

Industrie 4.0 Nachrüstkit für Werkzeugmaschinen

D. Barton, R. Stamm, S. Mergler, C. Bardenhagen, J. Fleischer

Industrie 4.0 verspricht ein hohes wirtschaftliches Potential für produzierende Unternehmen. Allerdings wird dieses in bestehenden Werkzeugmaschinen bisher nur wenig geschöpft. Um das Ausrollen von Funktionen für die zustandsorientierte Instandhaltung und die Überwachung des Bearbeitungsprozesses zu ermöglichen, wurde ein modulares Nachrüstkit entwickelt. Mit Hilfe des Kits können Maschinen individuell um Hardware- und Software-Bausteine erweitert werden.

1 Einleitung

Die immer weiter voranschreitende Digitalisierung industrieller Anlagen, bekannt unter dem Begriff Industrie 4.0, begünstigt einen breiteren Einsatz von Lösungen zur automatisierten Überwachung und Optimierung der Produktion. In spanenden Werkzeugmaschinen ist insbesondere ein hohes wirtschaftliches Potential für die Zustandsüberwachung von Maschinenkomponenten und die Prozessüberwachung erkennbar. Dieser wirtschaftliche Nutzen manifestiert sich durch reduzierte Fertigungskosten und eine Steigerung der OEE (*Overall Equipment Effectiveness* – Gesamtanlageneffektivität), die sich wiederum aus den Kennzahlen Verfügbarkeit, Qualität und Produktivität zusammensetzt. In neuen Werkzeugmaschinen sind schon seit mehreren Jahren Industrie 4.0 Funktionen standardmäßig oder als Option verfügbar [1, 2]. Allerdings sind aufgrund ihrer langen Lebensdauer noch viele ältere Maschinen im produktiven Einsatz, die über diese zusätzlichen Funktionen nicht verfügen. Die Nachrüstung von Industrie 4.0 Funktionen an bestehenden Werkzeugmaschinen stellt somit ein signifikantes wirtschaftliches Potential dar, das bisher nur wenig geschöpft wird. Obwohl die Umsetzung von Industrie 4.0 eine strategische Priorität der meisten produzierenden Unternehmen darstellt, setzt die Mehrheit bisher entweder keine Industrie 4.0 Lösungen um, oder beschränkt sich auf Insellösungen und Pilotanwendungen. Somit stellt das Ausrollen von Industrie 4.0 Lösungen auf eine größere Anzahl an Maschinen eine wesentliche Herausforderung dar. [3]

2 Industrie 4.0 Funktionen für Werkzeugmaschinen

Lösungen zur Zustandsüberwachung von Komponenten der Werkzeugmaschinen (*Condition Monitoring*) ermöglichen eine erhöhte Verfügbarkeit und niedrigere Instandhaltungskosten, indem die Lebensdauer der Komponenten optimal ausgenutzt und ungeplante Instandhaltungseinsätze minimiert werden. Sie bilden die Grundlage für eine zustandsorientierte oder prädiktive Instandhaltung (*Predictive Maintenance*). In spanenden Werkzeugmaschinen sind die Vorschubachsen und die Hauptspindel besonders relevant für verschleißbedingte Ausfälle. Innerhalb dieser Baugruppen sind Lager, Führungen und mechanische Übertragungselemente (Kugelgewindetribe, Ritzel-Zahnstangenantriebe) typische Verschleißkomponenten. Der Verschleißzustand von Lagern und Kugelgewindetrieben kann beispielsweise mithilfe von gemessenen Schwingungssignalen [4-6] oder Dehnungen [7, 8] prognostiziert werden. Ergänzend zur Zustandsüberwachung kann die Lebensdauer durch einen schonenderen Betrieb verlängert werden, beispielsweise mit einer adaptiven Schmierung [9].

Durch eine Überwachung des Fertigungsprozesses können einerseits unerwünschte Zustände und Ereignisse erkannt werden, um durch eine schnelle Reaktion Schäden, Stillstände und Qualitätsmängel zu minimieren. Andererseits können durch die Prozessüberwachung und eine damit einhergehende gesteigerte Transparenz Potentiale zur Optimierung des Fertigungsprozesses erkannt werden. Die Optimierung erfolgt in der Praxis meistens manuell, in einzelnen Fällen automatisiert, mit dem Ziel die Fertigungskosten zu reduzieren, die Qualität der Werkstücke zu erhöhen oder die Produktivität zu erhöhen. Die Werkzeuge bilden beispielsweise einen wichtigen Kostenfaktor in der spanenden Fertigung und somit ein attraktives Optimierungsziel. Der Verschleißzustand und der Bruch von Werkzeugen können anhand von Stromsignalen der Antriebe, Kraftsignalen [10], Beschleunigungssignalen oder einer Kombination [11] dieser Datenquellen erkannt werden. Weitere mögliche Überwachungsziele sind die Erkennung von Kollisionen [12] und Ratterschwingungen [13]. Außerdem ist eine allgemeine Erkennung von Störungen und Anomalien aufgrund von Abweichungen vom vergangenen Signalverlauf ähnlicher Werkstücke möglich. Diese Anomalien können beispielsweise durch Lunker und Konturabweichungen im bearbeiteten Halbzeug entstehen [14].

Neben der Minimierung von durch Störungen bedingten Kosten sind dank Überwachungslösungen reduzierte Personalkosten möglich, wenn die Bedienung mehrerer Maschinen durch einen Mitarbeiter begünstigt wird.

In Tabelle 1 sind die obengenannten Gruppen von Industrie 4.0 Funktionen und die damit verbundenen wirtschaftlichen Nutzen zusammengefasst. Für die Auswahl und Implementierung der Industrie 4.0 Funktionen müssen außerdem die erforderlichen Datenquellen und die Anforderungen an die Datenverarbeitung betrachtet werden. Die Datenquellen können nach Abstrakte eingeteilt werden. Diese reicht von weniger als 10 Hz in niederfrequenten Sensorsystemen (z.B. Temperatur) bis hin zu mehr als 20 kHz in sehr hochfrequenten Sensorsystemen (z.B. Schwingungen/Körperschall). Eine weitere wesentliche Anforderung ist die zulässige Reaktionszeit. Diese kann bei der Prognose des Verschleißzustands von Maschinenkomponenten mehrere Stunden betragen, während die Kollisionserkennung eine Reaktion innerhalb weniger Millisekunden erfordert. [15]

Tabelle 1. Industrie 4.0 Funktionen und wirtschaftlicher Nutzen

Industrie 4.0 Funktionen		Maßgeblicher wirtschaftlicher Nutzen			
		Qualität	Produktivität	Verfügbarkeit	Betriebskosten
Zustandsorientierte Instandhaltung	Zustand überwachen (Prognose)			↗	↘
	Lebensdauer verlängern			↗	↘
Prozessüberwachung und -optimierung	Störungen und Anomalien detektieren	↗			↘
	Transparenz und Prozessoptimierung	↗	↗		↘

3 Analyse des Bedarfs von Maschinenbetreibern

Zur Ermittlung der Anforderungen an ein Nachrüstkit wurden sieben Betreiber spanender Werkzeugmaschinen aus den Branchen Maschinenbau, Werkzeugbau und Automobil befragt. Um die Anonymität der teilnehmenden Unternehmen zu wahren werden die Ergebnisse im Folgenden nur in stark aggregierter Form vorgestellt. Die befragten Ansprechpartner verantworteten insgesamt mehr als 4000 Werkzeugmaschinen, die produzierten Losgrößen reichten von der Einzelfertigung bis hin zur Großserienfertigung mit jährlichen Stückzahlen von mehr als 100.000. Die eingesetzten Maschinen wurden in vier Altersklassen aufgeteilt. Alle befragten Unternehmen betrieben Maschinen in den Altersklassen ≤ 5 Jahre, 6-12 Jahre und 13-20 Jahre. Nur bei einem Unternehmen waren keine Maschinen älter als 20 Jahre im Einsatz. Das durchschnittliche Alter aller betrachteten Maschinen betrug mehr als 10 Jahre.

Tabelle 2. Profile und Bedarfe der befragten Maschinenbetreiber

Profil	Fertigungsart (überwiegend)	Am höchsten priorisierter Bedarf
1	Einzel-/Kleinserienfertigung	Technische Ausfälle bedingt durch Kollisionen
2	Mittelserienfertigung	Optimierung des Fertigungsprozesses
3	Großserienfertigung	Technische Ausfälle bedingt durch Verschleiß

Die Maschinenbetreiber konnten anhand der Losgröße in drei Profilen eingeteilt werden, die auch einer unterschiedlichen Priorisierung der Bedarfe entsprechen (Tabelle 2). Betreiber aller drei Profile meldeten einen Bedarf an den folgenden Funktionen:

- Überprüfung des NC-Programms/virtuelles Einfahren
- Transparenzsteigerung im Fertigungsprozess und Prozessoptimierung
- Zustandsorientierte Instandhaltung

Aus der unterschiedlichen Priorisierung der Bedarfe kann abgeleitet werden, dass die Funktionen, dessen Nachrüstung am wirtschaftlichsten ist, von der Art des Fertigungsbetriebs abhängen. Somit ist es bei Lösungen für die Nachrüstung von Industrie 4.0 Funktionen an bestehenden Werkzeugmaschinen vorteilhaft, wenn diese modular an den jeweiligen Bedarf des Betriebs und gegebenenfalls auch den Bedarf von einzelne Maschinen oder Fertigungsbereichen angepasst werden kann.

4 Modulare Architektur für die Nachrüstung

Basierend auf den im Stand der Technik und Forschung dokumentierten Industrie 4.0 Funktionen und der Analyse des Bedarfs von Maschinenbetreibern wurde die Architektur für ein modulares Nachrüstkit zur Implementierung von Industrie 4.0 an bestehenden Werkzeugmaschinen entwickelt. Daten aus den folgenden Datenquellen werden per Ethernet innerhalb des lokalen Maschinennetzes bereitgestellt:

- Maschinensteuerung
- Vernetzte, intelligente Maschinenkomponenten (*Connected Smart Components*) [15, 16]
- Intelligente Sensoren (*Smart Sensors*)

Eine erste lokale Verarbeitung der Daten findet also innerhalb der jeweiligen Datenquelle statt, um eine standardisierte Übermittlung zu ermöglichen. Die Auswertung der Daten, dessen Visualisierung und die Ableitung von Handlungen ist prinzipiell auf vier unterschiedlichen Ebenen möglich: integriert am Datenursprung, an der Maschine, zentralisiert innerhalb vom Werk (z.B. Private Cloud), zentralisiert außerhalb vom Werk (z.B. Public Cloud) [17]. Bei der Wahl der Ebene müssen IT-Sicherheit, Datenschutz und Datenhoheit, Datenvolumen und Bandbreite, Rechenkapazität sowie die Latenz berücksichtigt werden. Außerdem ist es von zentraler Bedeutung, negative Auswirkungen auf die Grundfunktion der Maschine zu vermeiden und das Ausrollen auf einen diversen Maschinenpark zu ermöglichen. Aus diesen Gründen wird im Nachrüstkit ein zusätzlicher Rechner als Edge-Gerät eingesetzt, der in den Schaltschrank jeder nachgerüsteten Maschine eingebaut wird. Auswertungen, die auf Daten aus mehr als einer Quelle basieren, werden auf Maschinenebene lokal auf dem Edge-Gerät durchgeführt. Gleichzeitig besteht die Möglichkeit bei Bedarf eine Datenübertragung in die Cloud einzuschalten, beispielsweise für maschinenübergreifende Auswertungen in Cloud-Applikationen oder falls die Rechenkapazität des lokalen Rechners nicht ausreicht. In Bild 1 ist die Architektur des Nachrüstkits dargestellt.

Die Konfiguration des modularen Nachrüstkits erfolgt einerseits durch die Auswahl von Hardware-Bausteinen, die jeweils eine Datenquelle bilden, andererseits durch die Installation von Software-Bausteinen als Edge-Applikationen für die Auswertung der Daten. Das Edge-Gerät bildet die Brücke zwischen dem maschineninternen Netzwerk und dem übergeordneten Unternehmensnetzwerk. So wird die Schnittstelle zum Unternehmensnetzwerk standardisiert und auf eine IP-Adresse pro Maschine reduziert. Durch geeignete Einstellungen im Betriebssystem des Edge-Geräts wird die IT-Sicherheit verbessert. Im maschineninternen Ethernet-Netzwerk werden die Daten an das Edge-Gerät gesendet. Dort werden sie von geeigneten Adapter empfangen, die ebenso als Edge-Applikationen implementiert sind, und den anderen Applikationen bereitgestellt. Sowohl die Edge-Applikationen zur Auswertung als auch die Adapter werden mittels Container-Virtualisierung (z.B. Docker) gekapselt. Sie werden von ihren jeweiligen Anbietern auf der Cloud-Ebene bereitgestellt und können mit wenig Aufwand von dort auf Edge-Geräte geladen, installiert und konfiguriert werden. Die Kommunikation zwischen den Applikationen innerhalb des Edge-Geräts läuft über einen internen Datenbus basierend auf dem Netzwerkprotokoll MQTT. Ergebnisse der Auswertungen werden webbasiert visualisiert und im übergeordneten Unternehmensnetzwerk bereitgestellt, so dass diese auf beliebigen Endgeräten dargestellt werden können.

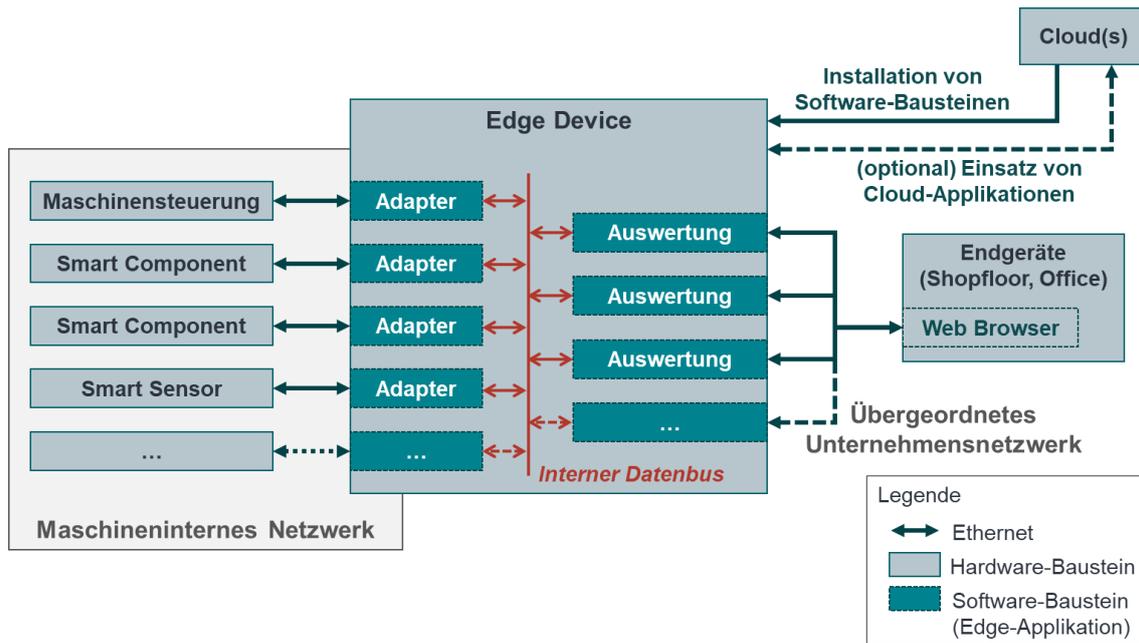


Bild 1 Architektur für die Nachrüstung

5 Implementierung eines Nachrüstkits

Basierend auf der im vorherigen Abschnitt dargestellten Architektur wurde ein Nachrüstkit entwickelt. Als Edge-Gerät wird das Produkt *SINUMERIK Edge* von Siemens eingesetzt. Dadurch ist es mit wenig Aufwand möglich, die in Europa weit verbreitete Maschinensteuerung *SINUMERIK 840D* anzubinden. Neben der Maschinensteuerung wurden die folgenden Datenquellen jeweils als *Smart Component* oder *Smart Sensor* angebunden:

- Messung von Axiallast, Moment und Temperatur an Kugelgewindetriebsen [9]
- Schwingungsmessung durch einen Beschleunigungssensor
- Körperschallmessung an Führungswagen und Kugelgewindetriebsen

Für jede Datenquelle findet eine lokale Vorverarbeitung der Daten statt, bevor diese anschließend über das maschineninterne Ethernet-Netzwerk an das Edge-Gerät übertragen werden. Das Nachrüstkit kann nach Bedarf um weitere Datenquellen erweitert werden. Neben der Anbindung der Datenquellen wurden auch Software-Bausteine für die Auswertung der erfassten Daten als Edge-Applikationen entwickelt:

- Erfassung des Werkzeugverschleißes basierend auf Steuerungsdaten
- Online Schwingungsdiagnose
- Modellbasierte Überwachung der Zerspankräfte basierend auf Steuerungsdaten

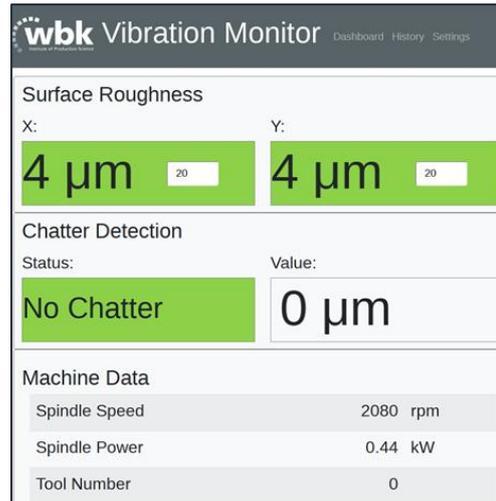


Bild 2 Webbasierte Nutzeroberfläche am Beispiel der Schwingungsdiagnose

Diese Applikationen wurden auf die Cloud-Plattform MindSphere hochgeladen, um sie anschließend auf mehreren Edge-Geräten zu installieren. Die Ergebnisse dieser Auswertungen werden jeweils in einer webbasierten Nutzeroberfläche dargestellt (Bild 2). Außerdem werden die um Körperschallsensoren erweiterten Linearführungen zu intelligenten Komponenten, die neben der netzwerkbasierten Bereitstellung von Messdaten auch eine lokale Berechnung eines Schmierkennwerts durchführen (Schaeffler DuraSense).

Das Nachrüstkit wird zunächst an zwei bestehenden Bearbeitungszentren des Typs DMC 60H erprobt (Baujahr 1997), siehe Bild 3. Eine dieser Maschinen befindet sich im Labor des Instituts für Produktionstechnik des KIT und wurde mit einer Maschinensteuerung der aktuellen Generation nachgerüstet. Die zweite Maschine befindet sich im produktiven Einsatz beim Unternehmen Heidelberger Druckmaschinen und besitzt noch die ursprüngliche Maschinensteuerung der Produktgeneration *840D powerline*. Durch eine prototypische Erweiterung der bisherigen Schnittstellen wurde ermöglicht, auch Maschinen mit 840D powerline Steuerungen an SINUMERIK Edge anzubinden. An der ersten Maschine wurde der obengenannte Beschleunigungssensor zur Schwingungsmessung am Gehäuse der Hauptspindel angebracht, da dort die größten Schwingungsamplituden während des Betriebs dieser Maschine festgestellt wurden. Die Einheit zur Messung von Axiallast, Moment und Temperatur wurde am Kugelgewindetrieb der Z-Achse integriert. Außerdem wurden die Körperschallsensoren an Führungswagen und Kugelgewindetrieb der Vorschubachsen X und Z angebracht.



Bild 3 Erste Erprobung an zwei Bearbeitungszentren (links im Labor, rechts in der Produktion)

6 Zusammenfassung und Ausblick

Um das Ausrollen von Industrie 4.0 Funktionen in der spanenden Fertigung zu ermöglichen, ist eine anpassbare Lösung für die Nachrüstung bestehender Werkzeugmaschinen notwendig. Hierfür wurde eine Architektur entwickelt und als modulares Nachrüstkit implementiert, anhand dessen Maschinenbetreiber Funktionen in den Bereichen der Prozessüberwachung und der zustandsorientierten Instandhaltung anwenden können. Die Auswahl der Hardware- und Software-Bausteine innerhalb des Nachrüstkits kann dank des modularen Ansatzes individuell bestimmt werden, abhängig von Fertigungsart, Maschinentyp und Unternehmenszielen. Neben der Erweiterung

der unterstützten Datenquellen und Auswertungen ist ein Ausrollen des Nachrüstkits auf weitere Maschinen geplant. Im Rahmen laufender Arbeiten wird das entwickelte Nachrüstkit in der realen Produktion erprobt, um die Applikationen zu optimieren. Aufgrund dieser Erfahrungen werden die Kosten und der wirtschaftliche Nutzen der Nachrüstung ermittelt. Außerdem wird ein Werkzeug für die assistierte Auswahl von Bausteinen entwickelt, um auch die wirtschaftliche Konfiguration der Nachrüstung zu unterstützen.

Literatur

- [1] DMG Mori: Monitoring. Stand: 06.04.2020. Internet: <https://de.dmgmori.com/produkte/digitalisierung/integrated-digitization/monitoring>. Zugriff am 06.04.2020
- [2] Yamazaki Mazak UK Ltd.: Industry 4.0. Stand: 06.04.2020. Internet: <https://www.mazakeu.de/industry4/>. Zugriff am 06.04.2020
- [3] Industry 4.0: Capturing value at scale in discrete manufacturing, McKinsey & Company, 2019
- [4] Elforjani, M.; Shanbr, S.: Prognosis of Bearing Acoustic Emission Signals Using Supervised Machine Learning. IEEE Transactions on Industrial Electronics 65 (2018) 7, S. 5864–5871
- [5] Zhang, L.; Gao, H.; Wen, J. et al.: A deep learning-based recognition method for degradation monitoring of ball screw with multi-sensor data fusion. Microelectronics Reliability 75 (2017), S. 215–222
- [6] Schopp, M.: Sensorbasierte Zustandsdiagnose und -prognose von Kugelgewindetrieben. Düren: Shaker 2009
- [7] Möhring, H.-C.; Bertram, O.: Integrated autonomous monitoring of ball screw drives. CIRP Annals - Manufacturing Technology 61 (2012) 1, S. 355–358
- [8] Hillenbrand, J.; Spohrer, A.; Fleischer, J.: Zustandsüberwachung bei Kugelgewindetrieben: Integration von DMS-Sensorik in Kugelgewindetriebemuttern. WT Werkstatttechnik 108 (2018) 7-8, S. 493–498
- [9] Spohrer, A.: Steigerung der Ressourceneffizienz und Verfügbarkeit von Kugelgewindetrieben durch adaptive Schmierung. Düren: Shaker 2019
- [10] Zhu, K.; Zhang, Y.: A generic tool wear model and its application to force modeling and wear monitoring in high speed milling. Mechanical Systems and Signal Processing 115 (2019), S. 147–161
- [11] Zhang, X. Y.; Lu, X.; Wang, S. et al.: A multi-sensor based online tool condition monitoring system for milling process. Procedia CIRP 72 (2018)
- [12] Shigematsu, T.; Koike, R.; Kakinuma, Y. et al.: Sensorless Tool Collision Detection for Multi-axis Machine Tools by Integration of Disturbance Information. Procedia CIRP 57 (2016)
- [13] Liu, C.; Zhu, L.; Ni, C.: Chatter detection in milling process based on VMD and energy entropy. Mechanical Systems and Signal Processing 105 (2018), S. 169–182
- [14] Netzer, M.; Michelberger, J.; Fleischer, J.: Intelligente Störungserkennung einer Werkzeugmaschine. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 114 (2019) 10, S. 635–638
- [15] Barton, D.; Gönzheimer, P.; Schade, F. et al.: Modular smart controller for Industry 4.0 functions in machine tools. Procedia CIRP 81 (2019), S. 1331–1336
- [16] Barton, D.; Gönzheimer, P.; Qu, C. et al.: Self-describing connected components for live information access within production systems. Procedia Manufacturing 24 (2018), S. 250–257
- [17] Mueller, H.; Gogouvis, S. V.; Seitz, A. et al.: Seamless Computing for Industrial Systems Spanning Cloud and Edge. 2017 International Conference on High Performance Computing & Simulation (HPCS), Genoa, Italy, 2017 - 2017, S. 209–216

David Barton, Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
wbk Institut für Produktionstechnik
Kaiserstraße 12, 76131 Karlsruhe
Tel. +49 (0)1523 / 950-2565
david.barton@kit.edu
www.wbk.kit.edu

Sebastian Mergler
Schaeffler Technologies AG & Co. KG
Georg-Schäfer-Straße 30, 97421 Schweinfurt

Reinhard Stamm
Heidelberger Druckmaschinen AG
Gutenbergring, 69168 Wiesloch

Cedric Bardenhagen
Siemens AG
Weissacher Str. 11, 70499 Stuttgart