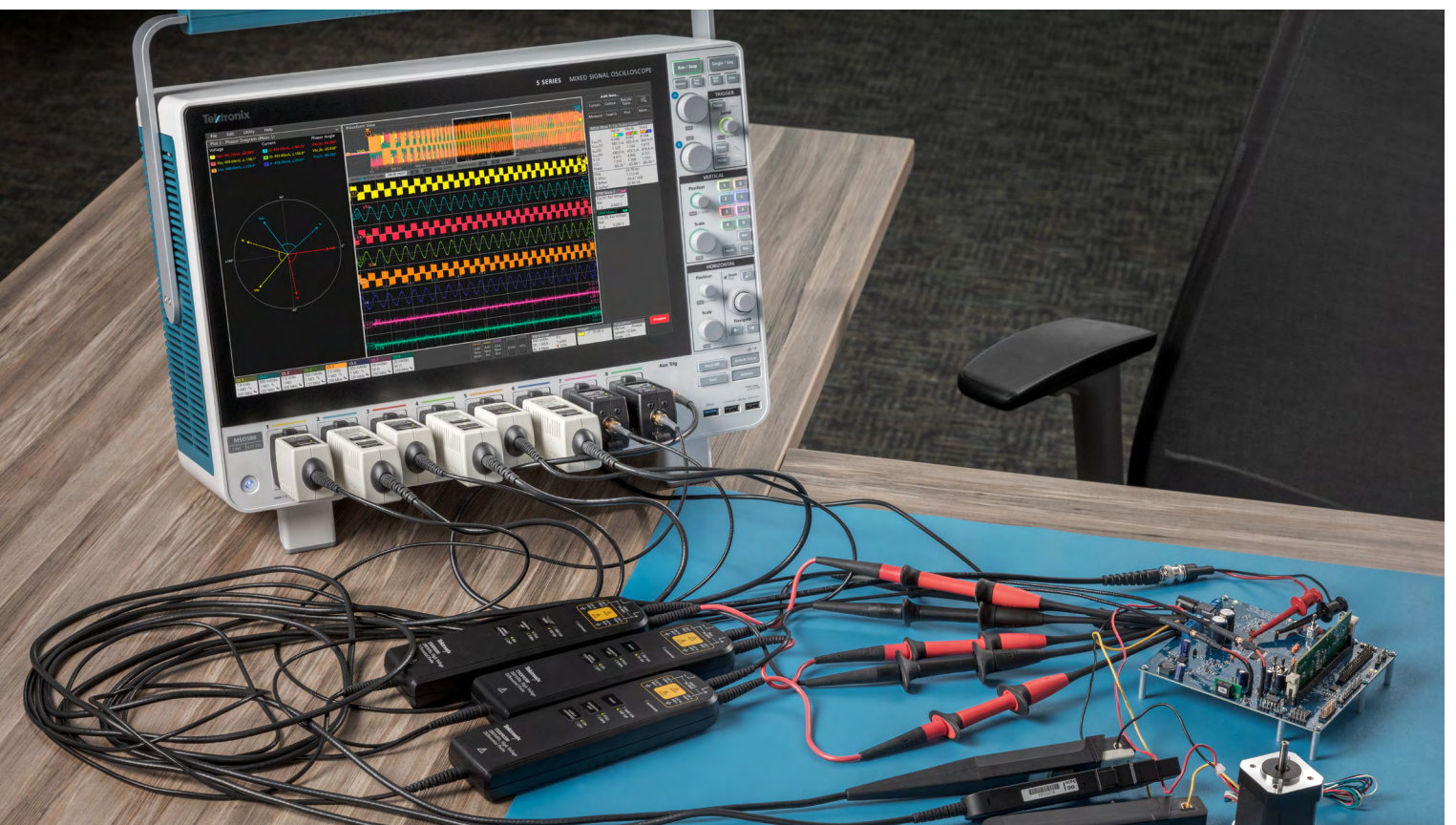


# Messsystem für 3-phasige Antriebe mit variabler Frequenz.

(VFDs, Variable  
Frequency Drives).



Moderne Motorantriebssysteme verwenden i. d. R. eine Form der Modulation, um die Frequenz und damit die Drehzahl eines Motors zu steuern (Abb. 1). In den meisten Fällen geben diese Antriebe mit variabler Frequenz (Variable Frequency Drives, VFD) hierfür präzise, pulsweitenmodulierte Wellenformen aus (PWM, Pulsweitenmodulation). Der Strom solcher Systeme ist üblicherweise 3-phasig, was der optimalen Konfiguration für Elektromotoren entspricht.

AC-Asynchronmotoren (ACIMs, AC Induction Motors) gelten als besonders zuverlässig, leistungs- und kosteneffizient. Zudem ist ihr Wartungsbedarf gering. Es gibt aber auch andere Arten von Motoren und Antrieben mit jeweils charakteristischen Merkmalen. So sind bürstenlose Gleichstrommotoren (BLDC, brushless DC) und Permanentmagnet-Synchronmotoren (PMSM, permanent magnet synchronous motors) wiederum effizienter und leichter als AC-Induktionsmotoren, erfordern allerdings komplexere Steuerungsalgorithmen.

Alle Antriebsformen verwenden Techniken zur Pulsweitenmodulation, um die an den Motor gelieferte Frequenz und Spannung zu variieren.

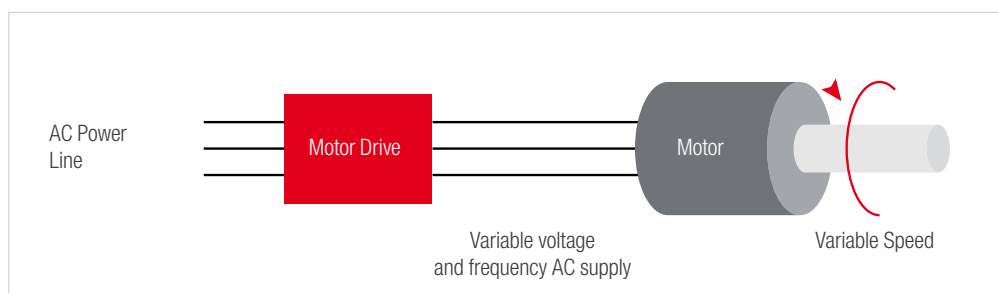


Abbildung 1: Der Motorantrieb moduliert den Eingang zum Motor, um Drehzahl und Drehmoment zu steuern.

## 3-Phasen-Systeme mit dem Oszilloskop messen.

Pulsweitenmodulierte Wellenformen können die Durchführung stabiler Oszilloskopmessungen zu einer Herausforderung machen. So muss zum einen die Ausgangsleistung des Antriebs gemessen werden. Zum anderen ist die Leistungsbewertung der Eingangsstufen, z. B. die Oberschwingungen, Leistung und der Leistungsfaktor, relevant. Mechanische Messungen können auch mit Sensoren durchgeführt werden. Bei so vielen Signalen ist eine sorgfältige Verwaltung der Messkanäle erforderlich, um mit einem Oszilloskop einen guten Einblick in das System zu erhalten.

Dreiphasige Systeme zu messen und zu analysieren ist grundsätzlich anspruchsvoller als bei einphasigen Energiesystemen. Antriebe und Leistungswandler, die die Puls-

weitenmodulation nutzen, erschweren solche Messungen aufgrund der erforderlichen Filterung und Triggerung der PWM-Signale zusätzlich.

Die Oszilloskope MSO 5B/6B von Tektronix sind in ihrer Anwendung sehr vielseitig; sie können die Leistung von Steuerschaltkreisen und Leistungswandlern präzise messen. Ihr Einsatz während der Validierungsphase und zur Fehlerbehebung erweist sich daher als besonders nützlich. Mit einem geeigneten Tastkopf lassen sich Messungen mit hoher Bandbreite und über einen weiten Messbereich durchführen. Eine spezielle Software-Anwendung (IMDA, Inverter Motor Drive Analysis) für 3-phasige Antriebe ermöglicht schnelle, wiederholbare Analysen.

## Dreiphasiger Antrieb mit variabler Frequenz (VFD) – Funktionsprinzip.

Ein typisches Motorantriebssystem wird über einen 3-phasi- gen AC-Stromeingang gespeist, der nachfolgend eine Antriebs- oder Stromumrichter-Komponente versorgt.

Der Antriebsbereich besteht aus drei Hauptblöcken:

- > Ein Gleichrichter, der Wechselstrom in Gleichstrom umwandelt
- > Ein Gleichstrombus
- > Ein Wechselrichter, der die Gleichspannung in ein Wechselstromsignal umwandelt (i. d. R. eine PWM-Wellenform)

PWM-basierte Antriebe können mit Gleichstrom, 1-phasi- gem AC oder dreiphasigem Wechselstrom betrieben werden. Abbildung 2 zeigt einen VFD, der von einer dreiphasigen Stromversorgung gespeist wird, wie sie in

Industrieanlagen üblich ist. Die 3-Phasen-Versorgung wird gleichgerichtet und gefiltert, um einen Gleichstrombus zu generieren, der wiederum den Wechselrichter des Antriebs versorgt.

Der Wechselrichter besteht aus drei Paaren von Halbleiter- Schaltungen (MOSFET, GTO, Leistungstransistor, IGBT usw.) mit zugehörigen Dioden. Jedes Schaltungspaar liefert die Ausgangsleistung für eine Phase des Motors. Diese Grundarchitektur kann an verschiedene Motortypen ange- passt werden, wobei sich die Steuerelektronik in Bezug auf Rückkopplung und Komplexität stark unterscheidet.

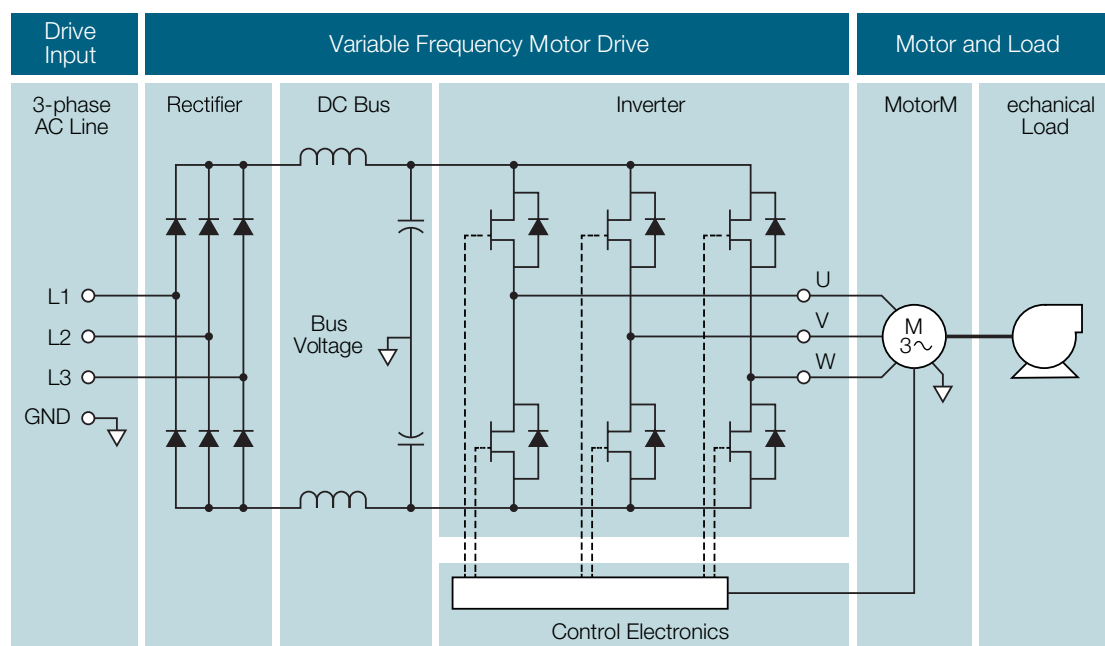


Abbildung 2: 3-Phasen-Motorantrieb, aufgeteilt in Funktionsblöcke.

# Leistungsmessung in 3-phasigen Systemen.

Im Labor werden für jede der drei Phasen typische Leistungsmessungen durchgeführt, um nachzuvollziehen, wie ein Gerät die von der 3-phasigen AC-Stromleitung gelieferte Energie verbraucht. Dies umfasst:

- > Strom-, Spannungsmessungen
- > Die Messung von Wirk-, Schein- und Blindleistung, Phasenwinkel und Leistungsfaktor
- > Frequenzmessungen

Ein Phasordiagramm (Abb. 3) ermöglicht es, zusätzlich zur numerischen Anzeige von Effektivspannung und -strom auch die Spannungs- und Strombeziehungen schnell zu erkennen. Anomalien und Phasenverschiebungen, die sich auf den Leistungsfaktor auswirken, sind sofort sichtbar. Der Leistungsfaktor ist eine wichtige Spezifikation, denn er

wirkt sich direkt auf den Strompreis der Endkunden aus. In einigen Antrieben ist eine Schaltung vorhanden, die den Leistungsfaktor aktiv steuert.

Durch Messung der Harmonischen erhält man die RMS-Amplitude (Grundfrequenz) und die Oberschwingungen eines Signals (Abb. 4). Die Auswertung der Messung erfolgt nach benutzerspezifischen oder nach vordefinierten, normkonformen Grenzwerten (IEEE-519, EN 61000-3-2 etc.). Mit den Oszilloskopen von Tektronix lassen sich beispielsweise die Grenzwerte gemäß DIN EN 61000-3-12 als csv-Datei laden und in die Messung mit einbeziehen. Die Testergebnisse können in Form eines detaillierten Berichts aufgezeichnet und mit dem entsprechenden Statusvermerk „bestanden“ / „nicht bestanden“ angezeigt werden.

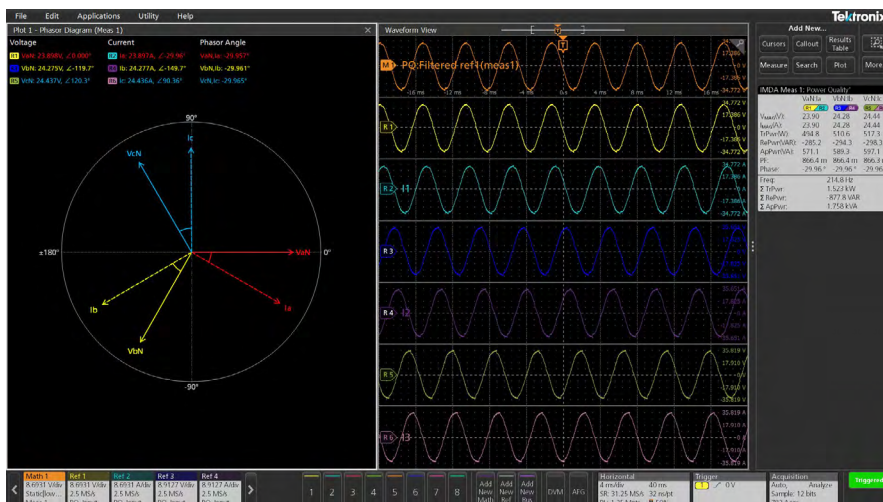


Abbildung 3: Messung der Versorgungsqualität auf der Eingangsseite eines Motorantriebs.

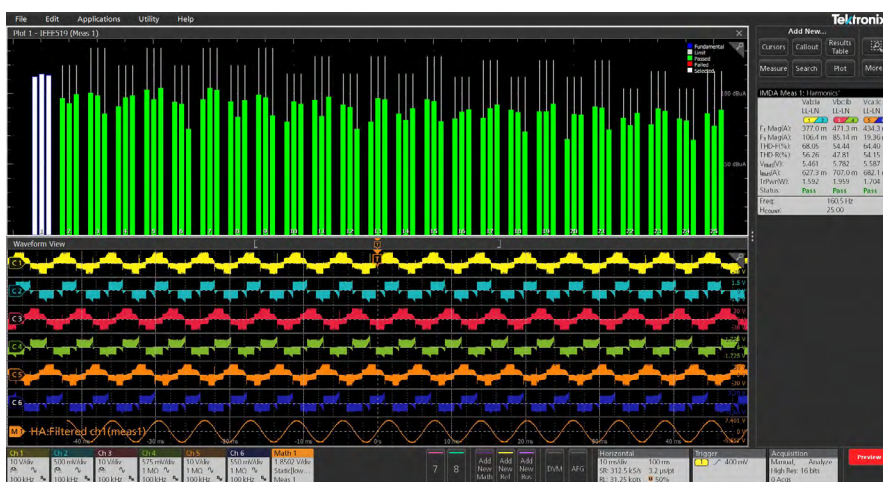


Abbildung 4: Oberschwingungen können sowohl am Eingang als auch am Ausgang eines Motorantriebs gemessen werden. Dieses Beispiel zeigt Oberschwingungen am 3-phasigen Ausgang eines Antriebs.

## Analyse der Restwelligkeit.

Die Restwelligkeit ist definiert als die verbleibende (unerwünschte) Wechselspannung an einer konstanten Gleichstromkomponente. Sie zeigt an, wie effizient das Eingangssignal von Wechselstrom in Gleichstrom umgewandelt wird und welchen Einfluss unerwünschte Komponenten auf das modulierte Ausgangssignal haben. Die Messung erfolgt üblicherweise auf dem Gleichstrombus, kann aber auch auf den Halbleiter-Schaltungen vorgenommen werden (Abb. 5).

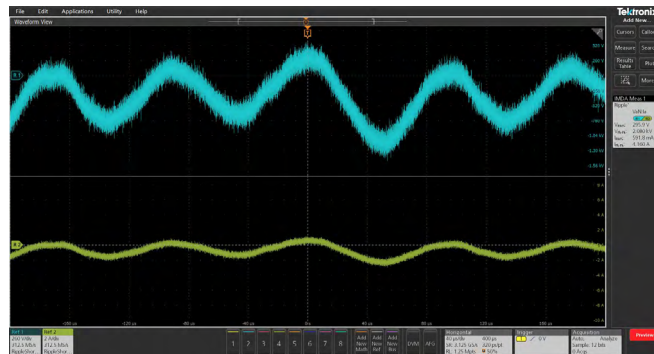


Abbildung 5: Restwelligkeit auf dem DC-Bus.

## d/q-Transformation (DQ0, Direct-Quadrature-Zero Transformation).

Vektorregelungssysteme nutzen die Clarke-Transformation mit anschließender d/q-Transformation (Park-Transformation), um 3-Phasen-Signale durch Darstellung der Regelvektoren d und q zu vereinfachen. Die Messung dieser Vektoren verifiziert die korrekte Funktion des Regelsystems, z. B. ein FPGA. Häufig werden diese wichtigen Variablen tief im Regelsystem verborgen berechnet und nicht als externe Signale ausgegeben, sodass sie für direkte Messungen nicht verfügbar sind.

Die IMDA-Software (Inverter Motor Drive Analysis) für Tektronix-Oszilloskope MSO 5B und 6B bietet Optionen für die DQ0-Analyse\*. Hier werden die Regelvektoren d und q basierend auf den Ausgangssignalen des Antriebs abgeleitet, sodass ein Soll/Ist-Abgleich der Leistung erfolgen kann und die Auswirkungen von Systemanpassungen direkt erkennbar sind. Die Ergebnisse werden als Phasordiagramm, transformierte Signale und als skalare Werte dargestellt (Abb. 6).

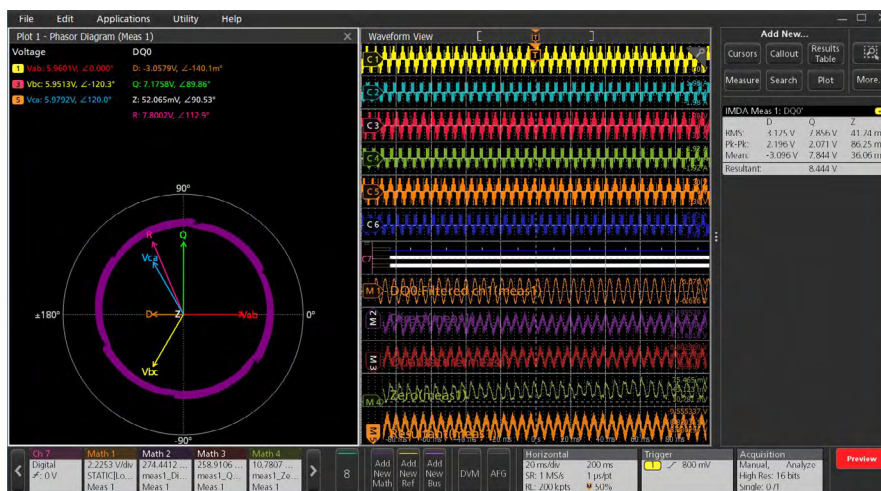


Abbildung 6: DQ0-Phasordiagramm mit d/q-Vektor und der Resultierenden (R). Motordrehzahl und Richtungs-rückmeldung werden von einem Quadratur-Encoder-Sensor geliefert.

\* Optionen 5-IMDA-DQ0 und 6-IMDA-DQ0

# Mechanische Analyse.

Die IMDA Software-Option für mechanische Analysen (IMDA-MECH) unterstützt Hall-, Resolver- und Quadrature-Encoder-Interface-Sensoren (QEI), um Parameter wie Winkel, Drehzahl, Beschleunigung und Richtung eines Motors zu ermitteln. Die entsprechenden Messungen können mit wenigen Einstellungen ganz einfach konfiguriert werden.

Hall-Effekt-Sensoren werden für die Positionsrückmeldung (ans Steuersystem) genutzt. Sie werden zum Beispiel in BLDC-Motoren eingesetzt, um die Rotorposition zu über-

wachen und die Kommutierung zu synchronisieren. Ihr Output kann zur Berechnung von Geschwindigkeit, Beschleunigung und Richtung verwendet werden (Abb. 7).

Die IMDA-Software kann über die Ausgänge der Hall-Sensoren (i. d. R. drei Sensoren) die Motordrehzahl und -beschleunigung aufzeichnen. Um die Messung einzurichten, geben Sie die Anzahl der Polpaare und das Übersetzungsverhältnis an, damit die Software die Geschwindigkeit richtig messen kann (Abb. 8).

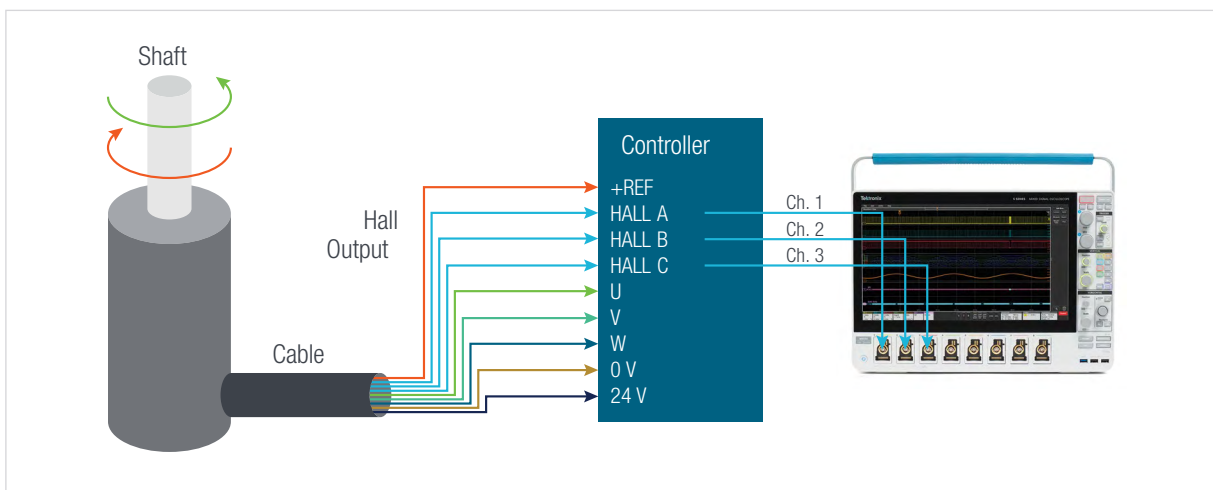


Abbildung 7: MSO-Oszilloskope der Serie MSO 5B/6B können an die Ausgänge der Hall-Effekt-Sensoren angeschlossen werden, um die Geschwindigkeit, Beschleunigung und Richtung zu messen.

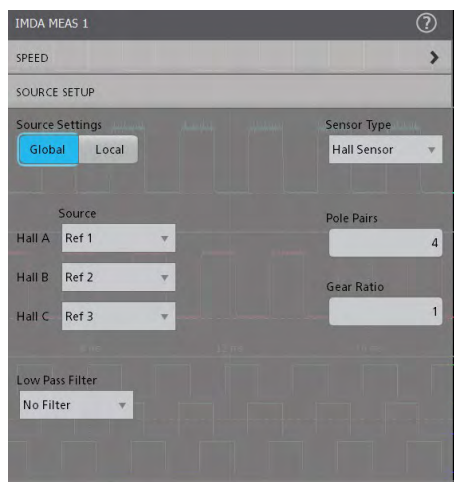


Abbildung 8: Konfigurieren einer Geschwindigkeitsmessung auf dem Oszilloskop für ein System mit Hall-Sensoren.

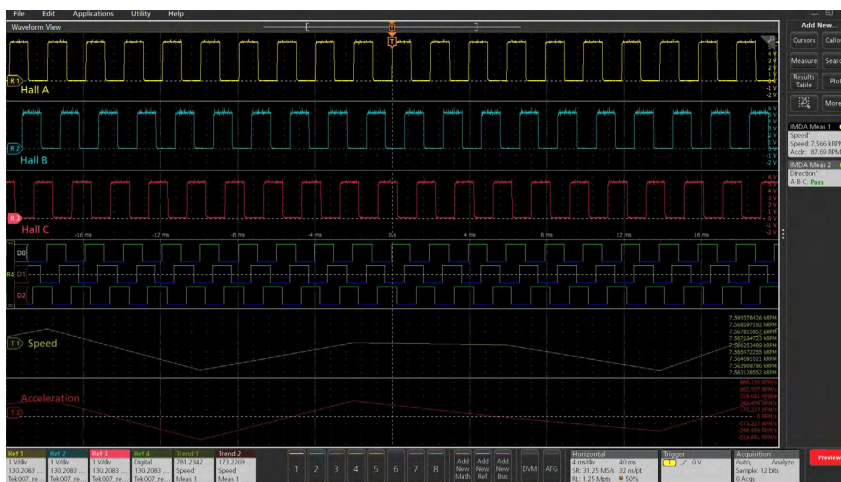


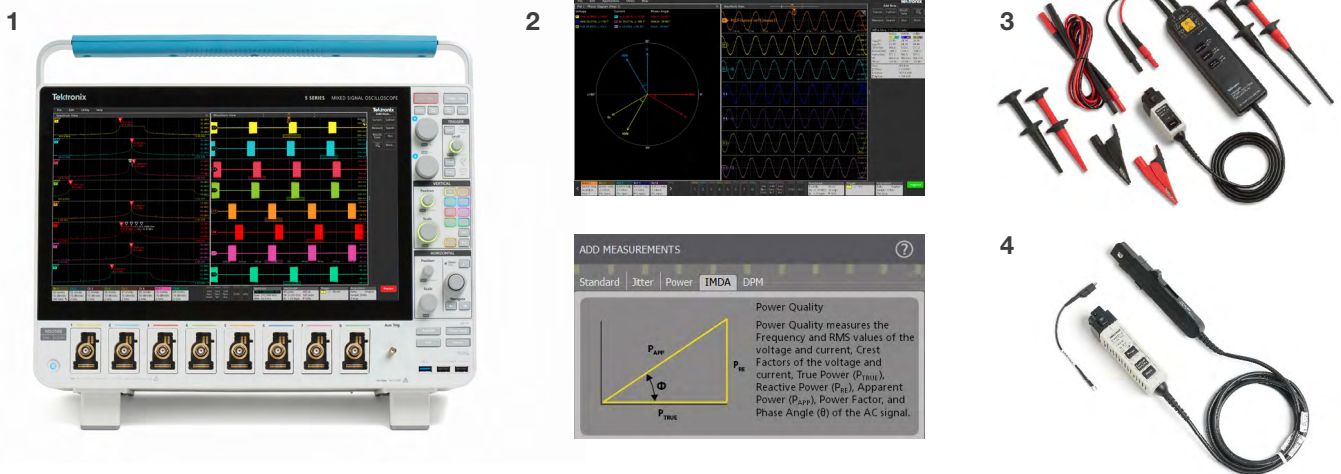
Abbildung 9: Wellenformen und Messungen eines Hall-Sensors. Die beiden Kurven am unteren Rand der Anzeige sind Trenddiagramme für die Geschwindigkeit und Beschleunigung.

# Zusammenfassung.

Die Messung an 3-Phasen-Motorantrieben stellt eine besondere Herausforderung dar aufgrund der erforderlichen Anschlüsse, der komplexen PWM-Wellenformen und der anfallenden Datenmenge. Die spezielle IMDA-Software (Inverter Motor Drive Analysis) für die Tektronix-Oszilloskope der Serien MSO 5B und 6B vereinfacht solche Messungen erheblich. Sie verbindet die Leistungsmessung mit den Vorteilen eines Hochgeschwindigkeits-Abtastsystems und der Visualisierung von Echtzeit-Oszilloskopen.

Mit dem Oszilloskop können Entwickler ihre 3-phasigen Antriebe sowohl unter statischen als auch unter dynamischen Betriebsbedingungen analysieren und hierbei die elektrischen und mechanischen Parameter kontrollieren. Dies schafft einen umfassenden Einblick in die Leistung des Motorantriebs. Die hohe Abtastrate und Verarbeitungsgeschwindigkeit der Oszilloskope MSO 5B/6B ermöglichen sogar DQ0-Messungen, was den Funktionsumfang herkömmlicher Leistungsanalysatoren zum jetzigen Zeitpunkt übertrifft.

## dataTec Referenzsystem für die Fehlerbehebung und Charakterisierung von VFDs.



Das Testsystem für 3-phasige VFDs (variable frequency drives) basiert auf einem Oszilloskop der Serie MSO 5B von Tektronix. Es ermöglicht Messungen auf Systemebene unter Überwachung der VFD-Schaltung. Die hohe Abtastrate und

lange Aufzeichnungslänge ermöglichen detaillierte Ansichten bis in den GHz-Bereich. Für diese Anwendung stehen vielfältige Tastköpfe zur Verfügung. **Das Bild auf dem Titel zeigt das genannte Testsystem am Arbeitsplatz.**

### Beispiel Messsystem für VFDs:

- 1: **MSO 5B-Serie:** Oszilloskop, 8 Kanäle und 12-Bit-ADC
- 2: **Option IMDA:** automatisiert 3-Phasen-Messungen mit dem Oszilloskop
- 3: **THDP0200:** (3x) Hochspannungs-Differenzspannungstastköpfe, 100 MHz und bis zu 1.500 V
- 4: **TCP0030A:** (3x) AC/DC-Stromtastkopf mit 30 A



**dataTec**

Mess- und Prüftechnik. Die Experten.

**dataTec AG**  
**Ferdinand-Lassalle-Str. 52**  
**72770 Reutlingen**

**Telefon +49 7121 / 51 50 50**  
**Telefax +49 7121 / 51 50 10**  
**E-Mail [info@datatec.eu](mailto:info@datatec.eu)**

**>>> [www.datatec.eu](http://www.datatec.eu)**

---