# Messungen am Frenco-Prüfstand

Im Rahmen des Teamprojektes wurden am Frenco-Prüfstand Messungen zu der Paarung von Zahnrädern durchgeführt. Es handelt sich bei diesen Zahnrädern um Zahnräder des Typs Z13 bzw. Z19 – wobei die Ziffer für die Anzahl an einzelnen Zähnen steht. Es gibt jeweils 100 Zahnräder der Typen Z13 bzw. Z19 – jedes dieser Zahnräder hat eine singuläre Gravur und ist somit wohlunterscheidbar. Es ergeben sich insgesamt 10.000 mögliche Paarungen. Innerhalb der Messungen wurden jeweils ein Zahnrad des Type Z13 und ein Zahnrad des Typs Z19 gegeneinander abgerollt, um im Anschluss mögliche Abweichungen feststellen zu können. Zielsetzung der Versuchsreihe war es ausfindig machen zu können, welche Zahnradpaarung zu minimalen Fehlern in Bezug auf bestimmte Parameter führen kann. In diesem Kontext wurden die beiden Größen Wälzfehler (Fi) und Wälzsprung (fi) zum einen in vorwärts- und zum anderen rückwärts Rotation betrachtet, wobei weitere Parameter nicht in die nähere Dokumentation eingeflossen sind.

Im Rahmen des Versuchsaufbaus wurden insgesamt 100 Messungen durchgeführt. Es wurden somit 100 Paarungen von Z13- mit Z19 Zahnrädern erfasst. Um eine weitestgehend gleichmäßige Abdeckung des Versuchsraums zu gewährleisten, gilt in einem Koordinatensystem die x-Achse als Nummerierung der Z13 Zahnräder und die y-Achse als Nummerierung der Z19 Zahnräder. In einem weiteren Schritt wurde jede der 100 registrierten Messungen an dem Frenco-Prüfstand innerhalb des Koordinatensystems durch einen grünen Kastendargestellt.    
Beispielsweise erhält die Zahnradpaarung (Z13: 1, Z19: 2) einen grünen Kasten innerhalb des Koordinatensystems (da diese innerhalb der 100 Messungen erfasst wurde) an der Stelle (x = 1, y = 2) – was wiederum den jeweiligen Zahnradpaarung entspricht. Es ist dahingehend möglich gewesen anhand der Rasterstruktur Schlüsse über mögliche Lücken im Versuchsraum zu ziehen und bei weiteren Tests diese Bereiche abzudecken. Kasten mit grüner Markierung waren getätigte Messungen, nicht markierte Kasten waren Paarungen, die innerhalb der 100 Messungen nicht erfasst worden sind. Es ist die Rede von weitestgehend gleichmäßiger Abdeckung des Versuchsraumes, weil wir bei der Wahl der 100 Stichproben zunächst random-sampling vollzogen haben und in einem weiteren Schritt das Raster verwendet haben, um mögliche nicht abgedeckte Bereiche des Paarungsraumes zu schließen. Die Implementierung eines Ansatzes in Python, der uns ausgibt welche Art von Paarung uns einen maximalen Informationsgehalt liefern kann, ist in diesem Fall nicht geglückt. Vielmehr wurde händisch nachvollzogen welche weiteren Messungen uns einen hohen Informationsgehalt liefern können, dahingehend welche Bereiche noch nicht ideal abgedeckt worden sind.

Mögliche Auswertungen über Wälzfehler als auch Wälzsprung konnten bereits innerhalb von Excel mit Pivot-Tabellen visualisiert werden. Um eine Vergleichbarkeit der Paarungen aus den Frenco-Messungen mit den Werten der Reany-Software zu ermöglichen, haben wir ein Python Skript geschrieben. Dieses Skript liest die jeweilige Paarung aus den 100 bestehenden Frenco-Messungen ein und sucht dann in den Excel Tabellen von Z13 & Z19 der Reany-Messungen nach den relevanten Zahnrädern. Sind diese gefunden, wird mittels der Reany-Messungen die Frenco-Messung reproduziert und im Anschluss wird eine Korrelationsanalyse zwischen des Matchings aus den Reany Daten und den Frenco Daten vollzogen.

Im allgemeinen Rahmen des Versuchsaufbaus kam es allerdings zu Problemen. So ist uns rückblickend bewusst, dass das Einspannverfahren der Zahnräder auf den Prüfstand von mangelnder Genauigkeit war. Die sogenannte M1-Schraube wurde bei Messungen zu stark angezogen, was zur Folge hatte die Messwerte zu beeinflussen – dahingehend konnte auch nicht festgelegt werden mit welcher Kraft (Nm). Weiterhin hatten mehrere Probanden neben uns Zugang zum Mess-Raum, eine Änderung der Versuchsparameter durch Dritte ist somit nicht auszuschließen, da an dem Frenco-Prüfstand auch andere Messungen absolviert wurden und somit in einem Fall auch das Tarieren des Prüfstandes erneut durchgeführt werden musste.

# Korrelationsanalyse

Wir haben eine multilineare Korrelation zwischen den Reany-Daten und den Frenco-Messungen auf Basis der erfassten Mess- und Simulationsdaten durchgeführt. Diese Untersuchung ermöglicht es, Zusammenhänge zwischen den beiden Datensätzen zu identifizieren und deren Beziehung genauer zu verstehen.

Als Eingabewerte dienen die Werte Fi links und rechts der beiden Zahnräder. Der abhängige Parameter, der in dieser Analyse betrachtet wird, ist der Wälzfehler. Durch die Betrachtung dieses Parameters können Rückschlüsse auf die Auswirkungen der Eingabewerte auf die   
Qualität der Zahnräder gezogen werden.

Die Ausgabe mit dem Namen "Coefficients" beschreibt die Rate, mit der der Wälzfehler steigt, wenn die Frenco-Messung um 1% ansteigt. Diese Information ist hilfreich, um zu verstehen, wie sich Änderungen der Eingabewerte auf den abhängigen Parameter auswirken.

Die Ausgabe "Intercept" liefert einen prognostizierten Wert für den Wälzfehler, wenn alle abhängigen Eingabeparameter den Wert 0 haben. Dieser Wert gibt Aufschluss darüber, wie sich die Qualität der Zahnräder verändert, wenn alle anderen Einflussfaktoren neutral sind.

Die Tatsache, dass der "Intercept" sehr nahe bei Null liegt, deutet darauf hin, dass eine signifikante Korrelation zwischen den Reany-Daten und den Frenco-Messungen besteht. Dies bedeutet, dass eine Verbindung zwischen den beiden Datensätzen besteht und Veränderungen in den Eingabewerten eine Auswirkung auf den Wälzfehler haben können.

Darüber hinaus zeigt der "Coefficients"-Wert einen klaren Zusammenhang zwischen den Messwerten und den Reanysimulationen auf. Dies unterstützt die Annahme, dass die beiden Methoden eine ähnliche Tendenz bei der Vorhersage des Wälzfehlers aufweisen.

Es ist jedoch wichtig anzumerken, dass aufgrund der begrenzten Datenbasis und möglicher Messfehler in den Frenco- und Reany-Daten die allgemeine Aussagekraft der Ergebnisse relativ niedrig ist. Es wird empfohlen, weitere Daten zu sammeln und die Korrelation genauer zu beleuchten, um eine robustere Analyse und verlässlichere Schlussfolgerungen zu ermöglichen.

Die gewonnenen Erkenntnisse zur Korrelation könnten als Grundlage dienen, um mithilfe eines neuronalen Netzes mögliche Zahnradpaarungen vorzuschlagen. Hierfür ist es jedoch erforderlich, zusätzliche Daten zu erheben und die Korrelation genauer zu untersuchen. Dieser Ansatz könnte eine vielversprechende Möglichkeit bieten, die Qualität der Zahnräder durch eine optimierte Auswahl der Zahnradpaarungen zu verbessern.

# Verwendung der Reany Software

Um nicht jedes Zahnrad am Frenco-Prüfstand ablaufen lassen zu müssen, hat uns die Frenco GmbH ihre Reany Software zur Verfügung gestellt. Diese Software simuliert unseren Prüfstand an dem wir all die Messungen der Z13/Z19 Paare durchgeführt haben. Allerdings kann die Software dabei nur Aussagen über einzelne Zahnräder treffen und ist nicht geeignet, eine Kombination aus zwei Zahnrädern zu simulieren. Fiktiv und heuristisch gesprochen wird jedes Zahnrad mit dem zugehörigen Meisterrad abgerollt, um Aussagen über die Qualität dieses Rades zu treffen.

Die Software arbeitet mit den gemessenen Punktewolken des Alicona Messgerätes. Die Daten werden in einen MatLab-Code eingelesen, der aus den Wolken sechs Schnitte erzeugt. Gleichzeitig werden dort die Punktewolken am Spanndorn ausgerichtet (auf dieses Thema wird später noch eingegangen). Als Output dieses Codes werden dann Schnitte generiert, die über den CutLayerConverter in die Reany-Software eingelesen werden können.

Als finaler Output der Reany wird eine CSV Datei generiert, aus der man eine Vielzahl an simulierten Daten über das jeweilige Zahnrad auslesen kann.

Wir haben die Reany Software über einen Laptop des KIT genutzt (ID: 0001 69051812). Die Software war schon vorinstalliert und der zugehörige MatLab-Code, der die Schnitte erstellt, war ebenfalls bereits vorhanden. Um den Code zu nutzen, haben wir die Punktewolken, die wir vorher als txt-Datei vom Alicona-Rechner im Institut bezogen haben, in den Input-Ordner (dieser ist an das Schnellzugriff-Menü angehangen) geladen.

Durch den Code run\_auto.m (Wichtig: Dieser Code ist im CutLayerGenerator zu finden, es gibt noch einen anderen Code auf dem Laptop der gleich betitelt ist aber nicht funktioniert!)

werden von allen abgelegten Dateien neue txt-Dateien erstellt, die die Schnitte beinhalten. Die neuen Dateien sind dann im Output-Ordner zu finden (dieser ist ebenfalls am Schnellzugriff angehängt).

Wichtig für unsere Datengrundlage ist, dass wir den MatLabCode für die Schnitte nicht verändert haben. Wir haben den gleichen Code benutzt, sowohl für die Z13 als auch für die Z19 Zahnräder und damit die jeweiligen Schnitte erstellt.

# Datengetriebene Analyse

Im ersten Schritt galt es die vorhandenen Daten, 100 Punktewolken vom Zahnradtyp Z19 und später 200 Punktewolken vom Zahnradtyp Z13, zu analysieren. Diese Daten konnten durch eine Simulation der Alicona-Software ermittelt werden und waren als gegeben anzunehmen. Im Anschluss an die Visualisierung der Punktewolken mit Hilfe von Open3D, wurde sich mit der Extraktion geometrischer Merkmale mit den Maßen und der Struktur der Zähne befasst. Die Beschaffenheit und Struktur der einzelnen Zähne erschien uns als relevante Einflussfaktoren auf unsere zu minimierende Zielgröße, die Drehwegabweichung eines Zahnrads, wobei es hierbei zu betonen gilt, dass wir nur begrenztes Wissen darüber hatten, welche Eigenschaften mit welchem Gewicht auf die Drehwegabweichung wirken.  Hier haben wir einen eindeutigen Bedarf genauerer Untersuchungen erkannt, um die Analyse zielgerichteter durchführen zu können.

Zuvor war allerdings das gegebene CAD-Modell von Z13 und Z19 vom Spanndorn freizuschneiden, also zum Zahnrad parallele Ebenen einzuziehen, die irrelevante Koordinaten entfernen. Ausgehend vom Zentrum der Punktewolke ließ sich eine relative Grundlinie feststellen anhand derer die einzelnen Zähne eindeutig einem Intervall von Winkeln der Größe 19/360 beziehungsweise 13/360 zugeordnet werden konnten.  Somit konnte iterativ jeder Zahn einer Punktewolke mit dem jeweiligen Zahn des CAD-Modells verglichen werden.

Extrahiert wurden so die Werte der mittleren Abweichung eines Zahns vom CAD-Modell, die Varianz dieser Abweichung sowie die maximale und die minimale Abweichung eines Zahns innerhalb eines Zahnrads vom CAD-Modell.

Um die vorgenommenen Analyseschritte und gewonnen Erkenntnisse auch für die zukünftige Produktion erkenntnisbringend zu gestalten, galt es im letzten Schritt verschiedene Forecasting Ansätze zu verfolgen.

Dabei wurden ein lineares Regressionsmodell sowie eine GradientBoosting Regression mit Hilfe von sklearn trainiert. Beide Ansätze brachten teilweise vielversprechende Ergebnisse hervor, wobei uns hier die detaillierte Erklärung, der Werte und insbesondere die Differenzen dieser, noch nicht möglich war.

Als dritten Ansatz wurde ein Neuronales Netz entwickelt, welches äußerst vielversprechende Werte hervorbrachte. Beispielsweise ergab die r^2-Metrik (Der zu erklärende Anteil eines prognostizierten Werts) für mehrere Vorhersagen Werte von 0.6.

Hier ist die Erklärung allerdings ebenso offen und braucht tiefgreifendere Analysen.

Zusammenfassend lassen sich die Forecasting Modelle als vielversprechend einordnen, worauf zukünftige Research Ansätze aufbauen können, um weitere Einblicke zu erhalten.

Die nächsten Schritte sollten sich insbesondere damit beschäftigen, die Qualität des Matchings zwischen Z13 und Z19 Zahnrädern vorhersagen zu können. Hierzu braucht es wohlmögliche eine breite Datengrundlage und insbesondere präzisere Frenco Daten, welche mir leider nicht zugänglich waren. Wir sind davon überzeugt, dass mit zusätzlichen Trainingsdaten und einer technischen Analyse präzise Vorhersagen über das Match zweier Zahnräder möglich sind und dies den Produktionsausschluss langfristig reduzieren kann.