

Zustandsüberwachung durch intelligente Frequenzumrichter

Die Entwicklung von **industriellen Automatisierungssystemen**

Mit dem Übergang zum jetzigen Jahrtausend haben wir einen tiefgreifenden technologischen Wandel erlebt, der letztlich zu einer völlig neuen Arbeitsweise in einer digitalen Welt führt. Dies ist die vierte industrielle Revolution. Die erste industrielle Revolution ereignete sich im 18. und 19. Jahrhundert. Es handelte sich um eine mechanische Revolution, die mit der Erfindung der Dampfmaschine ihren Anfang nahm. Gegen Ende des 19. und Anfang des 20. Jahrhunderts folgte die zweite industrielle Revolution mit Einführung der Massenproduktion, Elektrifizierung und den Veränderungen in der Kommunikation. Diese Periode wird auch als „Elektrische Revolution“ bezeichnet. Die dritte industrielle Revolution im ausgehenden 20. Jahrhundert brachte Fortschritte in den Bereichen Halbleiter, Computer, Automatisierung und Internet. Diese Phase wird auch als „Digitale Revolution“ bezeichnet.

Die vierte industrielle Revolution ist das Ergebnis einer Vernetzung von Computern, Menschen und Geräten, die durch Daten und maschinelles Lernen vorangetrieben wird. Auch wenn der Begriff etwas vage erscheint, beschreibt „Industrie 4.0“ im Wesentlichen die intelligente Vernetzung von Menschen, Geräten und Systemen unter Nutzung aller Möglichkeiten der Digitalisierung über die gesamte Wertschöpfungskette hinweg.

Trends bei **Automatisierungssystemen der Industrie 4.0**

Die Auswirkungen von Industrie 4.0 auf Motorensysteme sind der Übergang von der „Automatisierungspyramide“ zu „vernetzten Systemen“. Das bedeutet, dass die verschiedenen Elemente des Systems – wie Motoren, Frequenzumrichter, Sensoren und Steuerungen – miteinander verbunden sind und mit einer Cloud interagieren – einem Datenzentrum, in dem Daten gespeichert, verarbeitet, analysiert und Entscheidungen getroffen werden.

Abbildung: Automatisierungspyramide

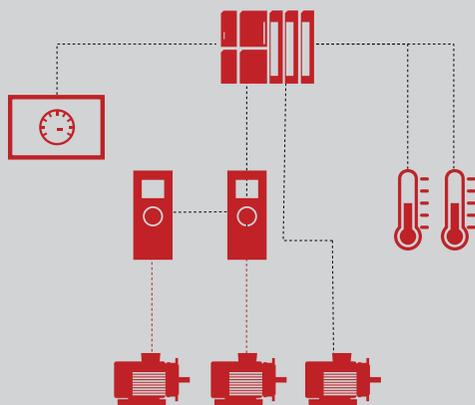
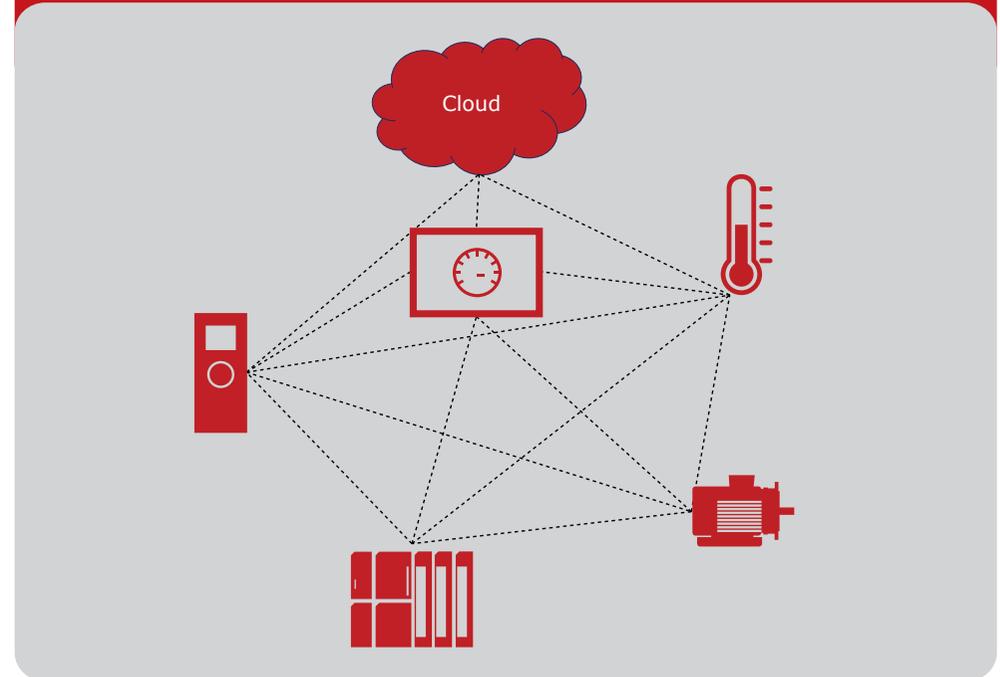




Abbildung: Automatisierungsnetzwerk



In einem Automatisierungsnetzwerk ist die Datenmenge von großer Bedeutung. Da Daten vornehmlich von Sensoren erfasst werden, nimmt deren Zahl in modernen Automatisierungssystemen zu. Motoren und angetriebene Maschinen wie Lüfter, Pumpen und Förderbänder zählen nicht zu den naheliegendsten Teilnehmern in einem Datennetzwerk. Deshalb werden Sensoren benötigt, um Daten von diesen Maschinen zu sammeln. Die Sensoren werden unter Verwendung von Schnittstellen an das Datennetzwerk angeschlossen, um deren Daten zu verarbeiten. Bei der Einführung eines modernen Zustandsüberwachungssystems werden die zusätzlichen Kosten für Sensoren und deren Anschlussfähigkeit oft als Hindernis angesehen.

Moderne drehzahlgeregelte Antriebe eröffnen im Automatisierungsnetzwerk der Industrie 4.0 neue Möglichkeiten. Traditionell werden Frequenzumrichter als Geräte zur Regelung der Motordrehzahl betrachtet. Inzwischen sind sie aber auch Teil der Informationskette geworden. Man nutzt dafür ihre integrierte Rechenleistung, Speicherkapazität und die Kommunikationsschnittstelle.

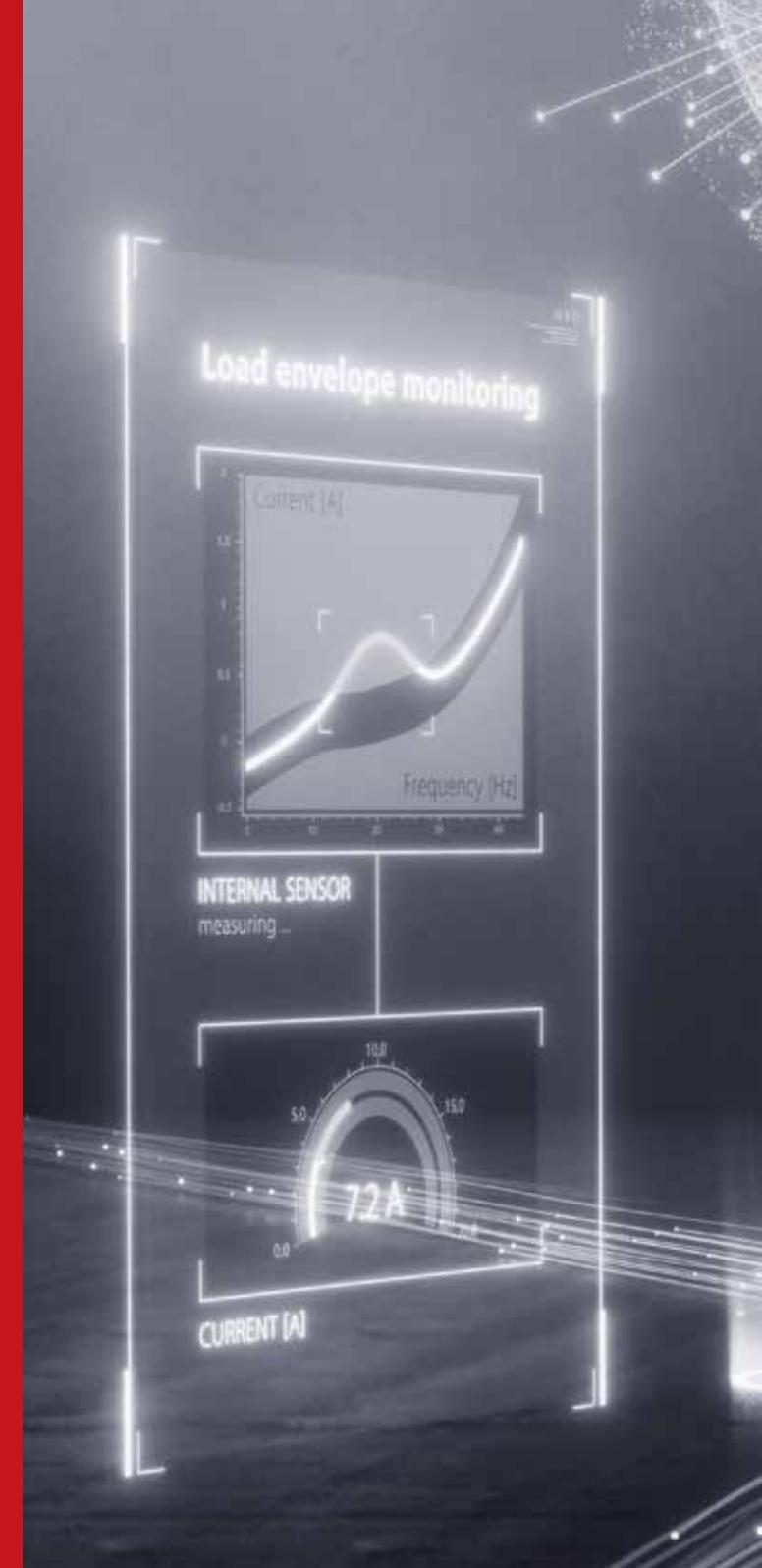
Was ist ein **intelligenter Frequenzumrichter**?

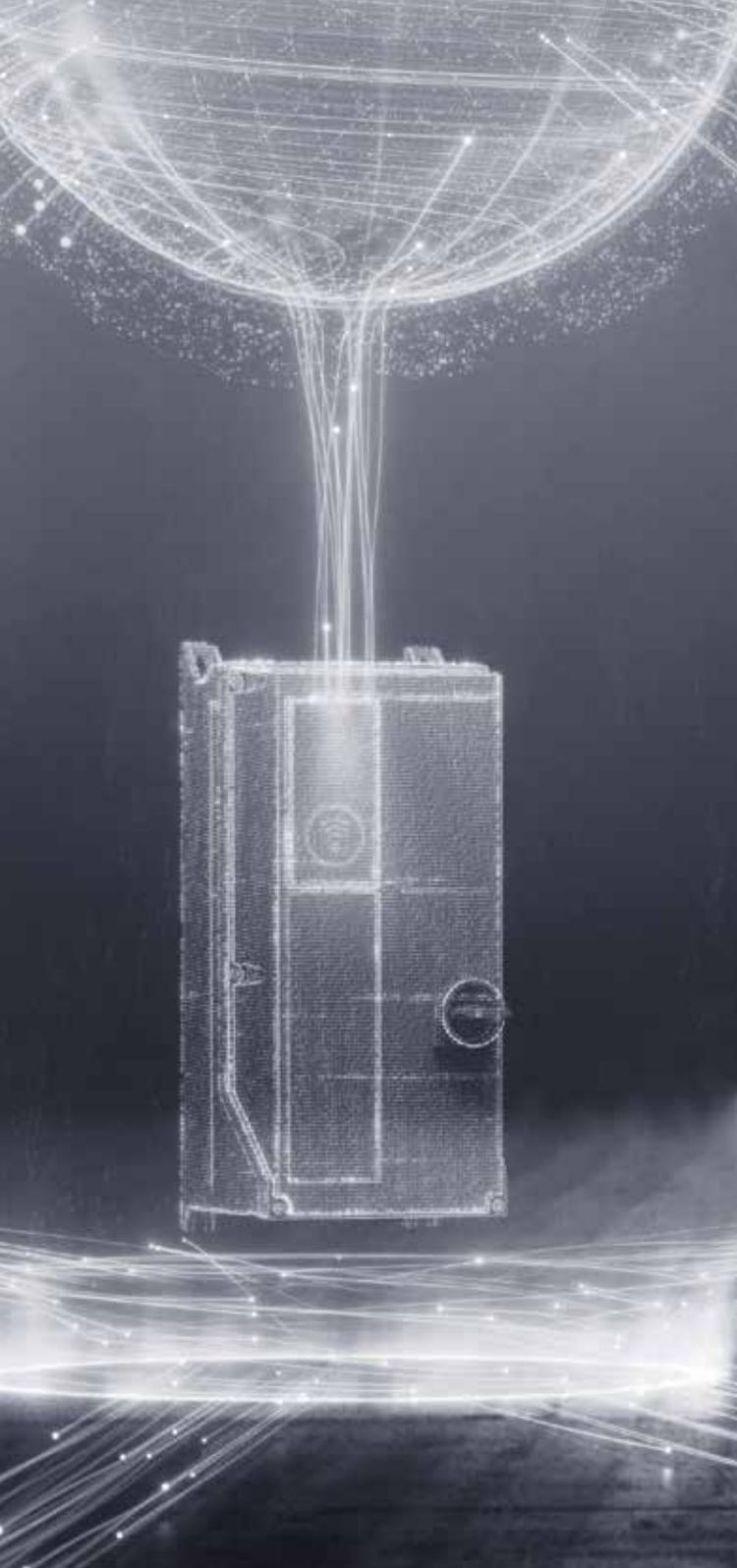
Im Netzwerk von Industrie 4.0 spielt der Frequenzumrichter eine wichtige Rolle und zeichnet sich durch einige zusätzliche Funktionen aus:

- **Sichere Verbindung:** Der Frequenzumrichter kann sicher mit anderen Elementen verbunden werden. Andere Elemente im Netzwerk können Antriebe, Steuerungen, Sensoren oder eine Cloud sein.
- **Der Frequenzumrichter dient als Sensor:** Der Frequenzumrichter analysiert die Motornennstrom- und -spannungscharakteristika, um die Motor- und Anwendungsleistung zu erfassen.
- **Der Frequenzumrichter dient als Sensor-Hub:** Er erfasst Daten von externen Sensoren, die sich auf den vom Frequenzumrichter gesteuerten Prozess beziehen.
- **Der Frequenzumrichter dient als Regler:** Der Frequenzumrichter kann die SPS ersetzen, wenn die Anforderungen der Anwendung dies zulassen.
- **Intelligente Ausgabegeräte werden unterstützt:** Drahtlose Verbindung zu intelligenten Geräten (Smartphone, Tablet).

Die Informationen aus dem Frequenzumrichter können wie folgt definiert werden:

- **Verzögerungsfreie Signale:** Signale, die direkt vom Frequenzumrichter über eingebaute Sensoren gemessen werden. Daten wie Motornennstrom, -spannung, Antriebstemperatur und deren Ableitungen, d. h. Leistung als Multiplikation von Strom und Spannung, oder Motordrehmoment. Darüber hinaus kann man den Frequenzumrichter als Hub für den Anschluss externer Sensoren verwenden, die verzögerungsfreie Signale liefern.
- **Verarbeitete Signale:** Daten, die aus den verzögerungsfreien Signalen abgeleitet werden. Zum Beispiel die statistische Verteilung (Maximal-, Minimal-, Mittel- und Standardabweichungswerte), Frequenzbereichsanalysen oder Einsatzprofilindikatoren.
- **Analysesignale:** Signale, die Hinweise auf den Zustand von Frequenzumrichter, Motor und Anwendung geben. Die Signale werden verwendet, um Wartungsarbeiten zu veranlassen oder das Systemdesign zu optimieren.





Durch Analyse der Motornennstromsignatur kann der Frequenzumrichter den Zustand des Motors und der Anwendung überwachen. Dies ermöglicht oftmals den Verzicht auf externe Sensoren. Fehlersignaturen können frühzeitig festgestellt und behoben werden. Mit dieser Technik ist es beispielsweise möglich, Wicklungsfehler oder mechanische Unwuchten frühzeitig zu erkennen.

Das Konzept, den Frequenzumrichter als Sensor-Hub zu verwenden, ermöglicht den Anschluss externer Sensoren an den Frequenzumrichter. Damit kann ein zusätzliches Gateway eingespart werden. Beispielsweise können Schwingungs-, Druck- und Temperatursensoren direkt am Frequenzumrichter angeschlossen werden. Der Vorteil dieses Konzepts liegt nicht nur in den geringeren Kosten. Es ermöglicht auch eine Zuordnung von Sensorinformationen zu den im Frequenzumrichter vorhandenen Daten. Ein anschauliches Beispiel ist die Zuordnung des Schwingungspegels, gemessen von einem externen Sensor, zur Motordrehzahl, da die Schwingungen drehzahlabhängig sind.

Zustandsorientierte Wartung

Es gibt folgende Wartungsstrategien:

- **Korrektive Wartung:** Das Produkt wird nach einem Fehler ausgetauscht.
- **Vorbeugende Wartung:** Das Gerät wird vorsorglich auf Basis eines Wartungsplans ausgetauscht, obwohl es keine Hinweise auf einen bevorstehenden Fehler gibt.
- **Zustandsorientierte Wartung:** Das Gerät gibt eine Warnmeldung aus, wenn die aktuelle Lebensdauer von der erwarteten Lebensdauer abweicht. Mögliche Grundursachen werden dabei angegeben.
- **Vorausschauende Wartung:** Basierend auf einer berechneten Vorhersage über den Betriebszustand, gibt das Gerät eine Warnmeldung aus.

Warum ist **zustandsorientierte Wartung erforderlich?**

Die korrektive und die vorbeugende Wartung hängen von Fehlern (Ereignissen) ab oder sind zeitbasiert. Daher erfolgen die Wartungsmaßnahmen nach einem Fehler (korrektiv) oder nach vordefinierten Betriebsstunden (vorbeugend). Für diese Arten der Wartung wird kein Feedback aus der eigentlichen Anwendung herangezogen.

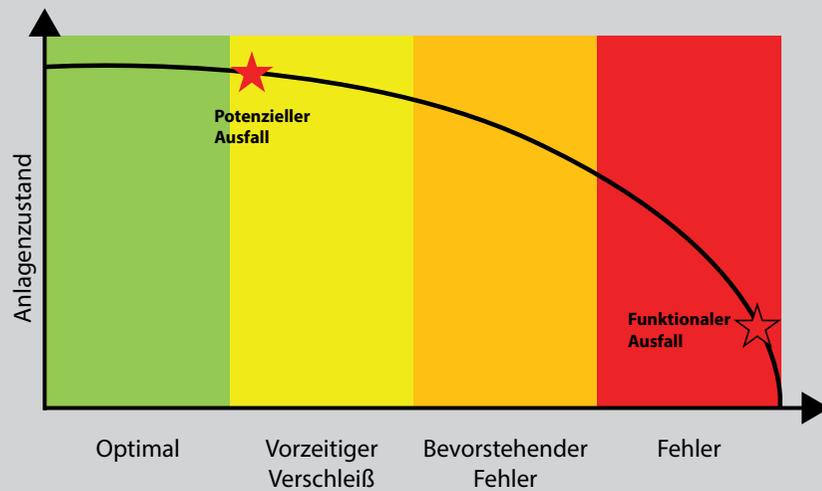
Mit der Einführung von Industrie 4.0 und der Verfügbarkeit von Sensordaten ist nun eine zustandsorientierte und vorausschauende Wartung möglich. Diese Wartungsstrategien verwenden aktuelle Sensordaten, um den Zustand des Gerätes zu bestimmen (zustandsorientierte Wartung) oder um zukünftige Ausfälle vorherzusagen (vorausschauende Wartung).

Zustandsorientierte Wartung

Überblick und Vorteile

Zustandsorientierte Wartung ist die einfachste und intuitivste Wartungstechnik. Sie basiert auf Daten aus der eigentlichen Anwendung. Die erfassten Daten dienen zur Zustandsüberwachung der Geräte. Zu diesem Zweck werden Schlüsselparameter als Indikatoren definiert. So ist es möglich, sich entwickelnde Fehler frühzeitig zu identifizieren. Der Zustand eines Gerätes verschlechtert sich in der Regel mit der Zeit. Dies wird durch die P-f-Kurve veranschaulicht, die ein typisches Degradationsmuster zeigt. Zu einer Fehlfunktion kommt es, wenn ein Gerät seine vorgesehene Funktion nicht mehr erfüllt. Die Idee der zustandsorientierten Wartung besteht darin, den potenziellen Ausfall zu erkennen, bevor eine tatsächliche Fehlfunktion auftritt.

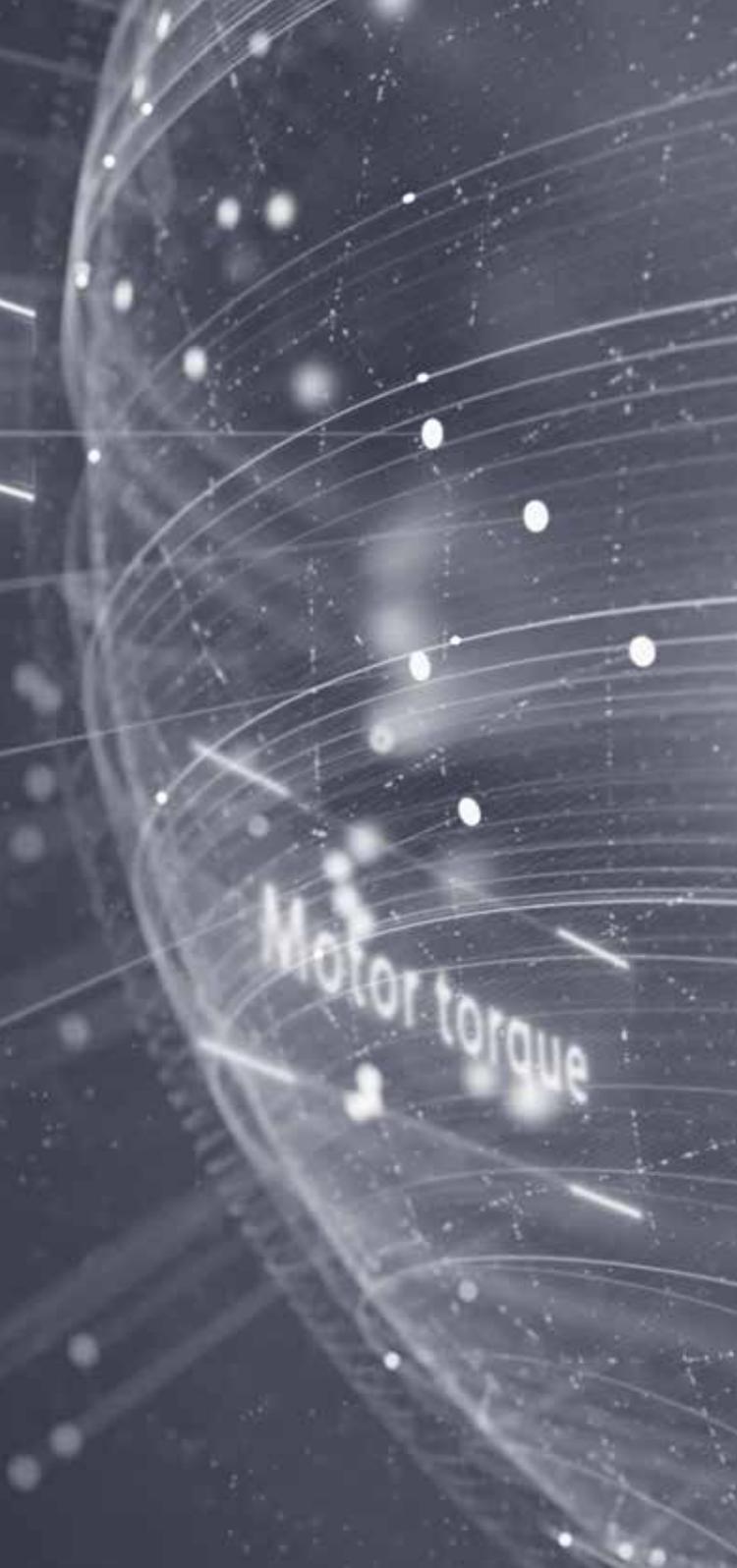
Abbildung: P-f-Kurve, stellt ein typisches Degradationsmuster dar



In diesem Fall bietet die Planung von Wartungsmaßnahmen viele Vorteile, wie z. B.:

- Verkürzung der Ausfallzeiten
- Beseitigung von unerwarteten Produktionsausfällen
- Wartungsoptimierung
- Reduzierung des Ersatzteillagerbestands





Zustandsüberwachungsfunktionen für drehzahlvariable Antriebe

Ein wesentlicher Teil der zustandsorientierten Wartung ist die Überwachung des Gerätezustands. Bei drehzahlvariablen Anwendungen hängt der Zustand der Anwendung oft von der Geschwindigkeit ab. Zum Beispiel nimmt der Schwingungspegel bei höheren Geschwindigkeiten zu, wobei der Zusammenhang zwischen den beiden Werten nicht linear ist. Tatsächlich können bei bestimmten Geschwindigkeiten Resonanzen auftreten und wieder verschwinden, wenn die Geschwindigkeit erhöht wird.

Die Verwendung eines unabhängigen Systems zur Zustandsüberwachung einer drehzahlvariablen Anwendung ist schwierig, da die Drehzahl und der damit korrelierende Überwachungswert bekannt sein müssen. Die Verwendung von Frequenzumrichtern zur Zustandsüberwachung („Frequenzumrichter als Sensor“ oder „Frequenzumrichter als Sensor-Hub“) ist vorteilhaft, da die Information über die Anwendungsdrehzahl bereits im Antrieb vorhanden ist. Zusätzlich sind Informationen über das Last-/Motordrehmoment und die Beschleunigung im Frequenzumrichter selbst verfügbar.

Die Zustandsüberwachung folgt einem **Dreistufenverfahren:**

1. Baseline festlegen
2. Schwellenwerte definieren
3. Überwachung durchführen

Baseline festlegen

Um ein effizientes Zustandsüberwachungssystem zu erhalten, müssen zunächst die normalen Betriebsbedingungen ermittelt und festgelegt werden. Das Festlegen eines Ausgangswerts bedeutet, dass ein normaler Betriebszustand für die Anwendung definiert wird. Dieser wird als Baseline bezeichnet. Es gibt mehrere Möglichkeiten, die Baseline-Werte zu bestimmen.

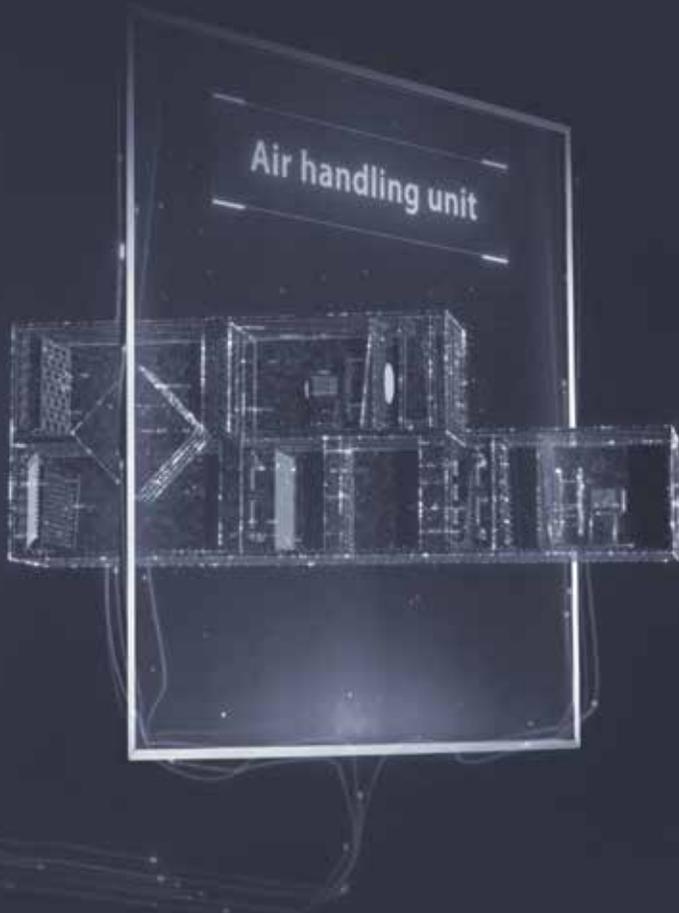
Manuell festgelegte Baseline: Wenn die Baseline-Werte anhand von Erfahrungswerten bekannt sind, werden die Werte einfach in den Frequenzumrichter eingegeben.

Baseline Run: Die Baseline kann während der Inbetriebnahme bestimmt werden. Bei dieser Methode wird ein Speed-Sweep durchgeführt. D. h. es werden die relevanten Geschwindigkeitsbereiche durchlaufen, und der Zustand bei jedem Geschwindigkeitspunkt wird bestimmt. Bei bestimmten Szenarien ist es jedoch möglich, dass die Anwendung während der Inbetriebnahme nicht mit voller Kapazität läuft oder eine Einlaufphase erforderlich ist. In diesen Situationen muss der Baseline Run nach der Einlaufphase durchgeführt werden, um einen Betriebszustand zu erfassen, der dem Normalbetrieb möglichst nahekommt.

Online Baseline: Hierbei handelt es sich um eine erweiterte Methode, bei der die Baseline-Werte während des Normalbetriebs erfasst werden. Sie bietet sich in Situationen an, in denen eine Bestimmung des Baseline Runs beim ersten Hochfahren nicht durchgeführt werden kann, da die Anwendung es nicht erlaubt, den gesamten Drehzahlbereich abzufahren.

Nach Festlegung der Baseline werden als nächster Schritt Schwellenwerte für Warnungen und Alarmer generiert. Die Schwellenwerte geben den Zustand der Anwendung an, bei dem der Benutzer benachrichtigt werden muss. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, den Zustand der Anlage anzuzeigen. Eines der gängigsten Mittel ist eine Ampel mit vier Farben. Sie wird in dem **VDMA-Einheitsblatt 24582 Feldbusneutrale Referenzarchitektur für Condition Monitoring in der Fabrikautomation** beschrieben.





Die Farben haben folgende Bedeutung:

- **Grün:** Zeigt an, dass die Anlage in gutem Zustand ist und effizient arbeitet.
- **Gelb:** Zeigt Warnstufe Ebene 1 an und bedeutet, dass der erste Schwellenwert überschritten wurde. Eine Wartungsmaßnahme kann vom Wartungspersonal geplant werden.
- **Orange:** Zeigt Warnstufe Ebene 2 an und bedeutet, dass der zweite Schwellenwert überschritten wurde. Sofortige Wartungsmaßnahmen müssen vom Wartungspersonal durchgeführt werden.
- **Rot:** Zeigt einen Alarm an und signalisiert, dass die Maschine stoppt und eine korrektive Wartung erforderlich ist.

Festlegen von Schwellenwerten für **Warnungen und Alarmmeldungen**

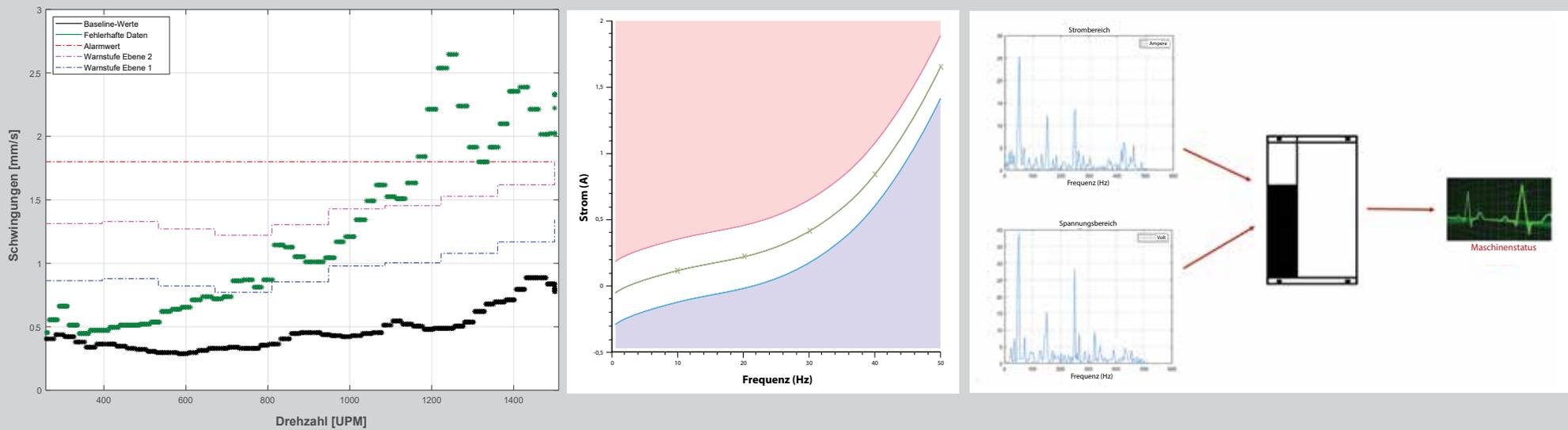
Zur Festlegung von Schwellenwerten werden folgende Methoden verwendet:

- **Absolut:** Das ist die allgemein übliche Methode, wenn die Anlagenwerte bereits bekannt sind. Der Schwellenwert ist fix, ungeachtet des gemessenen Baseline-Werts. Wenn der Bediener beispielsweise den absoluten Grenzwert für die Anlage kennt, wird ein absoluter Wert für die Alarmschwelle festgelegt. Bei der Schwingungsüberwachung können die in Normen wie z. B. ISO 10816/20816 beschriebenen Grenzwerte für die Alarmschwelle als absoluter Wert verwendet werden.
- **Offset:** Die Methode zur Festlegung von Schwellenwerten erfordert das Verstehen der Anwendung und der Baseline-Werte. Der Schwellenwert hängt vom Baseline-Wert ab, der mit einem benutzerdefinierten Offset kombiniert wird. Das Risiko besteht bei dieser Methode darin, einen sehr niedrigen oder sehr hohen Wert festzulegen, der zu falschen Warnmeldungen führt. Falsche Einstellungen können, selbst wenn Fehler auftreten, zu einer nicht reagierenden Überwachung führen.
- **Faktor:** Diese Methode ist einfacher einzusetzen als die Offset-Methode, da sie weniger Anwendungsverständnis erfordert. Der Schwellenwert hängt vom Baseline-Wert ab, der mit einem bestimmten Faktor multipliziert wird. Der Schwellenwert kann z. B. 150 % des Baseline-Werts betragen. Das Risiko dieser Methode besteht darin, einen sehr hohen Schwellenwert zu setzen.

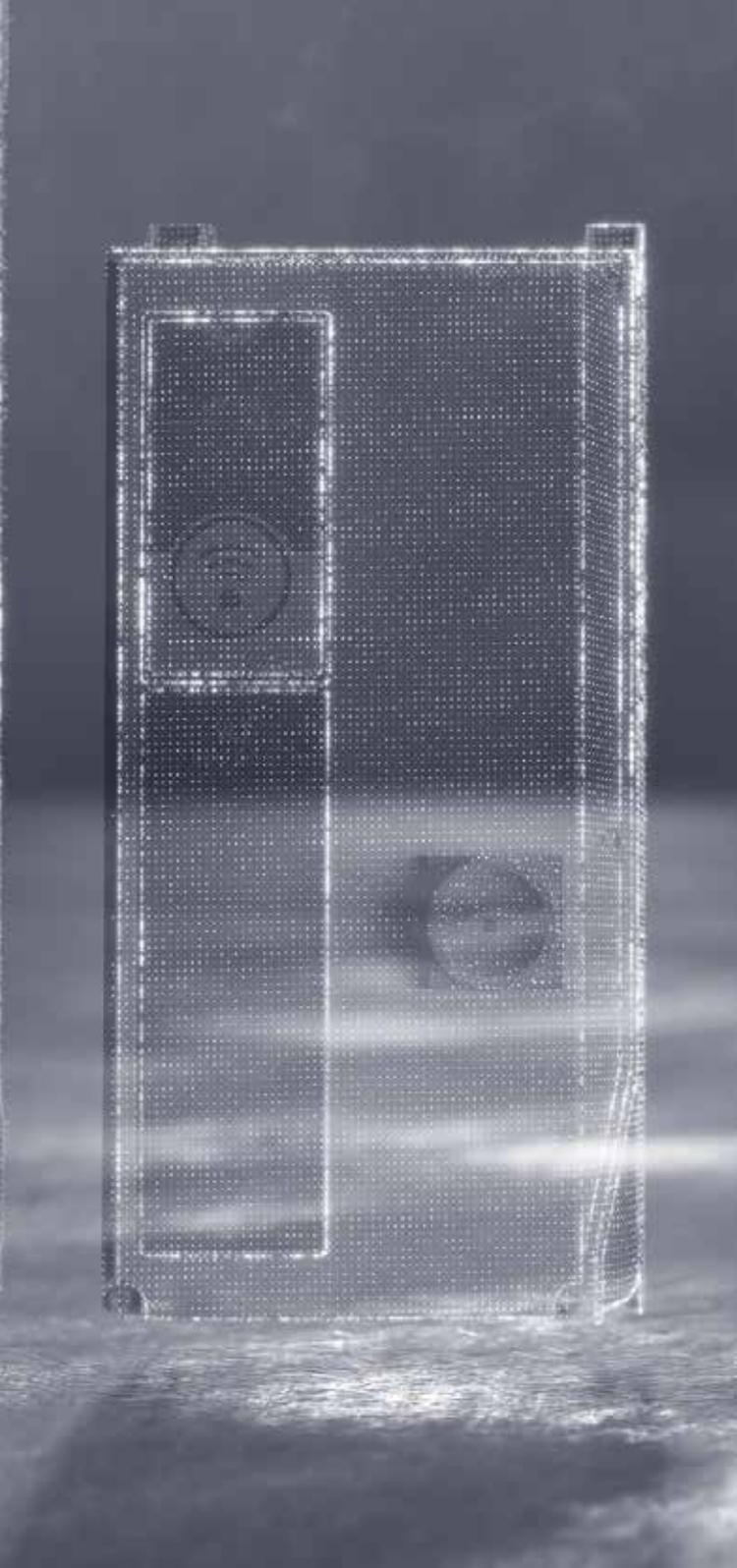
Überwachung

Die Überwachung erfolgt durch ständigen Abgleich der Messdaten mit den Schwellenwerten. Während des Normalbetriebs werden die tatsächlichen Werte mit dem Schwellenwert verglichen. Wenn die überwachten Parameter für eine festgelegte Zeitspanne einen Schwellenwert überschreiten, wird eine Warnung oder ein Alarm ausgegeben. Der Timer fungiert als Filter. Kurze Schwellenwertüberschreitungen lösen keine Warnungen und Alarme aus.

Abbildung: Zustandsorientierte Überwachungstechniken



Die Istwerte können über die Bedieneinheit-, Feldbus- oder IoT-Kommunikation aus dem Frequenzumrichter ausgelesen werden. Darüber hinaus können die Digitalausgänge so konfiguriert werden, dass sie auf bestimmte Warnungen und Alarme reagieren. Einige Frequenzumrichter haben einen eingebauten Webserver, der auch zum Auslesen des Zustands verwendet werden kann.



Fazit

Frequenzumrichter sind heute mehr als nur einfache Drehzahlregler. Sie können als Sensoren und Sensoren-Hubs Verbindungen herstellen, Daten verarbeiten, speichern und analysieren und sind damit wichtige Elemente in Automatisierungssystemen.

Frequenzumrichter sind in vielen Automatisierungsanlagen bereits vorhanden und bieten eine gute Möglichkeit für ein Upgrade auf Industrie 4.0.

Dies ermöglicht neue Wege der Wartung, wie z. B. die zustandsorientierte Wartung. Die Funktionen sind in einigen Frequenzumrichtern bereits verfügbar und die ersten Anwender haben begonnen, den Frequenzumrichter als Sensor zu verwenden.

Besuchen Sie **danfoss.de**, um Genaueres zu erfahren.

Die in Katalogen, Prospekten und anderen schriftlichen Unterlagen, wie z.B. Zeichnungen und Vorschlägen enthaltenen Angaben und technischen Daten sind vom Käufer vor Übernahme und Anwendung zu prüfen. Der Käufer kann aus diesen Unterlagen und zusätzlichen Diensten keinerlei Ansprüche gegenüber Danfoss oder Danfoss Mitarbeitern ableiten, es sei denn, dass diese vorsätzlich oder grob fahrlässig gehandelt haben. Danfoss behält sich das Recht vor, ohne vorherige Bekanntmachung im Rahmen des Angemessenen und Zumutbaren Änderungen an ihren Produkten – auch an bereits in Auftrag genommenen – vorzunehmen. Alle in dieser Publikation enthaltenen Warenzeichen sind Eigentum der jeweiligen Firmen. Danfoss und das Danfoss Logo sind Warenzeichen der Danfoss A/S. Alle Rechte vorbehalten.