

# Zustandsüberwachung in der Cloud

## Verteiltes Condition Monitoring zur Steigerung der Maschinenverfügbarkeit

*Eckart Uhlmann,  
Abdelhakim Laghmouchi,  
Eckhard Hohwieler und  
Claudio Geisert, Berlin*

Aufgrund der hohen Verfügbarkeitsanforderungen an Produktionsmaschinen wächst das Interesse an zustandsbasierter Instandhaltung. Der Einsatz von Zustandsüberwachungssystemen (Condition Monitoring-Systemen) zur Steigerung der Verfügbarkeit von Maschinen und zur Reduktion der Instandhaltungskosten spielt dabei eine entscheidende Rolle und hat in den letzten Jahren zugenommen. Da am Markt verfügbare und auf Industriesensoren basierende Lösungen meist anwendungsspezifisch, kostenintensiv und in der Inbetriebnahme aufwändig sind, wurde am Fraunhofer IPK ein Konzept für die Zustandsüberwachung in der Cloud entwickelt, das mithilfe von Einplatinen-Computern und MEMS-Beschleunigungssensoren (Mikro-Elektro-Mechanisches-System) als Sensorknoten eine preisgünstige und einfach zu handhabende Alternative darstellt.

### Ausgangssituation

Aufgrund der sehr hohen Verfügbarkeitsanforderungen an Produktionsmaschinen und -anlagen kommt der zustandsbasierten Instandhaltung eine stetig wachsende Bedeutung zu. Der Einsatz von Zustandsüberwachungssystemen (Condition Monitoring-Systemen) zur Steigerung der Verfügbarkeit von Maschinen und zur Reduktion der Wartungs- und Instandhaltungskosten sowie zur Verbesserung der Prozessqualität spielt dabei eine entscheidende Rolle und hat sich in den letzten Jahren in der Praxis verstärkt. Die am Markt verfügbaren Condition Monitoring-Systeme sind anwendungsspezifisch, und die Installation von Industriesensoren ist in der Regel kostenintensiv sowie unflexibel. Mit dem Einsatz von Funksensornetzwerken mittels einfacher Elektronik lassen sich zukünftige Condition Monitoring-Lösungen flexibel und adaptiv für verschiedene Anwendungen konfigurieren. Mithilfe der verteilten Datenvorverarbeitung werden Kennwerte aus den Messdaten erzeugt (Merkmalsextraktion). Durch die Musterklassifizierung auf der Sensorknotenebene können Condition Monitoring-Applikationen kostengünstig und einfach realisiert

werden. Durch den Einsatz intelligenter Auswertgorithmen, die auf dem Sensorknoten ausgeführt werden, wird eine Aussage über den Anlagenzustand schnell und effizient abgeleitet. Mithilfe der dezentrale Datenverarbeitung wird die Leistungsfähigkeit der Zustandsüberwachung des Gesamtsystems erhöht [1]. Des Weiteren sind die meisten am Markt verfügbaren Industriesensoren kabelgebunden und verfügen in der Regel über keine Intelligenz. Aus diesem Grund sind diese für viele Condition Monitoring-Anwendungen nur bedingt geeignet. Im Gegensatz dazu sind die MEMS-Sensoren (Mikro-Elektro-Mechanisches-System) kosteneffizient und hoch integrierbar. Zudem verbrauchen diese weniger Energie und sind konfigurationsfähig [2, 3].

### Einsatz von MEMS-Beschleunigungssensoren für das Condition Monitoring

Die Schwingungsanalyse (z. B. Beschleunigung oder Körperschall) eignet sich gut zur Zustandsüberwachung von rotierenden Maschinenteilen und ist in der Praxis weit verbreitet [4, 5]. Darüber hinaus stellen die MEMS-Beschleuni-

gungssensoren eine neue Entwicklung und einen erfolgsversprechenden Ansatz zur Erfassung mechanischer Schwingungen an Maschinen und Anlagen dar. Ein Beispiel des Einsatzes von einem Funksensornetzwerk auf Basis von MEMS-Beschleunigungssensoren zur Fehlererkennung und Diagnose wurde in [6] vorgestellt. In [7] wurde ein Konzept für die Zustandsüberwachung von Kugelgewindetrieben in Industrieanlagen mittels eines Funksensornetzwerks präsentiert. Außerdem wurde in [8] die Eignung von MEMS-Sensoren für Zustandsüberwachungsanwendungen untersucht. Die erzielten Ergebnisse zeigen, dass diese Sensorart für einen Einsatz im Bereich der Zustandsüberwachung geeignet ist. Allerdings ist ihre Empfindlichkeit gegenüber Feuchtigkeit ein wichtiger Einschränkungsfaktor dieser Sensorarten. Dennoch stellen MEMS-Sensoren in Kombination mit Einplatinen-Computern, wie z. B. Raspberry Pi 2, Arduino R3 oder Beaglebone Black, für die Zustandsüberwachung von verschleißanfälligen rotierenden Maschinenteilen als Alternative zu den am Markt verfügbaren, kostenintensiven Zustandsüberwachungslösungen auf Basis der Industriesensoren dar.

## Konzept für ein Funksensornetzwerk

Das realisierte Funksensornetzwerk besteht aus fünf verschiedenen Sensorknoten, welche unabhängig voneinander agieren. Jeder dieser Sensorknoten setzt sich aus einem 3-axialen „Nano“-MEMS-Beschleunigungs- und Temperatursensor zusammen.

In Bild 1 ist ein vereinfachter schematischer Aufbau des implementierten Funksensornetzwerks an einem Achsprüfstand dargestellt. Das realisierte Konzept in Bild 1 setzt sich aus dem Funksensornetzwerk auf Basis von Raspberry Pi 2 und MEMS-Beschleunigungssensoren, Cloud-Server (inkl. Dienste) sowie einem mobilen Endgerät für Fernzugriff und Visualisierung zusammen. Auf den einzelnen Sensorknoten lassen sich mittels MEMS-Sensoren Vibrationsdaten erfassen und vorverarbeiten. Die Merkmalsextraktion und Klassifikation auf der Knotenebene und die Klassifizierungsergebnisse sowie Merkmalsvektoren werden in den Cloud-Server übertragen. Dort stehen den Anwendern verschiedene Dienste, wie z.B. die Generierung von Reporten über den vorliegenden Maschinenzustand oder die Durchführung von Trendanalysen anhand ausgewählter Signalkenngrößen, zur Verfügung. Diese Dienste lassen sich mithilfe eines mobilen Endgeräts von unterschiedlichen Anwendern, wie z.B. Servicetechnikern oder Wartungsplanern, nutzen. Mittels dieser Möglichkeit lässt sich der Zustand einer Produktionsanlage kontinuierlich überwachen und erlaubt eine zustandsbasierte Instandhaltung.

## Verteiltes Condition Monitoring mit Funksensornetzwerk und Cloud

Die Bearbeitungsschritte der Mustererkennung zwecks Zustandsermittlung beinhalten die Datenakquisition, Signalvorverarbeitung, Merkmalsextraktion und -auswahl sowie Klassifikation. Zunächst werden die Beschleunigungsdaten mit der Abtastrate von 2.500 Hz erfasst. Die Rohdaten werden dann mittels Methoden, wie z.B. Filterung oder Fourier-Transformation, vorverarbeitet. Als nächstes findet die Merkmalsextraktion aus diesen vorverarbeiteten Rohsignalen statt. Als Merkmalsextraktion wird die Berechnung von Signalkenngrößen bezeichnet. Daraus lassen sich geeignete Merkmale

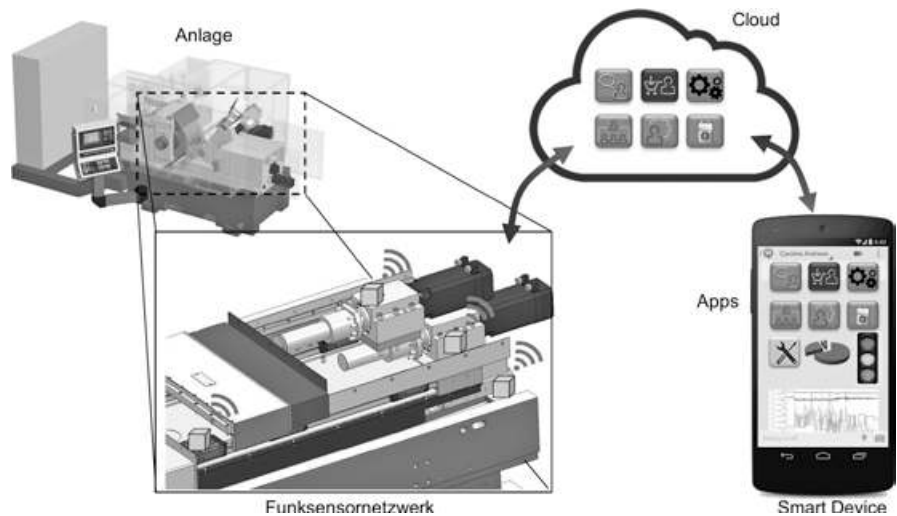


Bild 1. Installation eines Funksensornetzwerks in der Produktionsanlage

extrahieren, welche die einzelnen Klassen in dem Merkmalsraum am günstigsten trennen. Da die Merkmalsauswahl sehr stark die Klassifizierungsergebnisse beeinflusst, müssen die Merkmale auf ihre Eignung für die konkrete Anwendung hin untersucht werden [9].

Anschließend erfolgt die Klassifizierung dieser Merkmale mittels vorab trainierter Algorithmen mit den Beispiel-Trainingsdaten. Nach erfolgreicher Klassifi-

zierung der generierten Merkmale lassen sich die Klassifizierungsergebnisse vom jeweiligen Sensorknoten in die Cloud transferieren. Wird ein Fehlerzustand detektiert, wird der Servicetechniker über eine App, die auf einem mobilen Endgerät läuft, informiert. Bild 2 zeigt die Struktur des verteilten Condition Monitoring in einem Funksensornetzwerk und in der Cloud auf Basis von Raspberry Pi und MEMS-Beschleunigungssensoren.

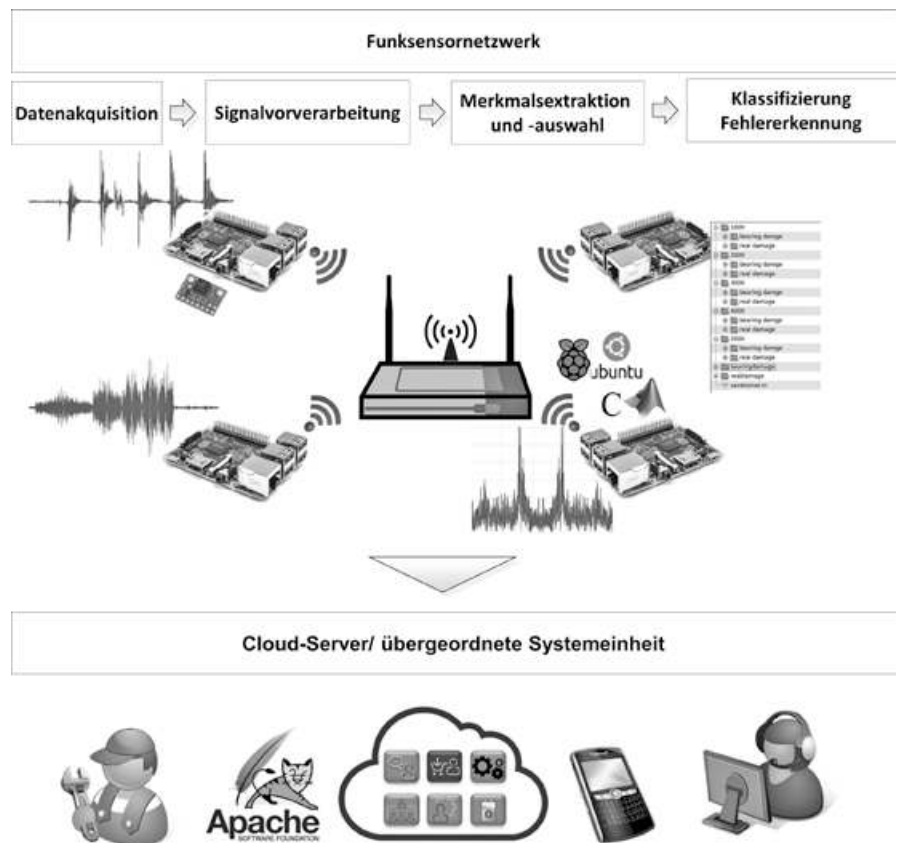


Bild 2. Schematische Darstellung des Sensornetzwerks

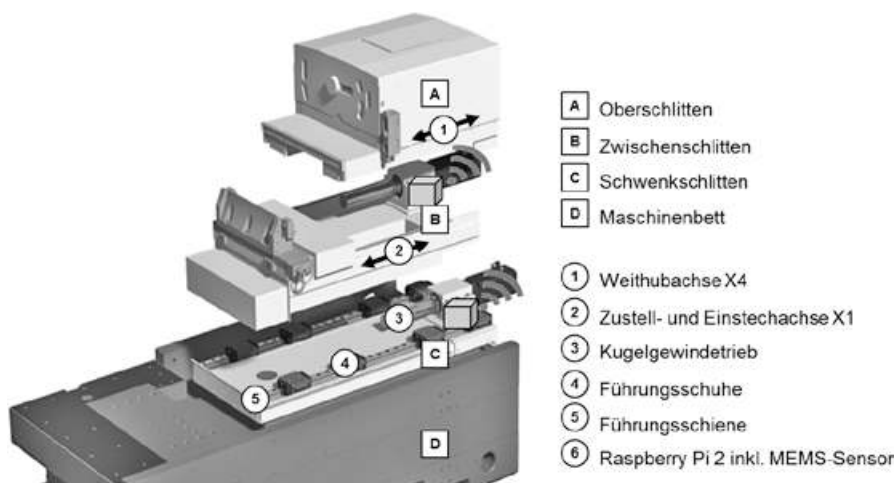


Bild 3. Schematischer Aufbau des Achsprüfstandes

Dieses Konzept wurde zur Überwachung von verschleißanfälligen Komponenten von Vorschubachsen entwickelt. Hierbei lässt sich an jeder der Komponenten, wie z. B. Kugelgewindetrieb oder Profilschienenführung, ein Sensorknoten anbringen. Das Gesamtsensornetzwerk besteht aus mehreren Knoten, wobei auf jedem Knoten die Bearbeitungsschritte des Condition Monitoring mittels Mustererkennung realisiert sind. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein aus vier Sensorknoten bestehendes Funksensornetzwerk mittels Raspberry Pi 2 realisiert. Zu Demonstrationszwecken wurde mittels http Web Server, PHP5 Modul und Datenbank MySQL-Technologien ein Cloud-Server implementiert. Darüber hinaus müssen die Sensorknoten und der Cloud-Server im selben Netzwerk konfiguriert sein [10].

Aus Datensicherheitsgründen sind die Sensorknoten mit einem Passwort geschützt. Zudem ist der Zugriff auf den Server und die Betriebssysteme der einzelnen Sensorknoten eingeschränkt.

## Evaluierung

### Aufbau des Achsprüfstandes

Zur Evaluierung des entwickelten Konzepts wurden an einem Achsprüfstand die Beschleunigungsdaten erfasst. Der schematische Aufbau des Prüfstandes ist in Bild 3 dargestellt.

### Datenerfassung

Am Achsprüfstand wurden Kugelgewindetriebe mit verschiedenen Schäden auf der Spindelauffläche zur Datenakquisition verwendet. Die Beschleunigungsdaten sind bei verschiedenen Vorschubgeschwindigkeiten erfasst worden, wobei

zur Sicherstellung der Reproduzierbarkeit ein speziell dafür entwickeltes CNC-Programm verwendet wurde [11]. Die Abtastrate für die Erfassung der Schwingungsdaten lag bei 2.500 Hz.

## Merkmalsklassifizierung mithilfe von Support-Vektor-Maschinen (SVM)

Die Merkmale wurden mittels der Programmiersprache Python aus den vorverarbeiteten Rohsignalen auf dem Sensorknoten extrahiert. Python ist eine weit verbreitete Programmiersprache im Bereich der Datenanalyse mit Methoden des maschinellen Lernens und unterstützt viele MATLAB-Funktionen. Die Auswahl der geeigneten Merkmale (z. B. Varianz, Mittelwert und Wölbung) erfolgte mit dem am Fraunhofer IPK entwickelten Condition Monitoring Tool [11, 12]. Diese Merkmale kommen in der Lernphase der

SVM-Methode zum Einsatz. SVM (Support-Vektor-Maschine) ist ein Lernverfahren aus dem Gebiet der künstlichen Intelligenz, das auf der statistischen Lerntheorie basiert [13, 14]. Dieses Verfahren kommt seit Jahren erfolgreich bei unterschiedlichen Klassifizierungsproblemen der Bildverarbeitung und Bioinformatik zum Einsatz. SVM wird aber auch zur Fehlererkennung und Diagnose in industriellen Anwendungen auf Basis von Sensordaten herangezogen. Dieses Verfahren ist im Vergleich zu den klassischen statistischen Lernmethoden leistungsfähiger bezüglich der Klassifizierung hoch dimensionaler nichtlinearer Klassifizierungsproblemen [15].

Bild 4 zeigt ein Beispiel für ausgewählte Merkmale der verschiedenen Entscheidungsklassen. Die Auswahl geeigneter Merkmale mit dem vorgestellten Tools ist in [11] vorgenommen. Dieses Tool verfügt über eine intelligente Methode zur Merkmalauswahl. Die Genauigkeit der Klassifizierungsergebnisse mittels SVM bei 1.000 mm/min und 3.000 mm/min ist in Bild 5 dargestellt. Die Klassifizierungsergebnisse sind von den ausgewählten Merkmalen abhängig. Je günstiger diese gewählt werden, desto besser sind die Klassifizierungsergebnisse.

## Zusammenfassung

Das in diesem Beitrag vorgestellte Konzept wurde zur Zustandsüberwachung von verschleißanfälligen Komponenten realisiert und anhand realer Beispieldaten evaluiert. Dieses Konzept erlaubt eine eingebettete Datenerfassung, Signalverarbeitung, Merkmalsextraktion und Klassifizierung mithilfe von Einplatinen-

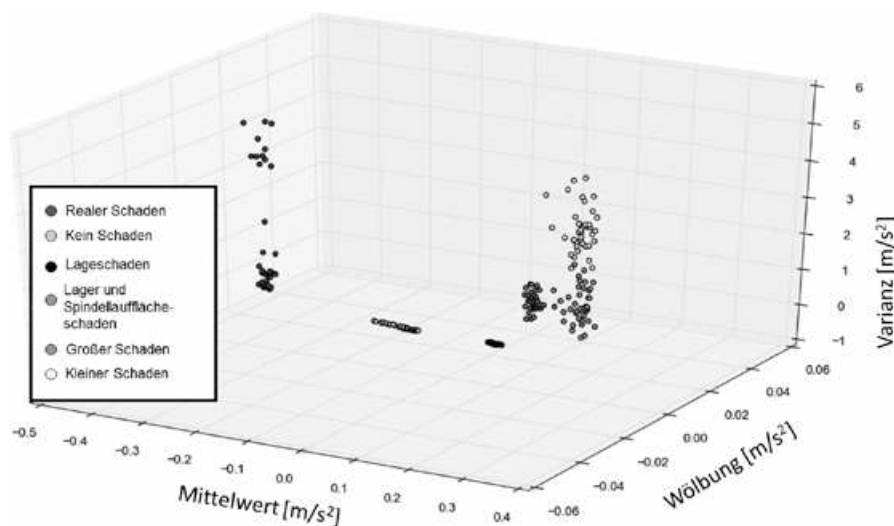


Bild 4. Verteilung der Kennwerte im Merkmalsraum



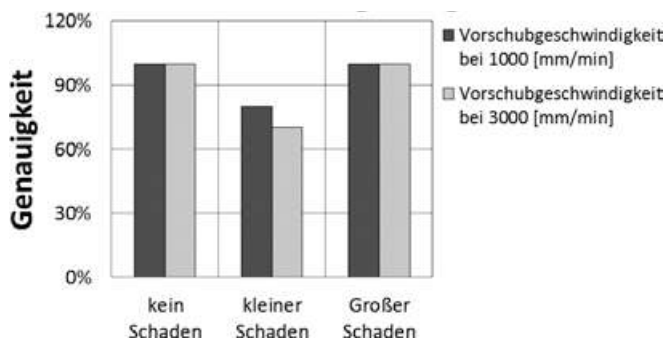


Bild 5. SVM-Klassifizierungsgenauigkeit bei 1.000 mm/min und 3.000 mm/min

Computern (Raspberry Pi 2) und MEMS-Sensoren. Die Verwendung von Raspberry Pi 2 und MEMS-Sensoren zur Realisierung eines Funksensornetzwerks für das Condition Monitoring lässt sich einfach konfigurieren und ist hoch adaptierbar für verschiedene industrielle Anwendungen. Darüber hinaus erlaubt das Konzept eine dezentrale Datenverarbeitung auf der Sensorknotenenebene. In zukünftigen Arbeiten wird dieses Konzept an mehreren Vorschubachsen von Werkzeugmaschinen im IPK-Versuchsfeld getestet.

## Literatur

- Albarbar, A.; Mekid, S.; Starr, A.; Pietruszkiewicz, R.: Suitability of MEMS Accelerometers for Condition Monitoring: An Experimental Study. *Sensors* 8 (2008) 8, S. 784–799
- Chaudhury, S. B.; Sengupta, M.; Mukherjee, K.: Vibration Monitoring of Rotating Machines Using MEMS Accelerometer. *International Journal of Scientific Engineering and Research (IJSER)* 2 (2014) 9, S. 5–11
- Swathy, L.; Abraham, L.: Vibration Monitoring Using MEMS Digital Accelerometer with ATmega and LabVIEW Interface for Space Application. *IJISSET – International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology* 1 (2014) 5
- Lee, H.-C.; Chang, Y.-C.; Huang, Y.-S.: A Reliable Wireless Sensor System for Monitoring Mechanical Wear-Out of Parts. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 63 (2014) 10, S. 2488–2497
- Strackeljan, J.; Goreczka, S.; Doguer, T.: Detection of Bearing Faults in High Speed Rotors Systems. In: *Proceedings of the 9th International Conference on Condition Monitoring and Machinery Failure Prevention Technologies, CM 2012 London, UK, 12.06.–14.06.2012*
- Johannes Schmid, T.; Stork, W.; Hennrich, H.; Blank, T.: A Wireless MEMS-sensor Network C/Concept for the Condition Monitoring of Ball Screw Drives in Industrial Plants. In: *Proceedings of the 8th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, SenSys 2010, 03.–05.11.2010*
- Keski-Säntti, J.; Parkkila, T.; Leinonen, J.; Leinonen PESKI-SÄNTTI, J.: Wireless Communication and MEMS Sensors for Cheaper Condition Monitoring and Prognostics of Charging Crane CRANE. In: *Proceedings of*

- the 19th International Congress, Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management, COMADEM 2006, S. 747–755
- Subimal, B.; Mainak, S.; Kaushik, M.: Vibration Monitoring of Rotating Machines Using MEMS Accelerometer. *International Journal of Scientific Engineering and Research (IJSER)* 2 (2014) 9, S. 2347–3878
- Somol, P.; Novovicova, J.; Pudil, P.: Improving Sequential Feature Selection Methods Performance by Means of Hybridization. In: *Proceedings of the 6th IASTED International Conference on Advances in computer Science and Engineering (ACSE 2010), Sharm El-Sheikh, Egypt 15.03.–17.03.2010*
- Kumar, P.; Kumar Jatoto, R.: Development of Cloud Based Light.Intensity Monitoring System Using Raspberry Pi. In: *International Conference on Industrial instrumentation and Control (ICIC), 2015. College of Engineering Puna, India, 28.05.–30.05.2015*
- Laghmouchi, A.; Hohwieler, E.; Geisert, C.; Uhlmann, E.: Intelligent Configuration of Condition Monitoring Algorithms. In: *WGP Congress 2015 „Progress in Production Engineering“, Hamburg, 07.09–08.09.2015*
- Uhlmann, E.; Laghmouchi, A.: Entwicklungstool zur Konfiguration und Verknüpfung von Condition Monitoring-Algorithmen. *ZWF* 110 (2015) 1–2, S. 23–27
- Steinwart, I.; Christmann, A.: *Support Vector Machines*. Springer-Verlag, New York 2008
- Shawe-Taylor, J.; Cristianini, N.: *Kernel Methods for Pattern Analysis*. Cambridge University Press, Cambridge 2004
- Joachims, T.: *Learning to Classify Text Using Support Vector Machines: Methods, Theory, and Algorithms*. Kluwer Academic Publishers, 2002

## Die Autoren dieses Beitrags

Prof. Dr. h.c. Dr.-Ing. Eckart Uhlmann, geb. 1958, ist Leiter des Fachgebiets Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik am Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb (IWF) der TU Berlin sowie Leiter des Fraunhofer-Instituts für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik (IPK) im Produktionstechnischen Zentrum Berlin.

Dipl.-Ing. Abdelhakim Laghmouchi studierte Informationstechnik im Maschinenwesen an der TU Berlin mit dem Schwerpunkt Regelungstechnik. Er ist seit 2010 am Fraunhofer IPK im Bereich Produktionssysteme als Wissenschaftli-

cher Mitarbeiter mit dem Ziel der Promotion tätig. Seine Schwerpunkte liegen im Bereich Condition Monitoring im Umfeld von Industrie 4.0.

Dipl.-Ing. Claudio Geisert studierte Elektrotechnik mit dem Schwerpunkt Mess- und Automatisierungstechnik. Er ist seit 2002 am Produktionstechnischen Zentrum Berlin als Wissenschaftlicher Mitarbeiter auf dem Gebiet der technischen Diagnose tätig. Im Vordergrund seiner Tätigkeit steht die Entwicklung maschinen-naher Softwarelösungen zur Unterstützung der Instandhaltung. Seit 2014 leitet er am Fraunhofer IPK das Innovationsfeld Life Cycle Monitoring.

Dipl.-Ing. Eckhard Hohwieler studierte Elektrotechnik an der TU Berlin und ist seit Dezember 1981 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer IPK. Seit 1986 ist er am Institut Abteilungsleiter und derzeit im Geschäftsfeld Produktionssysteme verantwortlich für die Abteilung Produktionsmaschinen und Anlagenmanagement. Seine Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkte befassen sich mit intelligenten Produktionssystemen, dem Condition Monitoring und der selbstorganisierenden Produktion mit vernetzten intelligenten Komponenten. Herr Hohwieler initiierte und leitet Forschungsprojekte zu Industrie 4.0 am Fraunhofer IPK.

## Summary

Due to the very high demands on availability and efficiency of production systems, condition-based maintenance is becoming increasingly important. The use of condition monitoring approaches to increase the machine availability and reduce the maintenance costs, as well as to enhance the process quality, has increased over the last years. The installation of industrial sensors for condition monitoring reasons is complex and cost-intensive. Moreover, the condition monitoring systems available on the market are application specific and expensive. The aim of this paper is to present the concept of a wireless sensor network using Micro-Electro-Mechanical System sensors (MEMS) and Raspberry Pi 2 for data acquisition and signal processing and classification. Moreover, its use for condition monitoring applications and the selected and implemented algorithm will be introduced. This concept realized by Fraunhofer IPK, can be used to detect faults in wear-susceptible rotating components in production systems. It can be easily adapted to different specific applications because of decentralized data preprocessing on the sensor nodes and provision of data and services in the cloud. A concrete example for an industrial application of this concept will be represented. This will include the visualization of results which were achieved. Finally, the evaluation and testing of this concept including implemented algorithms on an axis test rig at different operation parameters will be illustrated.

Den Beitrag als PDF finden Sie unter:  
[www.zwf-online.de](http://www.zwf-online.de)  
 Dokumentennummer: ZW 111463