



14. Seminar Furtwangen | Moderne Schleiftechnologie und Feinstbearbeitung | Mai 2023

ARGUS: Sicheres Schleifen im Maximalbereich

Walter Graf und Dr. Christian Dietz, Reishauer AG

Das kontinuierliche Wälzschleifen von Zahnrädern hat sich als bevorzugte Methode für die Hartfeinbearbeitung von Automobilzahnradern etabliert. Die Werkzeugmaschinen – die Zahnradschleifmaschinen – haben einen hohen Reifegrad erreicht, so dass auf der mechanischen Seite nur noch wenig Raum für Verbesserungen bleibt. Jüngste Entwicklungen in der Prozess- und Bauteilüberwachung haben jedoch eine neue Dimension in die Leistungsfähigkeit dieser Zahnradschleifmaschinen gebracht, die sicheres Schleifen bei Maximalausstoss ermöglicht. Zwei Aspekte dieses Überwachungssystems werden hier näher beschrieben: Schleifintensität und Komponentenmonitoring.

Künstliche Intelligenz

Das hier vorgestellte Reishauer Prozess- und Bauteilüberwachungssystem – ARGUS – basiert auf künstlicher Intelligenz (KI) ^[Graf22]. Damit künstliche Intelligenz effektiv eingesetzt werden kann, müssen mehrere Voraussetzungen erfüllt sein. Zunächst wird eine grosse Menge an kuratierten Daten benötigt, aus denen sich physikalische Gesetzmässigkeiten ableiten lassen, um Algorithmen zu entwerfen. In diesem Zusammenhang werden auch Experten und Fachleute aus der Getriebeindustrie benötigt, die die für die KI erforderlichen Algorithmen programmieren können. Kurz und gut: KI muss hart erarbeitet werden! Was in der KI als “Intelligenz” bezeichnet wird, basiert auf langwierigen Prozessen, bei denen geprüfte und kuratierte Datensätze durch neuronale Netze geschickt werden. Anschliessend müssen die Ergebnisse der Datenausgabe überprüft, überarbeitet und erneut durch das neuronale Netz geschickt werden (siehe Abbildung 1). Auf diese Weise lernt das KI-System kontinuierlich, korrigiert sich ständig selbst und passt die Algorithmen in seinen verborgenen Schichten (hidden layers) entsprechend an. Dieser Prozess wird auch als Deep Learning bezeichnet.

REISHAUER

Gear Grinding Technology

Reishauer AG | info@reishauer.com | reishauer.com

Was kann künstliche Intelligenz also viel besser als menschliche Intelligenz? Kurz und bündig: KI kann die sprichwörtliche Nadel im Heuhaufen blitzschnell finden. KI basiert auf Mustererkennung und deckt ungewöhnliche Zusammenhänge in riesigen Datenmengen auf, die der menschlichen Intelligenz normalerweise entgehen würden. KI ist in erster Linie eine Entscheidungstechnologie. Bei der Überwachung von Bauteilen sind Schnelligkeit und Genauigkeit der Entscheidungsfindung unabdingbar, und KI ist blitzschnell.

Künstliche Intelligenz & neurale Netzwerke

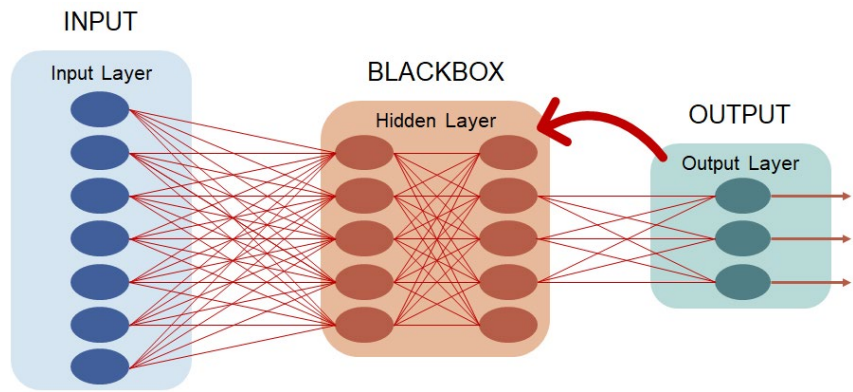


Abbildung 1: KI und Neuronales Netzwerk

Schleifprozessüberwachung (Schleifintensität)

Gemäss der deutschen Norm DIN 8589 ist die Definition des Schleifens «ein Bearbeitungsverfahren mit geometrisch unbestimmten Schneiden». Diese Definition kann zu dem Missverständnis führen, dass der Schleifprozess nur vage definierbar ist.

Dieser Vortrag räumt mit dem Begriff «vage definierbar» auf. Es wird dargelegt, dass selbst ein so komplexer Prozess wie das kontinuierliche Wälzschleifen von Zahnrädern mit Hilfe von KI durch das ARGUS-Prozessüberwachungssystem definiert, stabilisiert und in seinen Grenzen festgelegt werden kann. In diesem Text wird das Prozessüberwachungssystem als «System» bezeichnet. Das System

macht den Zahnradschleifprozess transparent und analysierbar. Seine Anwendung führt zu einer Null-Fehler-Produktion und liefert eine 100%ige Rückverfolgbarkeit der Werkstücke. Vereinfacht ausgedrückt, überwacht das System die Abricht- und Schleifintensität durch intelligente Echtzeit-Datenverarbeitung und bewährte KI-Algorithmen. Die Abricht- und Schleifdaten jedes geschliffenen Zahnrads werden in einer Datenbank erfasst und gespeichert und bleiben zu 100% rückverfolgbar. Das System bietet umfassende Datenanalysemöglichkeiten mit gespeicherten und nachverfolgten Prozess- und Werkzeugdaten sowie eine individuelle Werkstückidentifikation über DMC (Data Matrix Code). Voreingestellte Auswertungsgrenzen regeln das Zusammenspiel der Prozesse und lösen die automatische Aus-

schleusung von Werkstücken aus, die ausserhalb der eingestellten Grenzen liegen.

Der Umfang des Prozess- und Komponentenüberwachungssystem wird in Abbildung dargestellt, wobei einige Themen aufgrund der beschränkten Anzahl der Seiten nicht angesprochen werden.

Eines der wesentlichen Merkmale der Wälzschleifmaschine ist die hohe Leistungsausbringung in kurzer Zeit. Bei Zahnrädern von Automobilgetrieben reichen die Schleifzeiten von acht Sekunden für kleine Ritzel bis zu einer Minute für die sogenannten Ring Gears. Aus diesem Grund können nicht alle geschliffenen Teile auf CNC-Messmaschine gemessen werden, da die Messzeiten viel höher sind als die Schleifzeiten und die damit verbundenen Kosten prohibitiv hoch wären. Aus diesem Grund verlässt sich die Automobilgetriebeindustrie auf Stichprobenmessungen, die nur einen winzigen Teil des gesamten Fertigungsloses ausmachen, im Allgemeinen nicht mehr als fünf Prozent.

Das verbleibende Risiko des Schleifens von Werkstücken unzureichender Qualität lässt sich ausschalten, wenn die während des Bearbeitungsprozesses erzeugte Schleifintensität als Bewertungskriterium herangezogen wird. Die Echtzeitanalyse des Intensitätssignals identifiziert ein fehlerhaftes Werkstück während des Schleif-

ARGUS Nutzen



Abbildung 2: Elemente und Nutzend des Prozessüberwachungssystems

prozesses, sollten die eingestellten Signalwerte überschritten wurden. Darüber hinaus führt dieses Verfahren zu einer 100%-Kontrolle der Werkstücke. Fehlerhafte Werkstücke werden somit automatisch aus dem Fertigungsprozess entfernt. Wiederkehrende fehlerhafte Werkstücke werden als systematischer Fehler erkannt, der zu einem Abbruch des Schleifprozesses mit einer entsprechenden Fehlermeldung an den Bediener führt.

Die Ursache für die Überschreitung der Schleifintensität können zu viel oder zu wenig Schleifaufmass, Härteverzüge oder übermäßige Unrundheit aus den Vorbearbeitungsprozessen sein. Das System verfügt über integrierte Sensoren zur Überprüfung der Abmessungen der vorbereiteten Zahnradteile. Übermäßige Unrundheit oder kumulierte Steigungsfehler führen entweder zu einem zusätzlichen Schleifhub oder zur Zurückweisung und Entfernung des Werkstücks, wenn das System feststellt, dass auch zusätzliche Schleifhübe kein gutes Teil ergeben würden. «Schleifintensität» im Systemzusammenhang ist ein Kraftmodell zur Kalibrierung und Normierung der Schleifkräfte^[Dietz17]. Das Kraftmodell berücksichtigt die sich ständig ändernde Spanbildungszone einschliesslich der lokalen Schnittkinematik bei Änderungen des Schleifscheibendurchmes-

Schleif- und Abrichtintensitäten

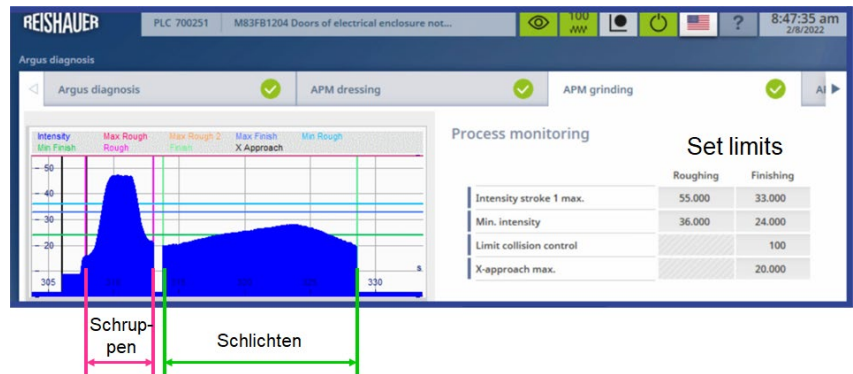


Abbildung 3: Progression der Schleifintensität

sers, den sich ändernden Schleifzustand durch Variationen der Scheibendrehzahl und die vorherrschenden Hebelverhältnisse über die Schleifscheibenbreite in Bezug auf die Schleifspindellagerung, die die Scheibe nur einseitig trägt. Durch diese Normierung und Kalibrierung lassen sich sehr enge Grenzen setzen, die zu einer hochauflösenden Fehlerbewertung führen. So können auch kleine Kraftschwankungen während des Prozesses erkannt und automatisch ausgewertet werden. Ein typischer Verlauf eines 2-stufigen Schleifintensitätssignals ist in Abbildung 3 dargestellt, wie er auf dem CNC-Monitor der Werkzeugmaschine erscheint. Der obere dunkelblaue Bereich auf der linken Seite entspricht dem Schrupp-durchgang, der untere dunkel-

blaue Bereich auf der rechten Seite entspricht dem Schlichtdurchgang. Die Obergrenze des Schruppschleifdurchgangs ist auf 55 eingestellt, während der Prozess mit einer Intensität von 48 läuft. Für den Schlichtdurchgang wird die Obergrenze auf 33 festgelegt, wobei der Prozess mit einer Intensität von 25 läuft. Schruppen und Schlichten liegen also innerhalb der Grenzen. Das Werkstück wird automatisch aus dem Produktionszyklus genommen, wenn die Schrupp- oder Schlichtgrenzen überschritten werden. Die Grenzwerte werden entweder vom Prozessüberwachungssystem vorgeschlagen, das auf der Selbstlernfähigkeit der KI basiert, oder vom Benutzer festgelegt, der im Laufe der Zeit und über viele Produktionslose hinweg eigene Erfahrungen gesammelt hat.

ARGUS Schleifscheibenüberwachung



Abbildung 4: Härtevariation über die Schleifschneckenbreite

Die Schleifintensität zeigt, ob eine Schleifschnecke über ihre Breite und ihren nutzbaren Durchmesser eine gleichbleibende Schnittleistung aufweist. In der Regel bewerten die Anwender die Schleifscheiben subjektiv, da empirische Daten nicht vorliegen. Der inhomogene Härteverlauf kann nur indirekt über sich verschlechternde Zahnflankenprofile beurteilt werden, auch wenn diese Verschlechterung andere Ursachen haben kann. Mit dem System wird der Härteverlauf über die Schleifscheibenbreite und den sich ändernden Durchmesser sichtbar, messbar und klassifiziert, wie in Abbildung 4 dargestellt.

Abbildung 4 zeigt die Schleifintensitäten über die Shift-Achsenbreitenbereich Y von etwa 5300 Werkstücken. Die obere Punktvolke stellt die Schrupphübe dar, die untere, dichtere Punktvolke, die Schlichthübe. Der Schrupphub zeigt eine von rechts nach links abnehmende Schleifintensität. Die Schlichthübe zeigen dagegen die umgekehrte Richtung, d. h. eine Zunahme der Schleifintensität von rechts nach links. Die Abnahme der Schleifintensitäten während des Schruppens deutet auf einen prozessbedingten Verschleiss der Schleifschnecke hin. Das zugrunde liegende kalibrierte Kraftmodell garantiert in der Regel ein nahezu konstantes Niveau der Schleifintensitäten über die gesamte Schleifscheibenbreite. Daher liegt der Schluss nahe, dass das Absinken der Intensitätswerte während des Schruppprozesses ausschliesslich auf eine kontinuierliche mikroskopische Verschlechterung der Bindungskornmatrix der Schleifschnecke zurückzuführen ist. Diese Verschlechterung führt zu einem immer geringeren Materialabtrag an den Werkstücken. Die zunehmende Schleifintensität während der Schlichthübe deutet auf die damit einhergehende Kompensation des geringeren Materialabtrags der vorangegangenen Schrupphübe hin. Die beschriebene Verschleisswirkung auf die Gewindefscheibe führt zu einem instabilen Prozess und Ausschuss. Diese Ausschussteile mussten während des Prozesses entfernt werden und sind als dunkelrote Punkte auf der linken unteren Seite der Punktvolke des Schrupphubs dargestellt. Der Anwender musste die Schleifscheibenspezifikation ändern, um den Prozess zu stabilisieren.

Die zyklische Maschinenkomponentenanalyse des ARGUS-Systems bietet ein hervorragendes Potenzial für eine INLINE-Beurteilung des Maschinenzustands in Echtzeit. Anhand von zyklisch wiederholten und standardisierten Tests kann der allgemeine und aktuelle Maschinenzustand beurteilt und erfasst werden. Wie in

Detektieren & Analysieren EOL-Probleme

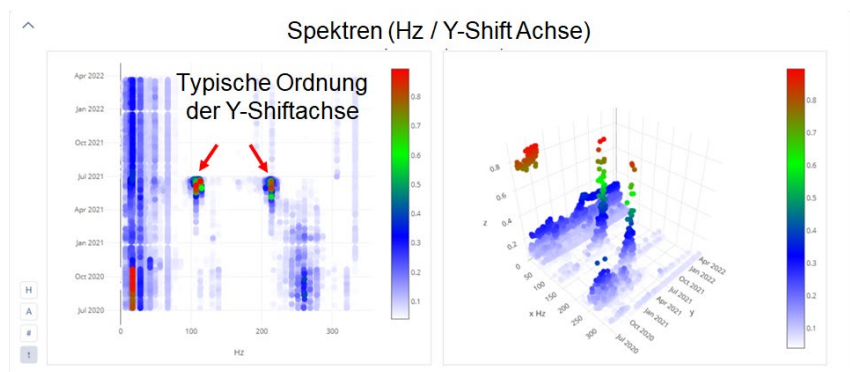


Abbildung 5: Bauteil-Zyklusmessungen der Shift-Achse Y

Abbildung 5 dargestellt, lässt sich mit ARGUS das Verschleissverhalten eines Lagers der Shift-Achse leicht vorhersagen bzw. analysieren. Die Darstellung der Messsignale über den Frequenzbereich ist in der Regel vorteilhaft für die Lösung spezifischer Probleme. Im zeitlichen Rückblick, wie in Abbildung 5 dargestellt, hatte der Lagerverschleiss der Shift-Achse Y seit April 2021 zugenommen und im Juni 2021 seinen Höhepunkt erreicht. Das Problem wurde durch den Austausch der defekten Lagerkomponente gelöst. Zusammenfassend lässt sich zeigen, dass Bauteilschäden frühzeitig erkannt werden können. Diese Früherkennung bedeutet, dass potenzielle EOL-Probleme im Zusammenhang mit Maschinenkomponenten frühzeitig behoben und vermieden werden können.

Das ARGUS-System ermöglicht eine Rückrechnung der Bauteilmessungen auf Basis einer WEB-NVH-Analyse. Da alle Schleiftechnik- und Geometriedaten in einer cloudbasierten Datenbank erfasst sind, kann eine Rückrechnung auf Basis patentierter Methoden durchgeführt werden, um die für eine EOL-Anregung relevanten Bauteilmessungen und das Verhalten im Getriebe aufzuzeigen. Aus einem Datensatz der verfügbaren Bearbeitungstechnik und Geometriedaten werden die Daten aller Achsen und deren EOL-Aufträge generiert. So lässt sich leicht ein Problem identifizieren, das seinen Ursprung in der Y-Achse hat

und zu einer Anregung im Getriebe im Auftrag 313 geführt hat. Alternativ, und noch einfacher, kann die detaillierte Suche nach korrelierenden NVH-auslösenden Aufträgen auch über das ARGUS WEB System durchgeführt werden. In diesem Beispiel wurde eine eingehende Untersuchung für eine Ordnung 313 durchgeführt. Der entscheidende Punkt bei der Analyse von EOL-Problemen ist natürlich die Interpretation der ausgewählten Probleme. Eine Standardlösung ist das Reverse Engineering. Trotz aller Bemühungen und Massnahmen können auf dem EOL-Prüfstand jedoch immer noch Geräuschprobleme auftreten, auch wenn dies nur selten der Fall ist. Sobald eine bestimmte Ordnung im Getriebe erkannt und identifiziert wurde, kann eine Ordnungsanalyse das wahrscheinliche Maschinenproblem identifizieren.

Zusammenfassung

Die Automatische Komponentenüberwachung und das Monitoring der Schleifintensität sind zwei wichtige Aspekte von ARGUS, um sich dem Wunsch der Null-Fehler-Produktion immer weiter zu nähern, die Schleifleistung sicher und an der Grenze des Möglichen zu fahren und somit auch die Produktivität zu erhöhen und – was immer wichtig ist – die Gesamtkosten zu reduzieren.

Dieser Vortrag wurde am 4. Mai 2023 anlässlich des 14. Seminar «Moderne Schleiftechnologie und Feinstbearbeitung» KSF, Hochschule Furtwangen, vorgetragen.

KSF ist das Kompetenzzentrum für Spanende Fertigung der Hochschule Furtwangen in Tuttlingen. Weitere Informationen unter:

[ksf-hfu.de](https://www.ksf-hfu.de)

Autoren

Dr. Christian Dietz ist Fachbereichsleiter R&D (Research and Development) bei Reishauer in Wallisellen/CH.

Walter Graf ist Senior Project Manager bei Reishauer.

Literatur

[Graf22] <https://www.geartechnology.com/articles/29899-making-gear-grinding-transparent>

[Graf22] <https://www.automotivepowertraintechologyinternational.com/online-magazines/transmission-technology/in-this-issue-october-2022.html>

[Dietz17] Dietz, Christian, Numerische Simulation des Wälzschleifprozesses unter Berücksichtigung des dynamischen Verhaltens des Systems Maschine – Werkzeug – Werkstück, PhD Dissertation 2017, ETH No 24172.