, Prozessdaten und Diagnoseinformationen von Sensoren und ermöglicht Anpassungen vor Ort.

Informationen zur Identifikation des Sensors, zu Geräteparametern, Prozess- und Diagnosedaten sowie Kommunikationseigenschaften enthält und einfach ausgelesen und weiterverarbeitet werden kann. Falls die entsprechenden Dateien nicht bereits auf dem Smart Configurator gespeichert sind oder mittels einer Micro-SD-Karte eingelesen werden, werden sie auf Knopfdruck per Internet-Verbindung aus der IO-Link-Datenbank IODDfinder heruntergeladen, dem zentralen Speicherort für die Informationen zu allen am Markt verfügbaren IO-Link-Sensoren.

Benutzerprofile einrichten und Messgrößen einstellen

Die Apps des Smart Configurators lassen sich intuitiv bedienen (Bild 2). Über das Konfigurationsmenü kann der Techniker zunächst Benutzereinstellungen für den Sensor in der IODD vornehmen. Dafür stehen die drei Profile „Observer“, „Maintenance“ und „Specialist“ zur Auswahl. Er legt fest, in welchem Umfang das jeweilige Profil die einzelnen Funktionsbereiche, beispielsweise den Zugriff auf Diagnoseinformationen oder das Einstellen von Parametern, nutzen kann. Danach kann er den Sensor einem bestehenden Projekt zuordnen oder ein neues Projekt anlegen. Alle Arbeitsschritte werden durch die Aktualisierung der IODD-Datei sowie des IODD-Index abgeschlossen.

Vom Konfigurationsmenü aus wechselt der Benutzer zu den Prozessdaten. Dort findet er für seinen Sensor eine Liste mit sämtlichen Parametern nebst Einstellungen, die er aktivieren beziehungsweise deaktivieren oder bei denen er Werte in Untermenüs eingeben oder ändern kann. Die Steuerbefehle, mit denen Sensor-Parameter eingelesen, Änderungen verworfen oder in den Sensor geschrieben werden, stehen

als Icons zur Verfügung. Damit der Benutzer nicht jedes Mal durch die Parameter-Liste scrollen muss, um sich bestimmte Kenngrößen für einen Sensor anzeigen zu lassen, kann er sie in einer Favoritenliste zusammenfassen; wichtige Werte können auf der Startseite des Gerätes angezeigt werden.

Prüfen, überwachen, parametrieren

Der Smart Configurator gibt dem Service-Techniker Zugriff auf Diagnoseinformationen wie Betriebsstunden, Anzahl der Detektionen, Betriebszyklen und Alarmmeldungen. Mit dem Adapterkabel lassen sich IO-Link Sensoren an den Maschinen und Anlagen mit dem Smart Configurator Point-to-Point verbinden; der Techniker liest Parameter und Prozessdaten aus und kann gegebenenfalls nachjustieren. Er kann den Status von Sensoren in der Anwendung abrufen und dabei die aktuelle Temperatur sowie Prozessqualität und Prozessdaten prüfen. Die IO-Link-Sensoren werden einer Leistungsprüfung unterzogen; Werte können in der Anwendung korrigiert oder der Sensor bei Bedarf ausgetauscht werden. Der Techniker scrollt durch die Parameter-Liste und ändert Schaltepunkt, Schaltabstand, Zeitfunktionen, Ausgabeart und Schaltfunktionen und passt sie an die jeweiligen Prozessanforderungen an.

Fazit

Mit dem Smart Configurator werden Diagnose und Parametrierung von IO-Link-Sensoren mobil. Service-Techniker haben vor Ort Zugriff auf alle vom Sensor-Hersteller zur Verfügung gestellten Informationen und können Änderungen und Anpassungen unmittelbar vornehmen.

190275-01



Joy-IT PSG9080 DDS-Funktionsgenerator

Von Harry Baggen (Niederlande)

Sie suchen einen Funktionsgenerator? Günstige, nach dem DDS-Verfahren (Direct Digital Synthesis) arbeitende Exemplare gibt es zwar schon für rund 100 Euro, doch dann dürfen Sie Ihre Erwartungen auch nicht zu hoch schrauben. Wenn Sie etwas mehr Qualität und dazu noch ein robustes Gehäuse wünschen, kann das schnell teuer werden. Der neue PSG9080 von Joy-IT liegt genau dazwischen: Er bietet eine ganze Reihe interessanter Features in einem attraktiven Gehäuse und ist trotzdem noch sehr günstig.

Den kleineren Funktionsgenerator von Joy-IT (JDS6600), der etwas mehr als 100 Euro kostet, haben wir bereits vor über einem Jahr getestet. Für den Preis war er in Ordnung, aber das Gehäuse und vor allem die mechanische Konstruktion ließen einiges zu wünschen übrig. Es scheint, dass Joy-IT sich unsere Kritik zu Herzen genommen und deshalb den PSG9080 entwickelt hat. Er kostet zwar fast das Doppelte, doch dafür bietet er einen größeren Frequenzbereich, mehr Optionen und ein deutlich besseres Gehäuse mit stabiler Frontplatte, größerem Display und eingebautem Netzteil. Hier ein kurzer Überblick über die wichtigsten Merkmale des PSG9080. Zwei Signalausgänge können unabhängig voneinander verwendet oder miteinander verbunden werden. Die maximale Sinus-Frequenz beträgt 80 MHz. Für andere Wellenformen wie Rechteck und Puls ist ein Bereich von 30 MHz angegeben. Die Sampling-Rate liegt bei 300 Msamples/s. Der D/A-Wandler hat eine Auflösung von 14 Bit. Es gibt viele Modulationsmöglichkeiten

sowie eine Sweep- und VCO-Funktionalität und außerdem noch programmierbare Wellenformen mit bis zu 8192 Stützpunkten. Auch einen eingebauten Frequenz-/Impulszähler mit einem Bereich bis zu 100 MHz gehört zu den Pluspunkten dieses Generators, der auch von einem PC aus betrieben werden kann.

Ansprechendes Gehäuse

Der PSG9080 wird in einem stabilen Karton geliefert, in dem sich auch das Netzkabel, das USB-Kabel und zwei verschiedene Arten von BNC-Kabeln befinden. Das Gehäuse des Generators besteht komplett aus Kunststoff und ist daher auffallend leicht und dazu noch sehr gut verarbeitet. Es fühlt sich recht stabil an und ist an der Vorder- und Rückseite mit gummiartigen Schutzkanten versehen. Dadurch bleibt das Gerät trotz des geringen Gewichts stabil auf dem Tisch stehen und rutscht nicht nach hinten, wenn man eine Taste drückt – oft ein Ärgernis bei vielen elektronischen Geräten.

Ein Tragegriff, der in verschiedenen Positionen arretiert werden kann und ebenfalls mit gut haftenden Gummifüßen ausgestattet ist, erleichtert den Transport. Beim Netzteil handelt es sich um ein Schaltnetzteil.

Die Frontplatte (**Bild 1**) ist übersichtlich gestaltet. Es gibt Zifferntasten für die direkte Eingabe von Werten, und es gibt separate Tasten für die verschiedenen Optionen wie Sweep, Modulation und VCO. Auch ein Signaleingang für den Frequenzzähler und ein Drehknopf zum Verändern einer Einstellung dürfen natürlich nicht fehlen. Neben dem Display sind sechs Universalstasten angeordnet, deren Funktionen auf dem Display angezeigt werden. Das optisch ansprechende Display ist dreieinhalb Zoll groß und zeigt sowohl die Einstellungen für die beiden Ausgangskanäle als auch andere Einstellungen an. Die Helligkeit ist ausreichend und die scharf erscheinenden Ziffern lassen sich auch von der Seite noch gut ablesen.

Auf der Rückseite (**Bild 2**) finden wir den Netzanschluss mit einem konventionellen Ein-/Ausschalter, einen USB-Anschluss, eine DC-Buchse (der Generator kann auch mit 5 V DC versorgt werden), einen TTL-Anschluss (dessen Funktion leider nirgendwo erklärt wird) und zwei Sync-Buchsen, mit denen die Synchronisation mehrerer Generatoren ermöglicht wird.

Besondere Merkmale

Die Bedienung des PSG9080 ist einfach. Für die meisten Funktionen müssen Sie nicht einmal ins Handbuch schauen (dieses kann übrigens unter [1] heruntergeladen werden). Bei den Wellenformen können Sie mit den neben dem Display angeordneten Funktionstasten den Parameter auswählen, den Sie ändern möchten. Der Wert kann nun mit dem Drehknopf oder durch Eingabe eines Wertes über den Ziffernblock geändert werden. Das Display zeigt kontinuierlich die relevanten Werte für die beiden Ausgangskanäle an (**Bild 3**). 21 Standard-Kurvenformen sind vorprogrammiert. Zusätzlich sind 15 Kurvenformen, die Sie selbst programmieren können, möglich, wozu die PC-Software DDS Signal Generator [2] benötigt wird. Mit der Taste MOD gelangt man ins Modulationsmenü, in dem zahlreiche Modulationsverfahren zur Auswahl stehen. Eine externe Modulation ist über den Mod-Eingang an der Frontplatte möglich. Über die Sweep-Taste gelangen Sie in das Sweep-Menü. Leider können Sie den Sweep nur per Tastendruck starten und nicht über ein Triggersignal von einem anderen Gerät. Der VCO-Eingang (Voltage Controlled Oscillator) bietet die Möglichkeit, mit einem Steuersignal von 0 bis 5 V am EXT-Eingang die Frequenz eines der Ausgangssignale in einem vorgegebenen Bereich zu steuern. Der eingebaute Frequenzzähler ist über die Taste MEAS zugänglich. Der Messbereich erstreckt sich dabei laut Hersteller auf bis zu 100 MHz. Einige Anwender behaupten im Internet sogar, dass die Grenze noch höher liegt. Sie können den PSG9080 übrigens auch als Impulzzähler bis zu einer Obergrenze von etwa 4 Milliarden Impulsen verwenden. Der PSG9080 bietet auch die Möglichkeit, eine Folge von Wellenformen zu programmieren. Dabei kann die Dauer jeder einzelnen Wellenform eingestellt werden, ebenso wie die Anzahl der Wiederholungen. Es stehen insgesamt 20 Programmspeicher zur Verfügung, die jeweils bis zu 100 Schritte enthalten können. Der Programmiermodus wird



Bild 1. Das Bedienfeld ist sehr übersichtlich und verfügt auch über eine numerische Tastatur.



Bild 2. Die Rückseite des Generators, unter anderem mit einem echten Netzschalter und einem USB-Anschluss.

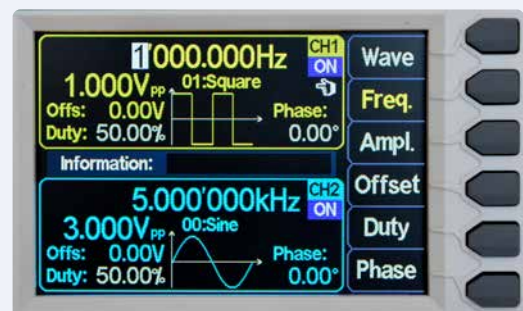


Bild 3. Das Display zeigt die Einstellungen der beiden Ausgänge gleichzeitig an.



Bild 4. Das Innenleben des PSG9080. Das Herzstück ist ein Xilinx Spartan-6, der in der Mitte auf der großen Platine angeordnet ist. Rechts befindet sich die Spannungsversorgung.

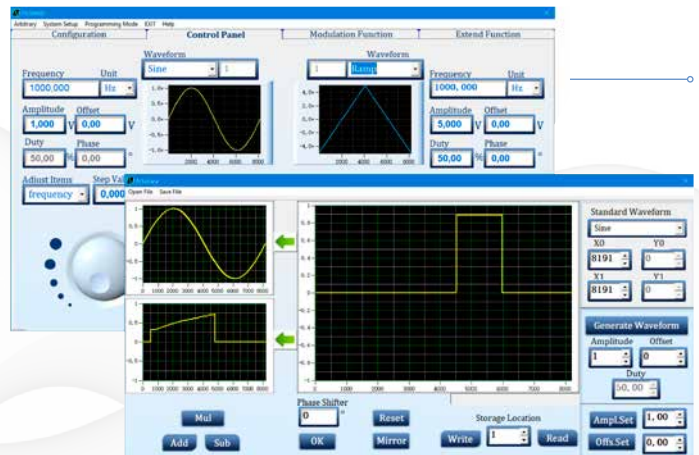


Bild 5. Mit der beiliegenden PC-Software lässt sich der Generator fernbedienen. Man kann auch eigene Wellenformen erstellen.

mit der FUNC-Taste aufgerufen. Die Daten können mit LOAD bzw. SAVE schnell in den Speicher eingegeben oder aus ihm abgerufen werden. Schließlich gibt es noch ein Systemmenü, das eine Reihe von Grundeinstellungen für den Generator enthält. Hier befinden sich auch die verschiedenen Einstellungen zur Synchronisation bestimmter Eigenschaften der beiden Ausgangskanäle (z. B. Frequenz oder Amplitude). Es besteht bei Bedarf auch die Möglichkeit, die Frequenz und/oder die Ausgangsamplitude zu kalibrieren.

Im Praxistest

Was beim Einschalten sofort auffällt, ist die Tatsache, dass der Generator sehr schnell hochfährt (innerhalb von 2 bis 3 Sekunden), obwohl wir es hier mit einer Entwicklung zu tun haben, die auf einem FPGA (Xilinx Spartan-6, **Bild 4**) basiert. Weniger erfreulich ist der eingebaute Piepser, der bei jedem Tastendruck ertönt. Zum Glück können Sie diesen im Systemmenü stummschalten. Was mich auch störte, war die Tatsache, dass beide Ausgänge sofort nach dem Einschalten aktiviert sind und ein Signal von 5 V_{SS} liefern. Ich habe das Problem gelöst, indem ich sie ausgeschaltet und diesen Zustand zusammen mit ein paar anderen Änderungen im ersten Programmspeicherplatz abgelegt habe. Wenn Sie den Generator das nächste Mal einschalten, wird er mit diesen Einstellungen initialisiert.

Die Standardwellenformen sehen durchweg gut aus. Die Puls-Signale besitzen schöne steile Flanken mit minimalem Überspringen, aber beim Sinus hätte ich einen etwas geringeren Klirrfaktor erwartet als die gemessenen -45 dB. Immerhin besitzt der D/A-Wandler eine Breite von 14 Bit. Die maximale Ausgangsamplitude hängt von der Ausgangsfrequenz ab: Unter 1 MHz beträgt sie 25 V_{SS}, bei höheren Frequenzen nimmt sie stufenweise ab, bis sie bei 3,6 V_{SS} zwischen 60 und 80 MHz endet. Beachten Sie, dass diese Werte für unbelastete Ausgänge gelten. Bei einem Abschluss an 50 Ω sinken sie auf die Hälfte ab. Der Generator zeigt leider nur den unbelasteten Amplitudenwert an. Eine Software-Option zur Eingabe eines RMS-Wertes wäre wünschenswert: Es kann nur ein Spitze-Spitze-Wert eingegeben werden. Wenn der Ausgang mit 50 Ω abgeschlossen ist und die Ausgangsspannung auf 1,5 V_{SS} eingestellt wird, bleibt die Ausgangsamplitude über einen Frequenzbereich bis 60 MHz konstant.

Die Programmiermöglichkeit ist ein netter Bonus, aber es dauert eine Weile, bis man diese Funktionalität richtig verstanden hat. Sie müssen zunächst jede der gewünschten Wellenformen mit der gewünschten Amplitude und weiteren Eigenschaften in ihren

individuellen Speicherplätzen ablegen. Diese Speicher können Sie dann in der von Ihnen festgelegten Reihenfolge mit Dauer und Anzahl der Wiederholungen in den Funktionsspeicher eingeben. Zur Überprüfung des Endergebnisses steht ein Debug-Modus zur Verfügung.

Mit der beiliegenden Software DDS Signal Generator (**Bild 5**) wird es möglich, den PSG9080 komplett vom Computer aus zu bedienen und auch zu programmieren. Die Benutzeroberfläche des Programms ist im Vergleich zu anderen Windows-Programmen vielleicht nicht ganz so ausgefeilt, aber alles, was ich ausprobiert habe, funktionierte ohne Probleme.

Guter Preis, viele Möglichkeiten

Für etwas mehr als 200 Euro bekommt man einen tollen Funktionsgenerator mit vielen Features, einem schönen Gehäuse, einem übersichtlichen Display und einem gut organisierten Bedienfeld. Ein paar kritische Anmerkungen habe ich zwar schon gemacht, aber mit denen kann man sicher leben. Insgesamt bietet der PSG9080 viele positive Eigenschaften und einen großen Frequenzbereich – Features, die man bei anderen Signalgeneratoren in dieser Preisklasse nicht findet. Ich denke, so mancher Elektroniker hätte gerne einen PSG9080 auf seinem Labortisch! ◀

210253-02



Passende Produkte



➤ **JOY-IT PSG9080 Programmierbarer Signalgenerator (80 MHz) (SKU 19669)**
www.elektor.de/joy-it-psg9080-programmable-signal-generator-80-mhz

WEBLINKS

- [1] SIMAC Electronics GmbH, „PSG 9080 Programmierbarer Signalgenerator“, 2021:
https://joy-it.net/files/files/Produkte/JT-PSG9080/JT-PSG9080_Anleitung_2021-03-12.pdf
- [2] PC-Software: <https://joy-it.net/de/products/JT-PSG9080>



CAN-FD-Anbindung per Ethernet

Die PCAN-Gateway-Produktfamilie von PEAK-System ermöglicht die Übertragung von CAN-Nachrichten über IP-Netzwerke. Mit dem PCAN-Ethernet Gateway FD DR veröffentlicht das deutsche Unternehmen ein neues Modell, das neben dem klassischen CAN auch den modernen CAN-FD-Standard unterstützt. Zwei High-Speed CAN-Schnittstellen ermöglichen die Anbindung von CAN-FD-Bussen mit Datenbitraten bis zu 10 Mbit/s. Die Verbindung zum IP-Netzwerk erfolgt über Ethernet. Ein AM5716-Sitara-Prozessor stellt die benötigte Leistung zur Verfügung.

Wird ein CAN-Bus mit einem PCAN-Ethernet Gateway FD DR ausgestattet, genügt eine LAN-Schnittstelle für den Zugriff auf den CAN-Bus mit einem oder mehreren Computern. Ein konventionelles CAN-Inter-

face ist nicht erforderlich. Bei Verwendung von zwei Gateways können weit entfernte CAN-Busse über ein IP-Netzwerk miteinander verbunden werden. Der limitierende Faktor der maximalen CAN-Bus-Länge spielt dabei keine Rolle.

Die Konfiguration der PCAN-Gateway-Produktfamilie erfolgt wie bei einem herkömmlichen Internet-Router über eine Weboberfläche. Dabei stehen Statusinformationen und Einstellungen der Kommunikationsschnittstellen, Nachrichtenweiterleitungen und Filter zur Verfügung. Alternativ ermöglicht eine JSON-Schnittstelle den Zugriff per Software.

www.peak-system.com

210238-02

Wall of Fame

Elektor International Media ist stolz darauf, Ihnen die Wall of Fame präsentieren zu können! Wir arbeiten mit führenden Elektronikunternehmen zusammen - von globalen Zulieferern bis hin zu Geräteherstellern - um über innovative Produkte und Dienstleistungen im High-Tech-Bereich zu berichten.

Die in der diesjährigen Wall of Fame gelisteten Unternehmen bieten Elektroingenieuren, Makern und Studenten ein breites Spektrum an unverzichtbaren Werkzeugen und Lösungen für die Entwicklung von spannenden Elektronikprojekten und -produkten!



Honeywell
THE POWER OF **CONNECTED**



M maxim
integrated™



Farnell
AN AVNET COMPANY



TRINAMIC
MOTION CONTROL



QUECTEL
Build a Smarter World



**TOUCHLESS
AUTOMATION**
special micro-handling solution



**KEYSIGHT
TECHNOLOGIES**



labcenter
electronics www.labcenter.com



EURO
CIRCUITS



swissbit®



M **MOUSER**
ELECTRONICS



SIGLENT®



M **HAMMOND**
W **MANUFACTURING**®



pico®
Technology



CONRAD

Weller[®]

SENSIRION

EBV Elektronik
| An Avnet Company |

COMSOL

multi-cb
PRINTED CIRCUIT BOARDS

INFRATec.

RONDE & SCHWARZ
Make ideas real

congatec

almit

ST
life.augmented

MICROCHIP

infineon

PEAK
System

reichelt
elektronik

T M
E
Electronic Components

COMARCH

PCBWay

sparkfun
START SOMETHING

WE
WÜRTH ELEKTRONIK

SCHURTER
ELECTRONIC COMPONENTS

ROHM
SEMICONDUCTOR

RS

PeakTech[®]

**Hier könnte
Ihr Logo stehen.
Informationen unter
+49 (0)241 955 09 178**



Bild 1. Der FieldFox Combo-Analysator von Keysight für den Millimeterwellen-Bereich (hier N995xB) ist auch als reiner Signalanalysator erhältlich.

Leistungsstarker Handheld-Mikrowellenanalysator

Der neue Keysight FieldFox Mikrowellenanalysator unterstützt den Frequenzbereich bis 54 GHz

Ein Beitrag von Keysight Technologies

Mit seinem neuen Hochleistungs-Handheld-Mikrowellenanalysator bringt Keysight Technologies ein Gerät auf den Markt, das die Installation von Radaranlagen sowie 5G- und Satelliten-Kommunikationssystemen erheblich beschleunigt.

Die weltweite Einführung des 5G New Radio (NR) Services im Millimeter-Band erhöht den Bedarf an kostengünstigen und mobil einsetzbaren Werkzeugen zur Prüfung, Überwachung und Fehlerdiagnose in Netzwerken – speziell auch im Hinblick auf die erhebliche Zunahme der Installation von Satelliten-Kommunikationssystemen.

Der neue FieldFox-Mikrowellenanalysator [1] von Keysight unterstützt einen erweiterten Frequenzbereich mit einer Messgenauigkeit, die mit im Labor verwendeten Tools vergleichbar ist (**Bild 1**). Als kompaktes und robustes

Mehrzweckwerkzeug ermöglicht er zuverlässige Messungen der wichtigsten Leistungsindikatoren (KPIs) eines Netzwerks im Feld, wenn es um die Installation von Infrastrukturen im Millimeter-Wellenbereich geht (**Bild 2**). „Unser neuer Analysator bietet eine hohe HF-Leistung bei gleichzeitig geringen Abmessungen, was speziell für den mobilen Einsatz wichtig ist“, sagt Dan Dunn, Vice President von *Keysight Aerospace and Defense Government Solutions*. „Ab jetzt sind 5G-Mobilfunkbetreiber, Installationsunternehmen, Satelliten- und Bodenstations-Dienstleister sowie militärische Organisationen in der Lage, fortschrittliche Kommunikationssysteme schnell und effizient einzusetzen.“

Der neue Handheld-Analysator kann mit seiner anwendungsorientierten Benutzeroberfläche für Spektrum- und Signalanalysen sowie für die Signalerzeugung genutzt werden. Außerdem lassen sich Störungen in Signalen, Antennen- und Kabelleitungen, Expositionspegel elektromagnetischer Felder (EMF) sowie Pfadverluste in Kommunikati-

onssystemen mit hoher Genauigkeit messen. Der FieldFox von Keysight stellt sicher, dass 5G-Dienste im Frequenzbereich 2 (FR2) das volle Potenzial der geforderten Konnektivität ausschöpfen können. Der Analysator basiert auf der FieldFox B-Serie des Unternehmens, die im Mai 2019 eingeführt wurde.

Hier die wichtigsten Vorteile:

- Vereinfacht die Einrichtung und verbessert die Mess-Ergebnisse in jedem 3GPP-spezifizierten Band im Frequenzbereich 2 (FR2) durch die Erweiterung des Frequenzbereichs auf 54 GHz, ohne dass externe Mischer erforderlich sind.
- Unterstützt fortschrittliche Kanalaggregation und komplexe Störungssuche mit einem erweiterten Analysebandbreiten-Bereich von bis zu 120 MHz.
- Ermöglicht die sichere Messung und Analyse von Signalen im Millimeterbereich mit komplexen Modulationsschemata wie zum Beispiel der 256 Quadratur-Amplituden-Modulation (QAM).



Bild 2. Die wasserdichte, robuste und anwendungsorientierte Benutzeroberfläche des FieldFox vereinfacht die Messungen im Feld auf erhebliche Weise, ganz gleich unter welchen Bedingungen.

- Liefert eine zuverlässige Analyse komplexer Signale mit branchenführend niedrigem Phasenrauschen, hoher Empfindlichkeit und Amplitudengenauigkeit.
- Bietet 5G NR Beamforming-Analyse mit Phased-Array-Antennensteuerung, die für den Einsatz der MIMO-Technologie (Multiple Input, Multiple Output) entscheidend ist. ◀

210273-02

WEBLINK

[1] Infos zum FieldFox: <http://www.keysight.com/us/en/cmp/2021/mmwave-fieldfox.html>



AXS

NEW DIMENSIONS











Digital Ergonomics

axsco.com

Der Elektor Store

Nie teuer, immer überraschend!

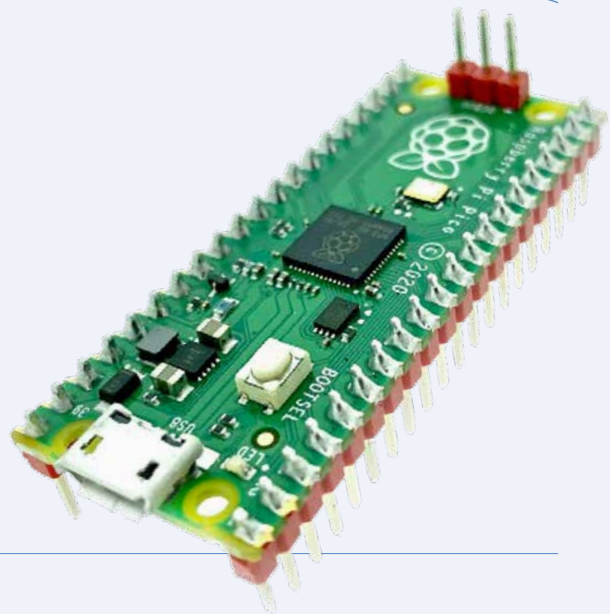
Der Elektor Store hat sich vom Community-Store für Elektor-eigene Produkte wie Bücher, Zeitschriften, Bausätze und Module zu einem umfassenden Webshop entwickelt, der einen großen Wert auf überraschende Elektronik legt. Wir bieten die Produkte an, von denen wir selbst

begeistert sind oder die wir einfach ausprobieren wollen. Wenn Sie einen Produktvorschlag haben, sind wir hier erreichbar (sale@elektor.com).
Unsere Bedingungen:
Nie teuer, immer überraschend!

Raspberry Pi Pico (mit bestückten Headern)

Preis: 9,95 €

 www.elektor.de/19568



JOY-IT JT-RD6006 Labornetzteil (360 W)



Preis: 89,95 €

Mitgliederpreis: 80,96 €

 www.elektor.de/19564

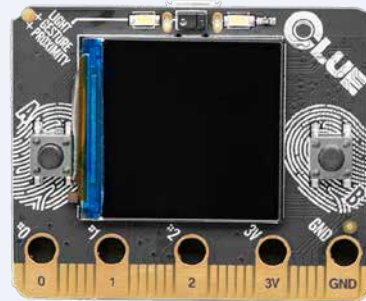


IQaudIO DigiAMP+ DAC & Class-D-Verstärker für Raspberry Pi

Preis: 29,95 €

Mitgliederpreis: 26,96 €

www.elektor.de/19538



Adafruit CLUE – nRF52840 Express mit Bluetooth LE

Preis: 49,95 €

Mitgliederpreis: 44,96 €

www.elektor.de/19512

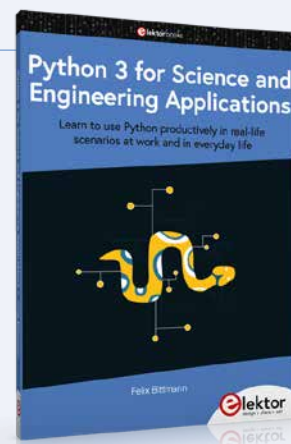


IoTize TapNLink Primer NFC-BLE-WiFi Evaluation Kit

Preis: 59,95 €

Mitgliederpreis: 53,96 €

www.elektor.de/19494



Python 3 for Science and Engineering Applications

Preis: 29,95 €

Mitgliederpreis: 26,96 €

www.elektor.de/19441

Beiträge von: ————— Inserentenverzeichnis —

AXS Motionsystem	
Hier kommt die digitale Ergonomie!	
Harry Baggen	
Joy-IT PSG9080 DDS-Funktionsgenerator	
Stuart Cording (Elektor)	
Vorhersage statt Vorausschau - Wartung in Zeiten von KI	
Andrea Garrapa	
Edge Impulse: KI für Mikrocontroller	
Carlo Gavazzi	
Smartes Prüf- und Programmiergerät für IO-Link-Sensoren	
Keysight Technologies	
Leistungstarker Handheld-Mikrowellenanalysator	
Helmuth Lemme	
Vier bahnbrechende Sensorentwicklungen	
PEAK-System	
CAN-FD-Anbindung per Ethernet	
Alfred Rosenkränzer	
Verzerrungen bei 10 MHz messen	
SIGLENT Technologies	
Messtechniklösungen für die Entwicklung von Leistungselektronik	
Thomas-Krenn.AG	
Kostenlose LoRa-Entwicklungskits	
Daniele Valanzuolo	
Die technische Evolution der Sensoren	
Würth Elektronik eiSos	
MEMS-Sensormodule mit integrierten Algorithmen	
Robert van der Zwan	
Infografiken	

Würth Elektronik eiSos	3
Thomas-Krenn.AG	9
Mouser	11
PEAK-System	21
SIGLENT Technologies	23
AXS Motionsystem	47



Nächste Ausgabe

Die Ausgabe 3/2021 des Magazins Elektor Industry ist unser Spezial-Heft zur productronica, einer führenden Messe für Elektronikentwicklung und -produktion, die vom 16. bis zum 19. November in München stattfindet. Hintergrundberichte und News aus allen Bereichen der Elektronik kommen von Unternehmen, Branchenspezialisten, Elektor-Redakteuren und freien Autoren.

Die Elektor Industry Ausgabe 3/2021 erscheint am 11. November 2021. Änderungen vorbehalten.

Treten Sie jetzt der Elektor Community bei!

Jetzt



Mitglied werden!



- ✓ Komplettes Webarchiv ab 1970
- ✓ 6x Elektor Doppelheft (Print)
- ✓ 9x Digital (PDF) inkl. Elektor Industry
- ✓ 10% Rabatt im Online-Shop und exklusive Angebote
- ✓ Elektor Jahrgangs-DVD

- ✓ Mit Tausenden von Mitgliedern des Online-Labors gemeinsam entwickeln mit Zugang zu über 1.000 Gerber-Dateien und direktem Kontakt zu unseren Experten!
- ✓ Veröffentlichen Sie Ihr eigenes Projekt oder verkaufen Sie direkt über unseren Shop!

Auch erhältlich

Die digitale
Mitgliedschaft!



- ✓ Zugang zu unserem Webarchiv
- ✓ 10% Rabatt in unserem Online-Shop
- ✓ 6x Elektor Doppelheft (PDF)
- ✓ Exklusive Angebote
- ✓ Zugang zu über 1.000 Gerber-Dateien



www.elektor.de/mitglied

Jede Bewertung spiegelt ein persönliches Erlebnis wider

"Alles Prima wenn man bei Elektor bestellt."



by Sebastian

Rated 4.2 / 5 | 20 reviews



"Seit Anfang an Super – Ich lese seit 40 Jahren Elektor, und das nach wie vor mit Freude. Den Tag an dem das neue Heft veröffentlicht wird habe ich mir im Kalender markiert."

★★★★★ by Martin Pietsch-Tillenburg

Rated 4.2 / 5 | 20 reviews

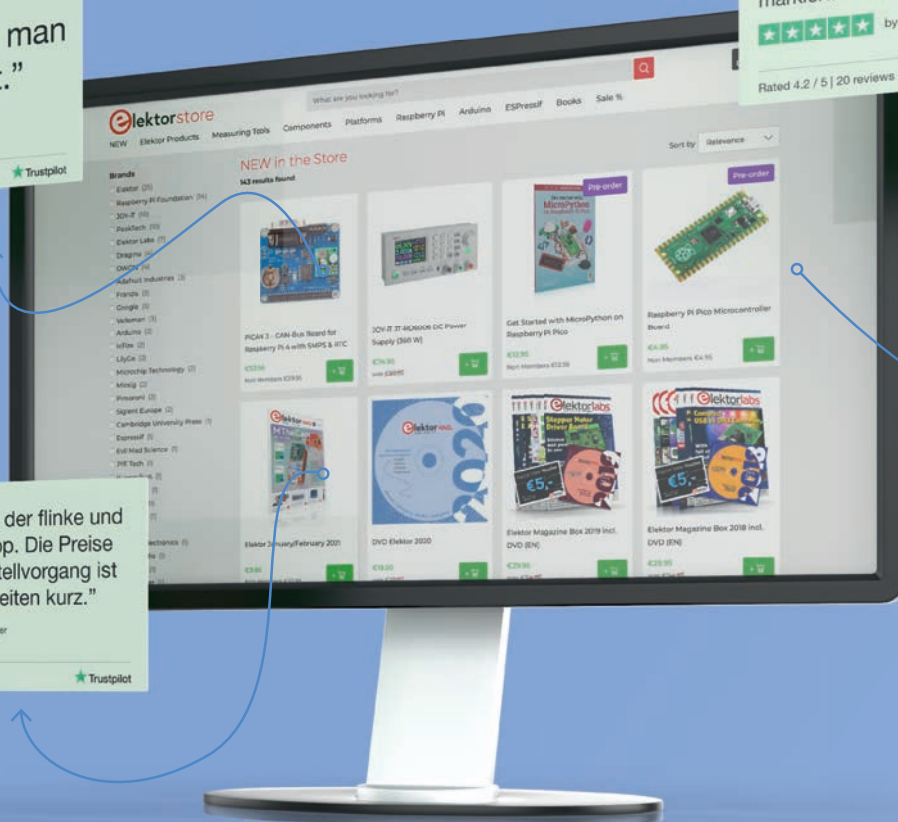


"Tadellos – Mir gefällt der flinke und übersichtliche WebShop. Die Preise sind moderat, der Bestellvorgang ist einfach und die Lieferzeiten kurz."



by Herr Guenter Maringer

Rated 4.2 / 5 | 20 reviews



Wir lieben Elektronik und Projekte, und wir setzen alles daran, die Bedürfnisse unserer Kunden zu erfüllen

Der Elektor-Store: 'Never expensive, always surprising'

Elektor Deutschland is rated **Excellent**

Based on 30 reviews



Trustpilot

Sehen Sie sich weitere Bewertungen auf unserer Trustpilot-Seite an: www.elektor.de/TP

Oder bilden Sie sich selbst eine Meinung und besuchen Sie unseren Elektor Store, www.elektor.de

