



Mittelstand-Digital
**Zentrum
Hannover**

Zukunft.Digital

Digitalisierung
von der Idee zur Umsetzung
Ausgabe 02/2024



Im Fokus

**Energie smart nutzen:
Innovationen für den
Mittelstand**

Seite 08

Aus der Praxis

**Verstecktes Wissen optimieren –
Wie KI Produktionsmitarbeitende
unterstützen kann**

Seite 22

Aus der Forschung

**Mit neuronalen Netzen zur
präzisen Kraftrekonstruktion
beim Fräsen**

Seite 34



Das Mittelstand-Digital Netzwerk bietet mit den **Mittelstand-Digital Zentren** und der **Initiative IT-Sicherheit in der Wirtschaft** umfassende Unterstützung bei der Digitalisierung. Kleine und mittlere Unternehmen profitieren von konkreten Praxisbeispielen und passgenauen, anbieterneutralen Angeboten zur Qualifikation und IT-Sicherheit. Das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz ermöglicht die kostenfreie Nutzung der Angebote von Mittelstand-Digital.

Weitere Informationen finden Sie unter:
www.mittelstand-digital.de

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Zukunft.Digital

Digitalisierung
von der Idee zur Umsetzung
Ausgabe 02/2024

Inhalt

Aus dem Zentrum

KI-Mentoring: Der Weg zur eigenen KI-Lösung
Seite 06

Im Fokus: Energie-Innovationen

Energie smart nutzen: Innovationen für den Mittelstand
Seite 08

KI für PV-Anlagen: Eigenstromproduktion effizienter gestalten
Seite 10

Energie flexibel einsetzen: Simulation zeigt Möglichkeiten
Seite 14

Interview: Theorie in die Praxis zu übertragen, ist jedes Mal spannend!
Seite 19

Aus der Praxis

Verstecktes Wissen optimieren – Wie KI Produktionsmitarbeitende unterstützen kann
Seite 22

Einführen eines Informationssicherheitsmanagementsystems in einem KMU
Seite 26

Aus der Forschung

KI detektiert Späne im Prozess
Seite 30

Mit neuronalen Netzen zur präzisen Kraftrekonstruktion beim Fräsen
Seite 34



Editorial



Prof. Dr.-Ing. Berend Denkena
Konsortialleiter des
Mittelstand-Digital Zentrums
Hannover

„Die Technologien zur Energieeinsparung sind da, es gibt jedoch noch Barrieren auf dem Markt, die ihre wirtschaftliche Umsetzung erschweren. Erfolgreiche Maßnahmen könnten einen gewaltigen Effekt auf die globalen Energie- und Klimatrends erzielen und zu Energieversorgungssicherheit, Wirtschaftswachstum sowie zu Umwelt- und Klimaschutz beitragen.“ Diese Aussage des World Energy Outlook 2012 ist aktueller denn je. Und ja, es gibt inzwischen zahlreiche technologische Lösungen, um Energie einzusparen. Um intelligente Lösungen für einen optimierten Energieeinsatz geht es in dieser Ausgabe unseres Magazins.

„Energie smart nutzen: Innovationen für den Mittelstand“ ist das Fokusthema dieses Hefts. Darin stellen wir gleich zwei Projekte unseres Zentrums vor, in denen wir den Energieverbrauch in Unternehmen optimieren konnten. Im Projekt mit der Gundlack Automation GmbH und der Strunck Weis Technik GmbH & Co. KG haben wir ein KI-basiertes Prognosemodell entwickelt, um den Eigenverbrauch von PV-Strom zu erhöhen. Wie flexible Ansätze Energiekosten senken können, untersuchten wir in unserem Projekt mit der INVENT GmbH. Welche Rolle dabei

die Simulation spielte, welche Herausforderungen es im Projekt gab und welche langfristigen Vorteile sich für das Unternehmen ergeben, beleuchten wir im Interview mit unserem Projektmitarbeiter Benjamin Uhlig.

Zusätzlich zu unserem Fokusthema finden Sie in dieser Ausgabe eine vielseitige Auswahl an Artikeln aus unseren bewährten Rubriken „Aus dem Zentrum“, „Aus der Praxis“ und „Aus der Forschung“. Erfahren Sie beispielsweise, wie Künstliche Intelligenz dabei hilft, Späne im Fertigungsprozess zu erkennen, um so Prozesssicherheit und Produktqualität zu steigern. Oder lernen Sie unser neues Angebot, das KI-Mentoring kennen, das Unternehmen auf ihrem Weg zur eigenen KI-Lösung begleitet. Entdecken Sie weitere spannende Beiträge rund um das Thema Künstliche Intelligenz im Magazin.

Ich wünsche Ihnen viel Spaß beim Lesen.

Berend Denkena



KI-Mentoring: Der Weg zur eigenen KI-Lösung

Künstliche Intelligenz (KI) birgt enorme Potenziale für den Mittelstand, bleibt jedoch für viele Unternehmen eine Herausforderung. Das KI-Mentoring des Mittelstand-Digital Zentrums Hannover begleitet Unternehmen gezielt auf dem Weg zur eigenen KI-Lösung. Mit einer Kombination aus praxisnahen Arbeitskreisen und intensiven Mentoring-Sitzungen können Unternehmen innerhalb eines Jahres erste KI-Projekte realisieren und langfristig ihre digitale Wettbewerbsfähigkeit steigern.

Das KI-Mentoring beginnt mit einem Auftakttreffen in Hannover, bei dem sich die Teilnehmenden persönlich kennenlernen und ihre Projektideen vorstellen können. Dabei wird bewusst in kleinen Gruppen von maximal zehn Personen gearbeitet, um einen intensiven Austausch und gezielte Betreuung zu ermöglichen. Die weiteren Termine werden flexibel online und in enger Abstimmung mit den Teilnehmenden organisiert. Über das Jahr verteilt profitieren sie von Fachveranstaltungen und regelmäßigen Mentoring-Sprechstunden, in denen sie praxisnah an ihren KI-Konzepten und konkreten Projektideen arbeiten.

Inhalte und Methoden:

CRISP-DM als Strukturmodell

Der Mentoring-Prozess basiert auf dem CRISP-DM-Modell (Cross-Industry Standard Process for Data Mining), einem bewährten Ansatz für die strukturierte Entwicklung von KI-Projekten. Dieses Modell hilft den Unternehmen, ihre Daten gezielt zu analysieren, Anforderungen zu definieren und maßgeschneiderte KI-Modelle zu erstellen. Die sechs Phasen – Geschäftsverständnis, Datenverständnis, Datenvorbereitung, Modellierung, Evaluierung und Bereitstellung – schaffen ein praxisorientiertes Framework, das besonders für Einsteiger geeignet ist (siehe Bild 2). Der methodische Ablauf unterstützt Unternehmen dabei, erste Ergebnisse zu erzielen, ohne dass Vorkenntnisse in der KI-Entwicklung vorausgesetzt werden.

Im Geschäftsverständnis werden die Ziele und Anforderungen definiert, die mit KI erreicht werden sollen. Darauf folgt das Datenverständnis, in dem die relevanten Daten analysiert werden, um ein tieferes Ver-

ständnis für die spezifischen Anforderungen zu gewinnen. In der Datenvorbereitung werden die Daten strukturiert aufbereitet und bereinigt, um eine solide Basis für die weiteren Schritte zu schaffen. Anschließend erfolgt in der Modellierung die Erstellung des KI-Modells, gefolgt von der Evaluierung, in der überprüft wird, ob das Modell die gewünschten Ergebnisse liefert. Die abschließende Bereitstellung ermöglicht die Anwendung des Modells in der Praxis. Dieser strukturierte Ansatz verkürzt die Lernkurve und bietet Unternehmen die Möglichkeit, ohne langwierige Einarbeitungszeit in die Praxis einzutauchen.

Fortschritte und Perspektiven:

Von ersten Erfolgen zu neuen Möglichkeiten

Der erste Arbeitskreis des KI-Mentorings trifft sich bereits regelmäßig digital, um Fortschritte auszutauschen und praxisnahe Ansätze für aktuelle Herausforderungen zu erarbeiten. „Das große Engagement der Teilnehmenden und die hohe Nachfrage nach unserem



Bild 1
Der erste Termin des KI-Mentoring-Programms ist in Präsenz, alle weiteren finden digital statt.

KI-Mentoring zeigen, dass unser Angebot genau den Bedarf der Unternehmen trifft“, betont Paulina Merkel, KI-Koordinatorin des Mittelstand-Digital Zentrums Hannover.

Aufgrund des positiven Feedbacks sind bereits weitere Arbeitskreise in Planung. Unternehmen, die einen praxisorientierten Einstieg in die KI-Technologie suchen, können sich auf der Website des Mittelstand-Digital Zentrums Hannover für kommende Gruppen anmelden (siehe QR-Code rechts).

**Nutzen für den Mittelstand:
Digitale Resilienz und Wettbewerbsvorteile**

Das KI-Mentoring bietet kleinen und mittleren Unternehmen eine ideale Einstiegshilfe in die Welt der Künstlichen Intelligenz. Der modulare Aufbau und die Möglichkeit, in einer kooperativen Umgebung mit anderen Unternehmen zu lernen, fördern nicht nur das technische Verständnis, sondern auch die Innovationskraft der Teilnehmenden. Durch die im Mentoring erworbenen Kompetenzen können Unternehmen ihre digitale Resilienz und Wettbewerbsfähigkeit nachhaltig ausbauen. Sie werden in die Lage versetzt, eigenständig KI-Anwendungen zu entwickeln und einzusetzen und können damit Prozesse optimieren, Kosten senken und zukunftsfähige Geschäftsmodelle etablieren.

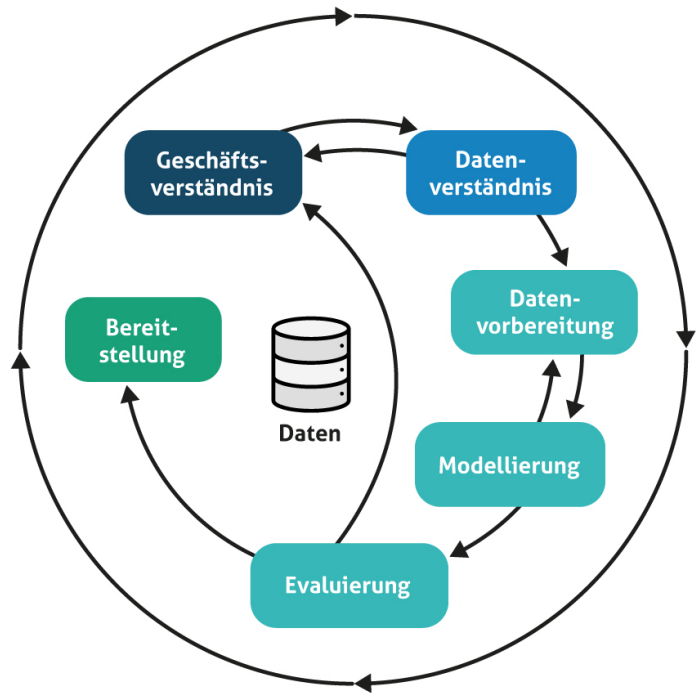


Bild 2
CRISP-DM-Modell für eine effektive Entwicklung



Weitere Infos zum KI-Mentoring-Programm sowie die Möglichkeit zur Anmeldung finden Sie unter <https://digitalzentrum-hannover.de/ki-mentoring>



Autor

Sofie Bauer
Mediengestalterin im
Mittelstand-Digital Zentrum
Hannover



Energie smart nutzen: Innovationen für den Mittelstand

Für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) gewinnt die strategische Nutzung und Optimierung von Energie zunehmend an Bedeutung. Angesichts schwankender Energiepreise, neuer dynamischer Tarife und der Herausforderungen des Klimaschutzes stehen Betriebe heute mehr denn je unter Druck, innovative Lösungen für ihren Energiebedarf zu finden. Die Bandbreite an Energie-Innovationen bietet hierbei zahlreiche Ansatzpunkte: Von der Optimierung der Eigenstromnutzung und Speicherung bis hin zur flexiblen Steuerung von Produktionsprozessen.

Mit intelligenten Technologien zur Verbrauchsprognose und flexiblen Steuerungen können KMU ihre Energiekosten aktiv senken und gleichzeitig Lastspitzen im Netz reduzieren. Künstliche Intelligenz unterstützt dabei, Produktionsabläufe gezielt zu Zeiten hoher Eigenstromverfügbarkeit zu verlagern oder überschüssige Energie effizient zu speichern. Besonders interessant ist für viele Unternehmen die Möglichkeit, mit selbst erzeugtem Strom ihre Netzabhängigkeit zu mindern und so einen stabileren und nachhaltigeren Betrieb zu gewährleisten.

Energie-Innovationen eröffnen dem Mittelstand enorme Potenziale: Sie senken nicht nur laufende Kosten, sondern leisten auch einen Beitrag zur Energiewende und stärken die Wettbewerbsfähigkeit durch zukunftsorientierte Lösungen. So schaffen Unternehmen die Basis für eine nachhaltige und wirtschaftlich stabile Zukunft und tragen gleichzeitig aktiv zur Reduktion von CO₂-Emissionen bei.

KI für PV-Anlagen: Eigenstromproduktion effizienter gestalten

Projektabschlussbericht von Phil Köhne und Marc Warnecke



Projektüberblick

Betreibende von Photovoltaikanlagen (PV-Anlagen) stehen vor der Herausforderung, ihren Stromverbrauch dahingehend zu optimieren, dass möglichst viel Strom aus eigener Produktion verwendet wird. Dies steigert die Wirtschaftlichkeit der Anlage und hält laufende Kosten gering. Eine Optimierung erfolgt meistens nicht automatisch, sondern durch individuelle Anpassungen.

Das Mittelstand-Digital Zentrum Hannover hat mit der Gundlack Automation GmbH und der Strunck Weis Technik GmbH & Co. KG prototypisch ein KI-basiertes Prognosemodell entwickelt, um den Anteil vom Eigenverbrauch des produzierten Stroms zum Netzbezug zu erhöhen. Das Modell kann sowohl den zukünftigen Stromverbrauch als auch die Stromerzeugung vorhersagen, indem es historische und aktuelle Wetterdaten, Stromerzeugungsdaten und Verbrauchsmuster analysiert.

Mit der wachsenden Anzahl von PV-Anlagen in Unternehmen und Haushalten wird es immer wichtiger, den erzeugten Strom effizient zu nutzen, ohne die Stromnetze zu überlasten. Betreibende stehen vor der Herausforderung, PV-Strom in Phasen hoher Netznachfrage selbst zu nutzen oder zu speichern, um Spitzenverbräuche zu glätten und Kosten zu reduzieren. Die Nutzung dynamischer Stromtarife, welche ab 2025 auf Seiten der Stromanbieter verpflichtend angeboten werden müssen [1], erfordert zur optimalen Ausnutzung des Sparpotenzials eine automatisierte Steuerung, der eine genaue Prognose von Stromverbrauch und -erzeugung zugrunde liegt.

Unternehmen und Produkt

Die Gundlack Automation GmbH ist ein regionales Unternehmen im Bereich der Automatisierungslösungen für die Industrie und Photovoltaikanlagen. Das Unternehmen bietet Photovoltaikanlagen für private und gewerbliche Nutzung an. Der Service umfasst die individuelle Planung und Installation der Anlage von der ersten Beratung und Planung über den Bau bis hin zur Zulassung der Anlage, einschließlich aller notwendigen Formalitäten mit dem Stromanbieter. Außerdem entwickelt das Unternehmen Technologien, die es ermöglichen, den Betrieb von PV-Anlagen effizienter zu gestalten.

Strunck Weis Technik GmbH & Co. KG ist spezialisiert auf technische Anlagensteuerung und hat umfassende Erfahrungen im Energiesektor. Das Unternehmen spezialisiert sich auf innovative Lösungen zur Lagerung von Obst und Gemüse, insbesondere durch den Bau von ULO-Kühlräumen (Ultra-Low-Oxygen) und CA-Kühlräumen (Controlled Atmosphere). Das Unternehmen bietet umfassende Dienstleistungen an, die Planung, Bau sowie den Betrieb und die Wartung dieser spezialisierten Kühlsysteme umfassen, um die Qualität und Haltbarkeit der Produkte über längere Zeiträume zu gewährleisten.

Herausforderung und Zielsetzung

Betreibende von PV-Anlagen stehen vor der Herausforderung, die erzeugte Energie effizient zu nutzen und den wirtschaftlichen Nutzen ihrer Anlagen zu maximieren. Durch die gezielte Änderung des eigenen Verhaltens können signifikante Einsparungen erzielt werden, etwa indem größere Energieverbraucher zu Zeiten erwarteter hoher Ausgangsleistung der PV-Anlagen genutzt werden. Mit dynamischen Stromtarifen werden weitere Möglichkeiten geschaffen, um Stromkosten zu sparen.

Die Partnerunternehmen im Digitalisierungsprojekt suchten eine Lösung, um genau vorherzusagen, wann der erzeugte Strom am besten genutzt, gespeichert oder eingespeist werden sollte. Die Optimierung des Eigenverbrauchs ist von entscheidender Bedeutung, da die Einspeisevergütungen für neuere Anlagen deutlich niedriger sind als die Stromkosten. Eine präzise Prognose von Stromverbrauch und -erzeugung ermöglicht es, den Stromverbrauch an die aktuellen Marktpreise anzupassen, Lastspitzen zu reduzieren und Einspeisesverluste zu minimieren. Die Herausforderung bestand darin, ein Modell zu entwickeln, das genaue Vorhersagen auf Basis verschiedener Datenquellen, wie Wettervorhersagen, bisher erzielter PV-Ausgangsleistungen und historische Verbrauchsdaten, liefert. Ziel war eine automatisierte Steuerung, um die volle Leistung der PV-Anlagen ihrer Kunden auszuschöpfen und mit diesem Nutzenversprechen die Energiewende weiter voranzutreiben.

[1] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). (2023, Mai 12) [Smart Meter-Gesetz final beschlossen.](#)

Lösungsweg

Um ein Vorhersagemodell für die Stromerzeugung aus Solaranlagen und den Stromverbrauch eines Haushalts zu entwickeln, wurden zunächst Wetterdaten, Erzeugungsleistung der Solaranlagen und Daten zum Stromverbrauch der jeweiligen Haushalte gesammelt. Im Projekt lagen Daten von fünf Haushalten für ein Jahr vor. Über die Haushalte sind keine weiteren Eigenschaften wie z. B. zu Anzahl der Bewohner, Nutzung eines Elektroautos oder einer Wärmepumpe bekannt. Wetterdaten wurden online vom Deutschen Wetterdienst bereitgestellt.

Diese Daten wurden aufbereitet und geordnet, um sie anschließend analysieren zu können. In der Analyse wurden Muster und Zusammenhänge identifiziert, die Aufschluss darüber geben, wie das aktuelle Wetter bzw. die Jahreszeit die Stromerzeugung und den Stromverbrauch beeinflussen. Dies wurde mithilfe eines K-Nearest-Neighbor (KNN) Algorithmus umgesetzt, der auf Basis der erkannten Muster auch Vorhersagen treffen kann. Es wurden im Einzelnen folgende Schritte durchlaufen:

Datenaufnahme: Es wurden historische Daten zu Wetter, Stromverbrauch und -erzeugung gesammelt. Diese Daten stammen von lokalen Wetterstationen bzw. dem Deutschen Wetterdienst und den PV-Anlagen selbst.

Vorverarbeitung: Die Daten werden auf dieselben Zeiträume konsolidiert und um Fehler wie Sensorausfälle oder Redundanzen bereinigt. Der Datensatz wurde in Trainings- (drei Haushalte) und Validierungsdaten (zwei Haushalte) aufgeteilt, um das Modell zu erstellen und daraufhin zu testen.

Analyse und Modellaufbau: Anhand des Datensatzes wurden relevante Datenkategorien, sog. Labels, wie Sonnenscheindauer und Temperatur definiert, die die Grundlage für die Vorhersage von Stromerzeugungs- und Verbrauchsdaten bilden.

Modelltraining: Mit dem KNN wurde das KI-Modell trainiert. Das Modell nutzt die Labels, um Vorhersagen zu treffen, wobei Wettervorhersagen eine wichtige Rolle spielen.

Evaluierung: Das trainierte Modell wurde anhand des Validierungsdatensatzes evaluiert. Der Vergleich zwischen prognostizierten und tatsächlichen Daten zeigt die Genauigkeit des Modells. In den Bildern 2 bis 4 zeigt die rote Linie die jeweilige Prognose und die blaue Linie die tatsächlichen Werte.

Je nach Güte und Umfang der Trainingsdaten, kann das Modell stundengenaue Vorhersagen treffen, die eine optimale Nutzung von PV-Anlagen ermöglicht. Es prognostiziert den Stromverbrauch und die Stromerzeugung über mehrere Tage und hilft Betreibenden, die Einspeisung und Speicherung von Strom zu planen. Dabei lernt das System mit mehr Daten immer genauer zu werden. Da der Stromverbrauch eines Haushalts weniger wetterabhängig als die Stromerzeugung ist, sind auch längere Zeiträume zur Beobachtung des Verbraucherverhaltens notwendig, um lang-

fristig gute Vorhersagen treffen zu können. Dabei sind die Vorhersagen bei wenig vorhandenen Daten auch weniger genau.

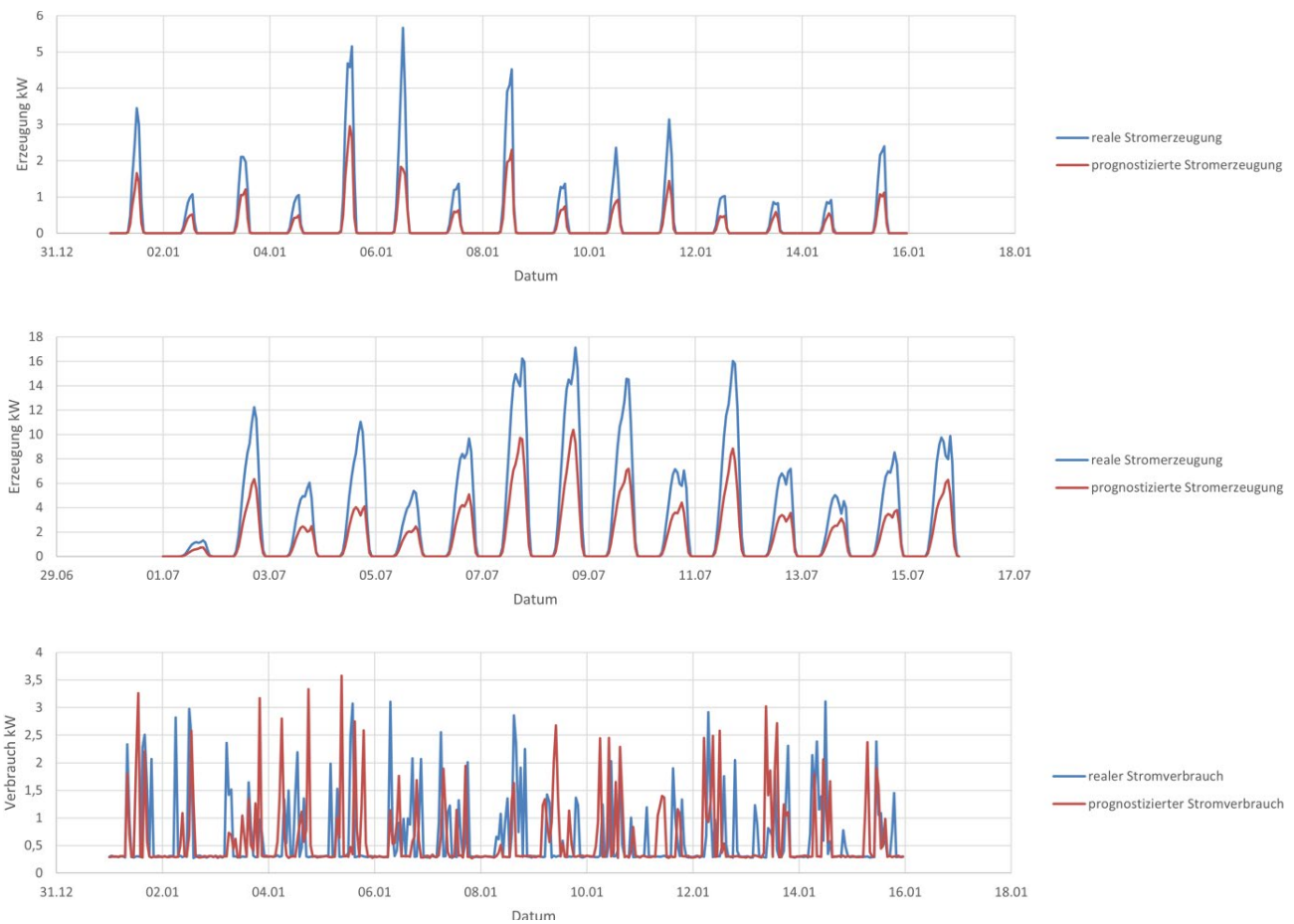
Die Diagramme rechts zeigen Ausschnitte der Vorhersagen und tatsächlich ermittelten Werte für die Stromerzeugung und den Verbrauch in einem der untersuchten Haushalte. Wie in Bild 2 ersichtlich, ist der Zeitpunkt der Stromerzeugung genau vorhersehbar. Die erwartete Erzeugerleistung ist zusätzlich zum Sonnengang auch vom Wetter abhängig, etwa vom Wolkenbehang. Die Stromerzeugung kann daher qualitativ sehr gut vorhergesagt werden, quantitativ besteht allerdings noch eine Diskrepanz, die darauf basiert, dass die Wetterdaten von Stationen stammen, die in einiger Entfernung zu den Erzeugungsstellen stehen und somit nicht zu jeder Zeit den tatsächlichen Sonneneinstrahlungswert für alle Standorte der untersuchten Häuser darstellen können.

Im Sommer hingegen ist im Allgemeinen mit konsistent klarem Wetter zu rechnen, dies zeigt sich auch in Bild 3. Hier ist die Vorhersage auch quantitativ deutlich kongruenter mit den tatsächlich erreichten Werten. Bei der Prognose der Verbrauchsdaten aus Bild 4 zeigt sich bereits, dass diese nur indirekt vom Wetter abhängig sind, sodass die erwarteten Verbräuche sich bei den Haushalten anders darstellen. Ein Training für einzelne Haushalte war aufgrund der wenigen historischen Daten nicht möglich. Qualitativ zeigt sich jedoch, dass Verbrauchsmuster im Wochenverlauf gut abbildbar sind. Um die Vorhersagen auch im Bereich eines Tages kongruenter zu gestalten, müssen Verbrauchsdaten für einen Haushalt über einen Jahreszeitraum hinaus gesammelt werden. Noch besser wäre es, PV-Anlagen mit lokalen Wetterstationen zu verknüpfen, denn dann ließen sich ortsnahe quantitativ objektivere Aussagen in der Vorhersage treffen.

Nutzen für den Mittelstand

Das Projekt bietet dem Mittelstand ein Tool zur zukünftigen Optimierung von Steuerungen der PV-Anlagen sowohl im privaten als auch dem industriellen Bereich. Durch die Implementierung dieses Systems können die Anlagen durch präzise Prognosen den Eigenverbrauch steigern, beispielsweise durch die gezielte Batterieeinspeisung zu Zeiten des eigenen Produktionsmaximums. Dies ermöglicht eine effizientere Nutzung der selbst erzeugten Energie. So bieten schaltbare Relais oder Smarte Gerätesteuerungen die Möglichkeit, elektrische Verbraucher gezielt erst bei zu erwartendem Eigenstromüberschuss zu aktivieren, auch wenn die Betreibenden nicht zu Hause sind. Dies ist besonders vorteilhaft im Hinblick auf variable Stromtarife, auf die die Anlagen dadurch optimal vorbereitet sind. In der Praxis führt dies zu erheblichen Kosteneinsparungen, da die Betreibenden der PV-Anlagen von niedrigeren Stromkosten profitieren und gleichzeitig die Abhängigkeit von teurem Netzstrom verringern.

Die effiziente und autonome Anpassung der Energieverbrauchsmuster an die Produktion der Solaranlagen verbessert nicht nur



von oben nach unten

Bild 2 (Prognose-)Werte für die Stromerzeugung in einem Winterzeitraum

Bild 3 (Prognose-)Werte für die Stromerzeugung in einem Sommerzeitraum

Bild 4 (Prognose-)Werte für den Verbrauch in einem Winterzeitraum

die ökonomische Effizienz, sondern trägt auch zur Stabilisierung des lokalen Stromnetzes bei. Durch die Reduktion von Lastspitzen helfen diese optimierten Systeme, Netzüberlastungen zu vermeiden und unterstützen so die Energiewende. Da die Anlagen sich somit schneller rentieren, haben die Solateure bzw. Hersteller von Anlagen für ihre Kunden ein schlagkräftiges Argument in die nachhaltigere Energie-Zukunft zu starten. Diese beschleunigte Amortisation der Investition macht die Entscheidung für Solaranlagen attraktiver und fördert die Bereitschaft, in erneuerbare Energien zu investieren.

Zusätzlich stärkt das Projekt das Image der Unternehmen als Vorreiter einer nachhaltigen Energieversorgung und bietet ihnen die Möglichkeit, sich in einem wettbewerbsintensiven Markt zu differenzieren sowie ihre Marktposition zu festigen. Insgesamt unterstützt das Tool nicht nur die betriebswirtschaftliche Seite der Energieerzeugung, sondern leistet auch einen wichtigen Beitrag zum Umweltschutz und zur Förderung von nachhaltigen Energiequellen.

Autoren

Phil Köhne

Wissenschaftlicher Mitarbeiter am IPH - Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH und Projektingenieur am Mittelstand-Digital Zentrum Hannover

Marc Warnecke

Wissenschaftlicher Mitarbeiter am IPH - Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH und Projektingenieur am Mittelstand-Digital Zentrum Hannover

Energie **flexibel** einsetzen: Simulation zeigt Möglichkeiten

Projekt-Abschlussbericht von Benjamin Uhlig, Markus Kloock, Marius Hermsen und Jan Felix Niemeyer

Das Krisenjahr 2022 ist für viele Unternehmen aufgrund der extremen Energiepreise in Erinnerung geblieben. Der durchschnittliche Großhandelspreis für Strom in Deutschland stieg um mehr als 100 Prozent auf 234,49 Euro/MWh im Jahr 2022, was deutlich über dem bereits hohen Preis des Vorjahres von 96,85 Euro/MWh lag. Diese Preisentwicklung wird durch das aktuelle Strommarktdesign beeinflusst, das auf dem Prinzip der Grenzkostenbepreisung basiert, bekannt als das Merit-Order-System. Dabei bestimmt der Preis der teuersten Kilowattstunde den Preis für die gesamte zu einem bestimmten Zeitpunkt verfügbare Strommenge. Im Krisenjahr griff die Bundesregierung mit einer Vielzahl von Maßnahmen ein, um unter anderem Unternehmen vor den steigenden Energiepreisen zu schützen. Ziel war es, den Strompreis auch während des Transformationsprozesses zu einem klimaneutralen Hochindustrieland bezahlbar zu halten und gesellschaftliche Verwerfungen zu vermeiden [1].

In Deutschland nimmt innerhalb des Transformationsprozesses der Beitrag von Kernenergie und Steinkohle zur Stromerzeugung stetig ab, während der Anteil der erneuerbaren Energiequellen kontinuierlich wächst.

Die Energiegewinnung erfolgt dabei nicht nur aus regenerativen Quellen, wie Wasser, Wind, Biomasse und Erdwärme, sondern auch aus Solarenergie. Die Bedeutung der Photovoltaik hat über die Jahre hinweg stetig zugenommen, wobei der Anteil der Sonne als regenerative Energiequelle seit 2003 kontinuierlich gestiegen ist [2]. Bis zum Ende des Jahres 2022 waren in Deutschland etwa 150 Gigawatt (GW) Kapazität zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien installiert. Davon entfielen rund 67 GW auf Photovoltaikanlagen, was etwa 45 Prozent der gesamten erneuerbaren Energiekapazität ausmacht [3].

Durch den zunehmenden Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung in Deutschland, mit einem angestrebten Ziel von 80 Prozent bis 2050, und besonders durch den Ausbau von Wind- und Solarenergie, wird das Stromnetz immer volatil. Für Unternehmen bedeutet das, dass die Strompreise in Zukunft voraussichtlich noch stärker schwanken werden als heute. Energieflexible Fabriken ermöglichen es, auf diese Preisschwankungen zu reagieren und sie wirtschaftlich zu nutzen [4].

Hinweis

Bei den hier veröffentlichten Daten handelt es sich aus Gründen der Vertraulichkeit um abgeänderte, fiktive Daten.

Bild 1

INVENT-Unternehmenszentrale in Braunschweig



Unternehmen und Produkt

Die INVENT GmbH ist ein Leichtbau-Spezialist aus Braunschweig, der sich auf innovative Faserverbundtechnologien spezialisiert hat. Seit 1996 entwickelt und produziert das Unternehmen hochpräzise Strukturkomponenten für die Industrie, insbesondere im Bereich Luft- und Raumfahrt. Im industriellen Sektor ist das Unternehmen in Branchen wie Automotive, Maschinenbau, Schienenfahrzeuge und Schiffbau aktiv und bietet kundenspezifische Lösungen von der Konzeption bis zur Serienfertigung. Das Unternehmen ist auf zwei Standorte aufgeteilt, die sich auf gegenüberliegenden Straßenseiten befinden und jeweils PV-Anlagen zur Stromerzeugung nutzen. Einer der Standorte, der aktuell einen geringen produktionsbedingten Energiebedarf hat, wird intensiv zum Laden der Dienstwagenflotte genutzt.

Herausforderung und Zielsetzung

Das Projekt zielt darauf ab, ein Simulationswerkzeug zur Bewertung von Energieflexibilisierungsmaßnahmen zu entwickeln. Am Beispiel der INVENT GmbH werden sowohl Wechselwirkungen innerhalb des Produktionssystems als auch mit aktueller und zukünftiger Ladeinfrastruktur berücksichtigt. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf der Untersuchung und Anpassung des Energiebedarfs des Unternehmens an die Erzeugung von erneuerbaren Energien durch unternehmenseigene PV-Anlagen und auf der Nutzung von batterieelektrischen Speichern als Puffer in Zeiten geringer Verfügbarkeit erneuerbarer Energien sowie die Verlagerung von Produktionsprozessen auf Zeiten mit höherer Verfügbarkeit.

Diese Maßnahmen können aus Sicht des Unternehmens zu Herausforderungen führen, da sie zu einem mehrdimensionalen Zielkonflikt führen. Einerseits können beispielsweise batterieelektrische Fahrzeuge als temporärer Batteriespeicher für das Abmildern von Leistungsspitzen nutzbar gemacht werden. Andererseits können die hohen Ladeleistungen der E-Fahrzeuge aufgrund der hohen Leistungspreise wiederum zu hohen Energiekosten führen. Um diesen mehrdimensionalen Zielkonflikt von Unternehmen zu bewältigen, bedarf es eines geeigneten Werkzeugs zur Entscheidungsunterstützung.

Projektüberblick

Die Reduzierung von Energiekosten und die steigende Sensibilität von Kunden im Hinblick auf produktionsbedingte Treibhausgasemissionen stellen produzierende Unternehmen vor Herausforderungen. Um diesen zu begegnen, ist die Nutzung erneuerbarer Energien, wie z. B. Photovoltaik, wichtig, um produktionsbedingte Treibhausgasemissionen zu reduzieren.

Auch wenn bereits erneuerbare Energien genutzt werden, sind die Verbräuche oft nicht optimal auf deren Verfügbarkeit abgestimmt. Dies führt dazu, dass Unternehmen zeitweise teuren Strom vom Netz beziehen müssen, während selbst generierter günstiger Strom aus z. B. Photovoltaik eingespeist wird.

Im Rahmen eines Projekts zur Energieflexibilisierung hat das Mittelstand-Digital Zentrum Hannover die INVENT GmbH, einem führenden Hersteller für innovative Faserverbundtechnologien, dabei unterstützt, eine Simulation zu entwickeln und durchzuführen, um Vorteile und Herausforderungen von Energieflexibilisierungsmaßnahmen zu analysieren. Dabei wurden sowohl Wechselwirkungen innerhalb des Produktionssystems als auch mit aktueller und zukünftiger Ladeinfrastruktur berücksichtigt.

[1] <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/strompreise-bestandteile.html>

[2] <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/250915/umfrage/anteil-der-photovoltaik-an-der-stromerzeugung-in-deutschland/>

[3] https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/photovoltaik-strategie-2023.pdf?__blob=publicationFile v=6

[4] VDI 5207 Blatt 1

Lösungsweg

Um dieser Problem- und Zielstellung zu begegnen, wurde ein mehrstufiger Lösungsweg verfolgt, welcher darauf abzielt, ein Simulationsmodell zur Unterstützung von Unternehmen im Hinblick auf einen energieflexiblen Fabrikbetrieb zu entwickeln. Dieser Lösungsweg wurde exemplarisch mit der INVENT GmbH verfolgt, ist aber prinzipiell auf weitere Unternehmen übertragbar.

Schritt 1: Definition von Modellanforderungen und Datenscreening

In einem ersten Schritt wurden die Modellanforderungen der Projektpartner definiert und die vorhandenen Daten für das Modell, darunter Energie- und Maschinendaten, gesichtet sowie die Systemkonfigurationen aufgebaut. Auf Basis der Systemkonfiguration wurden vorab mögliche Energieflexibilisierungsansätze (z. B. Verschieben von Produktionsstarts und Nutzung von stationären Energiespeichern) diskutiert sowie priorisiert, die anschließend in der geplanten Simulation genauer geprüft werden sollten. Eine Energiemonitoring-Plattform mit den Energiebedarfsdaten des Unternehmens und den Erzeugungsdaten der Photovoltaikanlagen diente als primäre Datenquelle.

Schritt 2: Datenanalyse und Erstellung eines Energieportfolios

Die Grundlage des Projekts bildete die Datenanalyse zur Erstellung eines Modells in der Data-Mining-Software KNIME und die Erstellung eines Energie-Portfolios (Bild 2) zur Identifizierung der relevanten Verbraucher. Im Energie-Portfolio werden hierzu Betriebsstunden und Anschlussleistungen basierend auf den vorhandenen Unternehmensdaten gegenübergestellt. Dadurch können Verbraucher priorisiert werden, die in einem nächsten Schritt für eine nähere Betrachtung von besonderer Bedeutung sind.

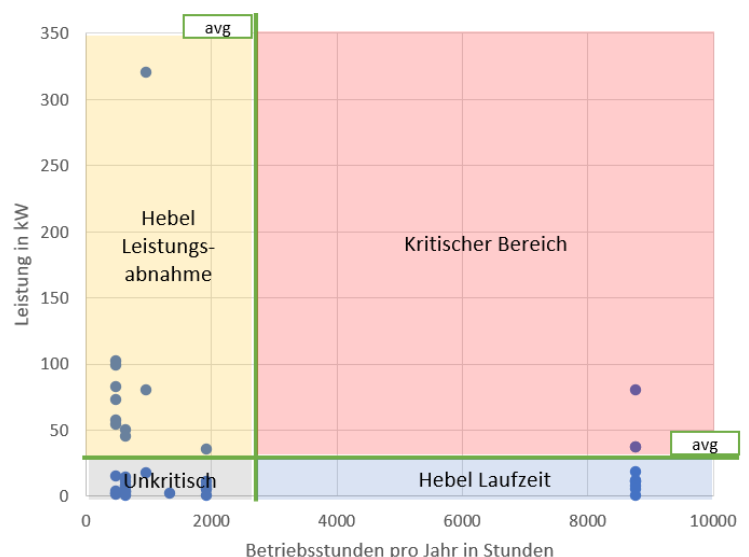
Bild 2

Energieportfolio für das betrachtete Unternehmen

Schritt 3: Durchführung einer Messkampagne

Einige Datenlücken wurden mithilfe von Messungen der Lastprofile und anschließender Messdatenaufbereitung geschlossen. Basierend auf der Priorisierung der Verbraucher im Energieportfolio konzentrierte sich die Messkampagne bei INVENT auf zwei Autoklaven und zwei Kompressoren. Hierbei wurden die Lastprofile der Autoklaven und Druckluftkompressoren permanent für ca. eine Woche über Messinstrumente erfasst. Anschließend wurden die Daten der Strommessungen mit denen aus der Energiemonitoring-Plattform in KNIME zusammengeführt und für den nächsten Schritt aufbereitet.

Ein großer Vorteil, der sich durch die Messkampagne ergab, war, dass unabhängig vom Thema der Energieflexibilisierung ungünstige Konstellationen von Leistungsabnahmen in der Produktion aufgedeckt wurden. In Bild 3 ist beispielsweise zu sehen, wie ein Kompressor auch außerhalb der Produktionszeiten permanent Druckluft bereitstellt, was einen potentiell unnötigen Strombedarf darstellt. Zudem ist deutlich zu sehen, dass um ca. 6:15 Uhr drei Leistungsspitzen aufeinandertreffen und sich infolgedessen kumulieren. Eine zeitliche Verteilung der Leistungsspitzen wäre empfehlenswert, um möglichst geringe Lastspitzen zu erzeugen und somit Stromkosten zu reduzieren.



Schritt 4: Simulationsdurchführung

Im vierten Schritt wurde eine agentenbasierte Simulation mit AnyLogic erstellt, um das Gesamtsystemverhalten zu untersuchen (siehe Bild 4). Das Simulationsmodell ermöglicht für ein Unternehmen (Gesamtsystem) die Betrachtung mehrerer Standorte. Darüber hinaus enthält das Modell generische Konfigurationen von Stromverbrauchern, einer Dienstwagenflotte (als temporäre Batteriespeicher) und stationären Batterien. Die Modelleingaben, einschließlich der Informationen über die beiden Standorte mit ihren unterschiedlichen Verbrauchern, Fahrzeugen und Batteriespeichern, wurden als Excel und CSV-Dateien bereitgestellt. Dabei wurden Daten wie Produktionszeiten, Lastprofile der Maschinen sowie Batteriekapazitäten und Ankunftszeiten der Fahrzeuge berücksichtigt. Außerdem wurden definierte Zukunftsszenarien, wie variable Kapazitäten der Batteriespeicher, simulativ berücksichtigt.

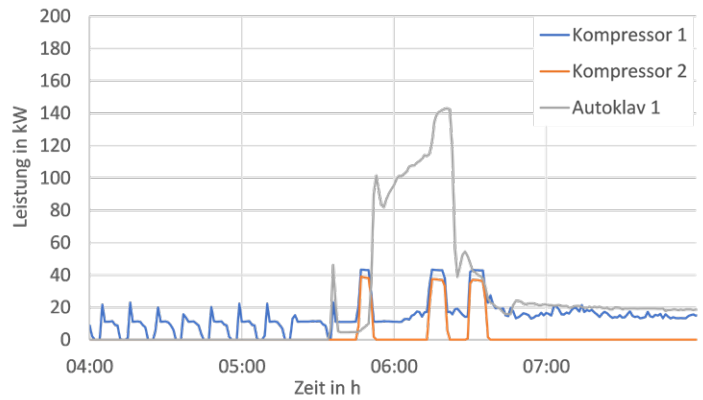


Bild 3
Lastprofile von verschiedenen Verbrauchern

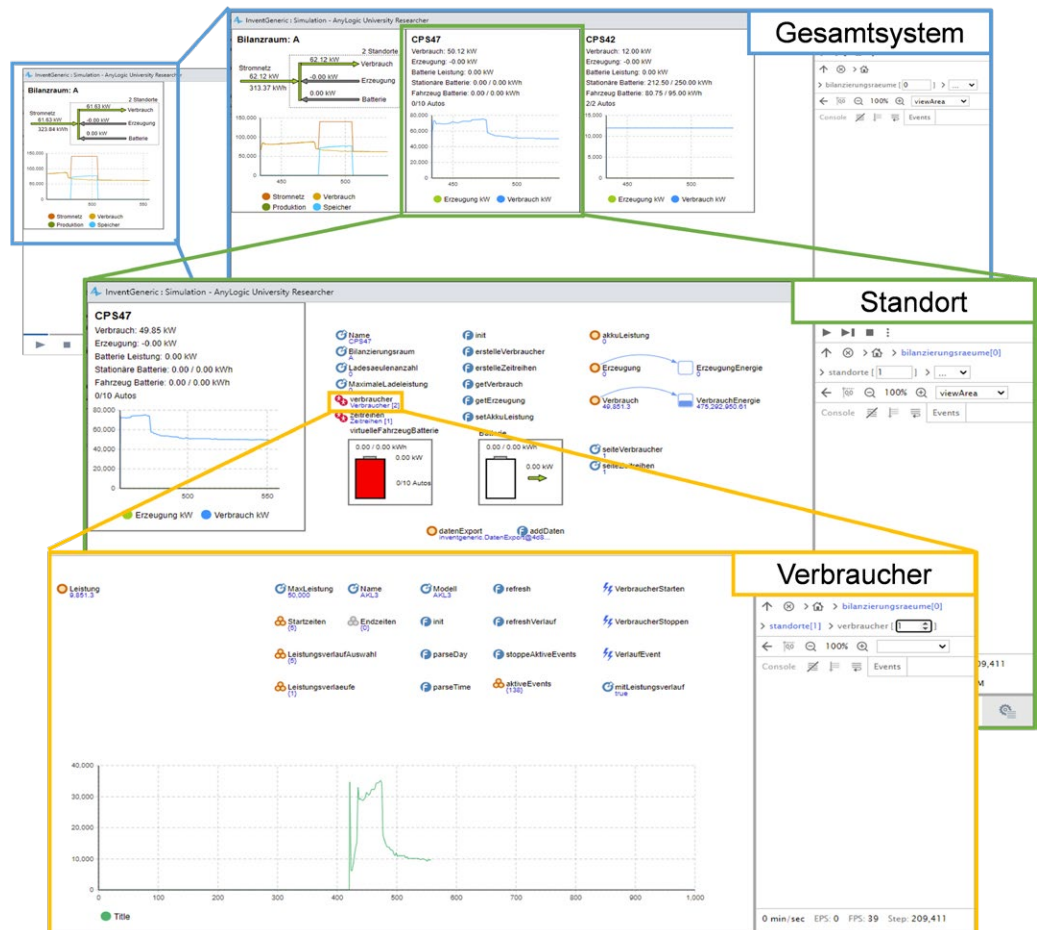


Bild 4
Einblick in den Aufbau des Simulationsmodells mit seinen unterschiedlichen Systemebenen

Schritt 5: Auswertung

Die Auswertung der Daten, die aus der Simulation verschiedener Szenarien generiert wurden, erfolgte ebenfalls mithilfe der Datenanalyse-Software KNIME. Zahlreiche Einstellparameter, wie Anzahl von Ladesäulen, Ankunfts- und Abfahrzeiten der batterieelektrischen Fahrzeuge, Zusammensetzung der Dienstwagenflotte (z. B. Speicherkapazität) und verschiedene Produktionsprogramme können variiert werden.

Bild 5 zeigt exemplarische Simulationsergebnisse eines Szenarios, die durch eine Variation der Speicherkapazitäten eines stationären Batteriespeichers erzielt wurden. Das in den Simulationen verfolgte Ziel war es, eine bestimmte Lastspitze einzuhalten. Die Abbildung zeigt, dass zur Reduktion der Lastspitze von ca. 370 kW (Status quo) auf 300 kW ein stationärer Batteriespeicher mit ca. 50 kWh Speicherkapazität erforderlich wäre. Für eine gewünschte Lastspitze von 200 kW müsste ein Batteriespeicher mit mindestens 125 kWh Speicherkapazität implementiert werden.

Auf Basis dieser Daten wurde eine Wirtschaftlichkeitsabschätzung von Energieflexibilitätsmaßnahmen durchgeführt. Anschließend wurden Energieflexibilitätsansätze abgeleitet und Handlungsempfehlungen zur Verbesserung der Energienutzung aufzeigt. Des Weiteren konnten bei INVENT im Hintergrund liegende, bislang nicht bemerkte Energieeffizienzpotenziale aufgedeckt werden.

Nutzen für den Mittelstand

Durch den Transformationsprozess zu einem klimaneutralen Hochindustrieland wird das Stromnetz zunehmend volatil [5]. Zudem ergeben sich für Unternehmen insbesondere durch den Ausbau eigener PV-Anlagen große Potenziale zur Nutzung erneuerbarer Energien.

Das im Rahmen des Projekts entwickelte generische Simulationsmodell, welches Vorteile und Herausforderungen von Energieflexibilisierungsmaßnahmen aufgezeigt, kann grundsätzlich auch auf andere Unternehmen übertragen werden und soll Unternehmen im Rahmen von Firmengesprächen, Workshops und Webinaren einen Einblick in das hoch aktuelle Themenfeld ermöglichen.

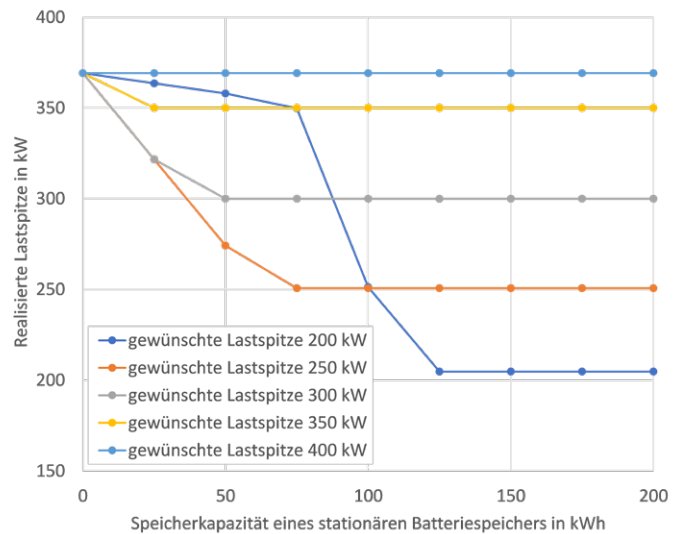


Bild 5
Simulationsergebnisse des Szenarios
„Implementierung eines stationären Batteriespeichers“

Autoren

Benjamin Uhlig: Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF), TU Braunschweig

Markus Kloock: Studentische Hilfskraft am Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF), TU Braunschweig

Marius Hermsen: Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF), TU Braunschweig und Projektingenieur am Mittelstand-Digital Zentrum Hannover

Jan Felix Niemeyer: Forschungsgruppenleiter und Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF), TU Braunschweig und Projektingenieur am Mittelstand-Digital Zentrum Hannover

[5] VDI 5207 Blatt 1

Theorie in die Praxis zu übertragen, ist **jedes Mal spannend!**

Im Rahmen eines gemeinsamen Projekts unterstützte das Mittelstand-Digital Zentrum Hannover die INVENT GmbH dabei, Maßnahmen zur Reduktion des Energieverbrauchs zu identifizieren und umzusetzen. Im Interview gibt Benjamin Uhlig, Projektmitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF) der Technischen Universität Braunschweig, Einblicke in die Ergebnisse und Erkenntnisse des Projekts. Als Partner des Mittelstand-Digital Zentrums Hannover gibt das IWF in Firmengesprächen, Workshops und Digitalisierungsprojekten Unternehmen Werkzeuge für eine Nachhaltige Produktion und Life Cycle Engineering an die Hand.

Herr Uhlig, könnten Sie uns einen kurzen Überblick über das Projekt mit dem Unternehmen INVENT GmbH geben? Was war die Hauptmotivation für dieses Projekt?

Viele Unternehmen sind bestrebt, ihre Energiekosten zu senken. Ein wichtiger Ansatzpunkt hierfür ist die Nutzung erneuerbarer Energien. Für kleinere, energieintensive Unternehmen ist es jedoch aufgrund der aktuellen regulatorischen Rahmenbedingungen oft schwierig, von volatilen Energieträgern wie Photovoltaik (PV) und Windkraft zu profitieren. Eine derzeit mögliche Lösung besteht in dem Ausbau und der Nutzung von eigenem PV-Strom. Dies stellt sie jedoch vor die Herausforderung, diesen in Kombination mit Netzstrom möglichst kosteneffizient zu verwenden.

Das Unternehmen INVENT besitzt bereits eine Flotte von Elektrofahrzeugen – batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) und Plug-in-Hybridfahrzeuge (PHEV) –, die den Mitarbeitenden für dienstliche und private Nutzung zur Verfügung stehen. Diese Flotte kann nicht nur aus ökologischer Sicht sinnvoll sein, sondern auch



Bild 1
Benjamin Uhlig erklärt, wie theoretische Modelle erfolgreich in die Praxis umgesetzt werden.

aus Perspektive der Fachkräftegewinnung durch die Steigerung der Attraktivität. Eine interessante Fragestellung ergibt sich aus der Überlegung, ob die Fahrzeuge künftig zusätzlich oder als Ersatz für stationäre Batteriespeicher verwendet werden könnten – Stichwort: Bidirektionales Laden (V2G, Vehicle-to-Grid). Welche Vorteile könnten daraus entstehen? Und welche infrastrukturellen Anpassungen am Produktionssystem würden in diesem Zusammenhang besonders große Synergien schaffen?

Im Projektbericht wird das Ziel der Energieflexibilisierung beschrieben. Welche konkreten Maßnahmen wurden umgesetzt, um den Energieverbrauch bei INVENT besser an die Verfügbarkeit von Strom aus erneuerbaren Energien anzupassen?

Zunächst haben wir gemeinsam mit INVENT analysiert, welche Anlagen grundsätzlich zur Realisierung von Energieflexibilität in Frage kommen könnten. Dabei haben wir unter anderem die Druckluftkompressoren in Kombination mit einem Druckluftspeicher sowie die Kältekammer identifiziert, die für die qualitätsgesicherte Lagerung der Faserverbundwerkstoffe genutzt wird. Zudem haben wir untersucht, welche Potenziale sich ergeben, wenn beide Standorte von INVENT gemeinsam bilanziert werden könnten.

Aktuell gibt es zwei Standorte, die unabhängig voneinander bilanziert werden: Der Hauptstandort mit den Produktionsstätten und einer PV-Anlage sowie ein Nebenstandort, der ebenfalls über eine PV-Anlage verfügt. Dieser Nebenstandort hat jedoch keine größeren Stromabnehmer und ist stattdessen mit zahlreichen Ladesäulen ausgestattet.

Welche Rolle spielte die Simulation, die im Rahmen des Projektes zum Einsatz kam, und welche Ergebnisse konnten Sie durch den Einsatz dieses Modells erzielen?

Die im Projekt eingesetzte Simulation diente als zentrales Werkzeug, um die Wirkung verschiedener Energieflexibilisierungsmaßnahmen zu bewerten und darauf basierend Handlungsempfehlungen abzuleiten. Mithilfe der Simulation wurden verschiedene Szenarien untersucht, um die komplexen Wechselwirkungen zwischen Stromverbrauchern, Produktionszeiten, PV-Erzeugung und Batteriespeichern zu analysieren. So simulierten wir unter anderem die Anzahl der Ladesäulen, die Kapazität eines stationären Batteriespeichers sowie Pooling-Konzepte zwischen den Standorten von INVENT.

Ein wesentliches Ergebnis der Simulation war, dass die Implementierung eines stationären Batteriespei-

chers die Lastspitzen signifikant senken konnte. Die Simulation zeigte beispielsweise, dass ein Batteriespeicher mit 50 kWh Kapazität ausreicht, um die Lastspitze von etwa 370 kW auf 300 kW zu reduzieren. Ein Speicher mit 125 kWh würde eine weitere Senkung auf 200 kW ermöglichen. Investitionen für solche stationären Speicher sinken aktuell erheblich, wodurch die durch reduzierte Lastspitzen erzielten Einsparungen bei den Energiekosten noch relevanter werden.

Durch die Simulation konnte INVENT realistische und umsetzbare Optimierungsmaßnahmen identifizieren, die sowohl wirtschaftliche als auch ökologische Vorteile bieten. Zudem zeigte die Simulation, dass Investitionen in stationäre Speicher durch die Nutzung bidirektionalen Ladens reduziert werden könnten: Lastspitzen der Autoklaven konnten durch die temporären Speicher der Fahrzeugflotte abgefangen werden, ohne den Komfort – d. h. den Ladezustand der Fahrzeuge am Ende des Arbeitstages – wesentlich zu beeinträchtigen.

Sie haben für das Projekt eine detaillierte Messkampagne durchgeführt. Welche Herausforderungen oder Überraschungen traten bei den Messungen auf?

Im Rahmen des Projekts haben wir eine Messkampagne für vier Anlagen durchgeführt, die sich auf große und besonders relevante Energieverbraucher konzentrierte: Zwei Autoklaven und zwei Druckluftkompressoren. Eine Herausforderung bestand in der Installation der Leistungsmessgeräte. Zum einen musste

Bild 2

Ein Elektroauto wird geladen – eine zentrale Komponente für bidirektionales Laden im Projekt.



gewährleistet sein, dass der Produktionsablauf nicht unterbrochen wird, zum anderen erfordert die Installation bei Anlagen mit einer Anschlussleistung von über 300 kW spezielles Know-how und Ausrüstung.

Eine überraschende Erkenntnis aus den Messungen war, dass einer der Kompressoren auch außerhalb der Produktionszeiten konstant Druckluft bereitstellte, was teilweise unnötige Stromkosten verursachte. Außerdem wurden unerwartete Spitzen im Energiebedarf festgestellt, die durch ungünstige Timing-Konstellationen mehrerer Maschinen entstanden. Diese Entdeckungen führten zur Empfehlung, die Produktionsprozesse besser zu koordinieren und solche Lastspitzen zu vermeiden.

Wie schätzen Sie die langfristigen Vorteile der Energieflexibilisierungsmaßnahmen für INVENT ein? Können die entwickelten Methoden auch für andere Unternehmen im Mittelstand nützlich sein?

Langfristig bietet das Projekt für INVENT zahlreiche Vorteile, da die Energiekosten durch die Anpassung des Energieverbrauchs an die Verfügbarkeit erneuerbarer Energien gesenkt werden können. Zusätzlich stärkt das Unternehmen durch diese Maßnahmen seine Position als nachhaltig agierender Betrieb. Bei der Entwicklung des Simulationswerkzeugs haben wir darauf geachtet, dass auch Nicht-Expertinnen und -Experten im Bereich Simulation dieses anwenden und parametrisieren können. Dies soll dazu beitragen, dass auch andere mittelständische Unternehmen davon profitieren können.

Für mittelständische Unternehmen im produzierenden Sektor ist das Simulationsmodell ebenfalls relevant, da es einen flexiblen und anpassbaren Ansatz zur Optimierung des Energieverbrauchs bietet. Der Einsatz des Modells kann anderen Unternehmen helfen, ihre Abhängigkeit von teurem Netzstrom zu verringern und die Eigenversorgung zu steigern. Das Projekt dient somit als Blaupause dafür, wie Unternehmen im Mittelstand ihren Energieverbrauch kosteneffizient und umweltfreundlich anpassen können, um sich auf zukünftige Energiepreisschwankungen vorzubereiten.

Was waren für Sie persönlich die größten Erkenntnisse oder Herausforderungen während des Projekts, und welche Pläne bestehen für zukünftige Projekte im Bereich der Energieflexibilisierung?

Für mich persönlich ist es jedes Mal spannend, theoretische Ansätze und Modelle in die Praxis zu übertragen. Besonders bereichernd ist es, diese Arbeit mit den Restriktionen des laufenden Betriebs in Einklang zu bringen. Zukünftig sollen die gewonnenen Erkenntnisse und die Simulationsmethodik weiterentwickelt und verfeinert werden, um Energieflexibilisierungsmaßnahmen für Unternehmen noch robuster und präziser bewerten zu können.

Vielen Dank, Herr Uhlig, für den interessanten Einblick in die Projektergebnisse. Ihre Erläuterungen zeigen anschaulich, wie innovative Ansätze umgesetzt werden können und welchen Mehrwert sie für Unternehmen schaffen.

Bild 3

Batteriespeicher helfen, Lastspitzen zu senken und Energie kosteneffizient zu reduzieren.



Verstecktes Wissen optimieren – Wie KI Produktionsmitarbeitende unterstützen kann

Projekt-Abschlussbericht von Eike Lorenz und Sascha Eckardt

Wie lassen sich Mitarbeitende in der Prozesssteuerung durch KI-generierte Einstellvorschläge von Prozessgrößen unterstützen? Dieser Frage ist das Mittelstand-Digital Zentrum Hannover zusammen mit der Firma H&T Presspart GmbH & Co. KG nachgegangen. Das Unternehmen fertigt pharmazeutische Geräte und Komponenten. Trotz automatisierter Aerosoldosen-Produktion sind Mitarbeitende weiterhin stark in die Überwachung der Prozessparameter eingebunden. Eine Lösung zur frühzeitigen Bestimmung optimaler Einstellungen soll sie entlasten.



Bild 1

Blick in die Fertigung
von Inhalatoren mit
mechanischen Zählwerken

Projektüberblick

Die Herstellung von medizinischen Produkten ist mit strengen Qualitätsvorgaben verbunden. Damit die hohen Ansprüche erreicht werden können, sind die Mitarbeitenden in der Produktion speziell auf den Herstellungsprozess geschult und eingearbeitet. Ziel des Projekts des Mittelstand-Digital Zentrums Hannover mit der H&T Presspart GmbH & Co. KG war die Erstellung einer Künstlichen Intelligenz (KI), welche die Mitarbeitenden im Lackierprozess von Aerosoldosen unterstützt, die richtigen Entscheidungen zu treffen, um die Prozessparameter optimal einzustellen.

Für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) bedeutet die Verwendung KI-gestützter Parametervorschläge in der Prozesssteuerung insbesondere eine schnellere Einarbeitung von Mitarbeitenden, Unabhängigkeit vom Erfahrungswissen einzelner Maschinenführenden und somit eine mögliche Antwort auf den Fachkräftemangel.

Unternehmen und Produkt

Die Firma H&T Presspart GmbH & Co. KG mit Sitz in Marsberg im Sauerland ist Hersteller von pharmazeutischen Geräten und Komponenten. Die Qualitätstoleranzen für pharmazeutische Produkte sind sehr eng, wodurch eine optimale Prozesssteuerung unabdingbar wird. Einer dieser Prozesse ist die spezielle Beschichtung von Aerosoldosen, um ein Anhaften von Medikamenten zu verhindern.

Herausforderung und Zielsetzung

Die zentrale Herausforderung in der Herstellung von medizinischen Produkten ist die Gewährleistung höchster Qualitätsstandards. Auch die Firma H&T Presspart GmbH & Co. KG muss sich dieser Herausforderung im Rahmen der Aerosoldosenherstellung stellen. Damit zu verabreichende Medikamente nicht an den Innenwänden der Dosen haften bleiben, werden diese in einem aufwändigen mehrschrittigen Prozess beschichtet. Die Eigenschaften der resultierenden Lackschicht hängen dabei von Parametern wie den Temperaturen und Drücken in den einzelnen Modulen der Lackieranlage, aber auch von den Umgebungsbedingungen sowie Lackeigenschaften ab. Die komplexen Zusammenhänge der Einflussparameter erfordern speziell geschulte und erfahrene Maschinenführende, die Änderungen rechtzeitig erkennen.

Derzeit wird dieser Herausforderung durch den Aufbau eines großen Erfahrungswissens seitens der Mitarbeitenden begegnet. Diese überwachen in Intervallen stichprobenartig die Eigenschaften der resultierenden Lackschicht und passen die Prozessparameter gegebenenfalls manuell an. Die Entscheidung darüber, welche Parameter verändert werden, basiert dabei auf dem Erfahrungswissen der Mitarbeitenden.

Das Ziel dieses Projekts war es daher, die Mitarbeitenden bei der Einstellung der Prozessparameter zu unterstützen. Dazu soll eine KI anhand aktueller Daten, bestehend aus Produktions- und Umgebungsbedingungen, Vorschläge generieren, welche den Mitarbeitenden helfen, die richtigen Parametereinstellungen vorzunehmen. Dadurch verringert sich im Idealfall die Einarbeitungszeit, die Entscheidungen zur Parameteranpassungen werden transparenter und die Abhängigkeit von Erfahrungswissen einzelner Mitarbeitender wird reduziert. Die KI-Anwendung könnte darüber hinaus auch der erste Schritt zu einem vollautomatisierten Lackierprozess sein, bei dem eine überwachende KI in einen geschlossenen Regelkreis eingebunden ist.

Um die korrekte Parametereinstellung zu unterstützen, wurde anhand eines historischen Datensatzes einer Lackierstraße der Firma H&T Presspart GmbH & Co. KG eine KI trainiert, welche auf Basis von Prozessparametern Qualitätsmerkmale der Lackschicht prädiziert. Dadurch konnten Parameter identifiziert werden, welche einen hohen Einfluss auf die Qualität besitzen und in Empfehlungen für etwaig notwendige Anpassungen überführt werden.

Lösungsweg

Innerhalb des Projekts wurde eine KI trainiert, die einen Zusammenhang zwischen Prozessparametern und Qualitätsmerkmalen herstellt und bei der Parametereinstellung unterstützen kann. Den historischen Datensatz dazu lieferte H&T Presspart GmbH & Co. KG, welcher aus Prozessparametern der Lackierstraße sowie aufgenommenen Qualitätsmerkmale der resultierenden Lackschicht besteht. Bei der KI handelt es sich um einen Regressor, der die Zielvariablen der Qualitätsmerkmale auf Basis der Variablen aus den Prozessparametern vorhersagt. Die Vorhersage der aktuell zu erwartenden Qualitätsmerkmale ermöglicht in Zukunft die Einstellung optimaler Prozessparameter.

Phase 1: Datenvorbereitung

Die erste Phase des Projekts beinhaltete die Sichtung und Verarbeitung der bereitgestellten Daten. Prozess- und Qualitätsdaten werden im Unternehmen auf unterschiedlichen Wegen aufgezeichnet und liegen daher in heterogener Form vor. Während die Prozessgrößen wie Temperatur und Druck in den unterschiedlichen Modulen der Lackierstraße beispielsweise im CSV-Format gespeichert werden, werden die händisch und stichprobenartig aufgenommenen Qualitätsdaten in XLSX-Dateien abgespeichert. Damit die Daten in geeigener Form vorliegen und für die weitere Verarbeitung geeignet sind, wurden Fehlstellen linear interpoliert, Redundanzen gelöscht, zusammengehörige Daten verknüpft und anschließend gemeinsam in einer Datenbank gespeichert.

Phase 2: Training eines KI-Modells

Das Ziel der zweiten Phase war das Training einer KI, um einen Zusammenhang zwischen Prozessvariablen und Qualitätsmerkmalen zu bilden. Als Prozessvariablen wurden neben den Bedingungen in den Modulen der Lackierstraße der Wochentag und die Wetterdaten für den Standort der Produktion berücksichtigt, da deren Einfluss auf den Prozess genauer untersucht werden sollte.

Die Zielvariable des Regressors waren das Gewicht und die elektrische Leitfähigkeit der Lackschicht. Für beide Merkmale wurde jeweils ein neuronales Netz entwickelt, welches aus mehreren aufeinander aufbauenden Schichten besteht.

Phase 3: Vorschlagsgenerierung

In der dritten Phase wurde das eigentliche Ziel der Vorschlagsgenerierung verfolgt. Mithilfe eines künstlich erzeugten Rauschens in den Eingangsparametern wurde zunächst evaluiert, welche der Prozessvariablen einen starken Einfluss auf die Vorhersage der Qualitätsmerkmale besitzen. Hierbei wurde nacheinander jeweils ein Parameter mit einem unterschiedlich starken Rauschen belegt. Ändert sich der Vorhersagewert stärker als bei anderen Parametern, kann der veränderte Parameter als entscheidend betrachtet werden. Auf Basis dieser Zusammenhänge wurde abschließend ein Vorgehen implementiert, welches die entscheidenden Parameter eines neuen Parametersatzes im Falle unzureichender Qualitätsergebnisse iterativ optimiert, bis eine zufriedenstellende Qualität zu erwarten ist. Die gefundenen Parameter werden abschließend den Maschinenführenden vorgeschlagen, sodass frühzeitig in den Prozess eingegriffen werden kann.

Phase 4: Aufbereitung der KI als prototypische Umsetzung

Damit die KI in Zukunft weiterentwickelt werden kann, wurde sie als übersichtliches und leicht verständliches Jupyter-Notebook zusammengefasst. Jupyter-Notebooks haben den Vorteil, dass sie eine interaktive Plattform bieten, welche es erlaubt, enthaltene Modelle problemlos zu verändern und für eigene Vorhaben anzupassen. Nutzende werden durch einen Mix aus Programmcode und erklärenden Text interaktiv durch das prototypisch umgesetzte Modell geführt.



Bild 2
Aerosoldosen für die inhalative
Medikamentenverabreichung



Bild 3
Fertigungsstrecke in der Herstellung
von medizinischen Aerosoldosen

Nutzen für den Mittelstand

Der produzierende Mittelstand in Deutschland sieht sich mit Fachkräftemangel, Energiepreissteigerungen und weltweitem Wettbewerbsdruck konfrontiert. Eine Möglichkeit, diesem entgegenzutreten, könnte eine hochautomatisierte und ressourceneffiziente Produktion sein, die konstant höchste Qualität sicherstellt. Durch die Einbindung von KI in die moderne Produktion ist ein wichtiger Schritt in Richtung dieses Ziels gemacht.

Der in diesem Projekt entwickelte Ansatz hat gezeigt, dass mithilfe einer KI auch verstecktes Wissen greifbar gemacht werden kann, um Produktionsprozesse zu optimieren und Maschinenbedienende zu entlasten.

Autoren

Eike Lorenz

Wissenschaftlicher Mitarbeiter am IPH - Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH und Projektingenieur am Mittelstand-Digital Zentrum Hannover

Sascha Eckardt

Wissenschaftlicher Mitarbeiter am IPH - Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH und Projektingenieur am Mittelstand-Digital Zentrum Hannover

Einführen eines Informationssicherheits- managementsystems in einem KMU

Projekt-Abschlussbericht von Jan-Niklas Puls und Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinz Niemann



Bild 1

Informationssicherheits-
managementsystem,
kurz ISMS

Projektüberblick

Das Mittelstand-Digital Zentrum Hannover hat das Andreaswerk aus Vechta im Rahmen eines Digitalisierungsprojektes bei der Einführung eines Informationssicherheitsmanagementsystems (ISMS) unterstützt. In der täglichen Arbeit unterstützt das Unternehmen Menschen mit Beeinträchtigungen sowie deren Familien.

Das Ziel des Projektes war es, den ersten Zyklus eines ISMS mit Hilfe von Prozessen und Dokumentation im Unternehmen durchzuführen, um dieses dazu zu befähigen, die folgenden Zyklen eigenständig durchlaufen zu können und somit die Informationssicherheit schrittweise zu erhöhen. Hierzu wurden im ersten Schritt Grundlagen aus dem Bereich Informationssicherheit vermittelt. Anschließend wurde die Notwendigkeit des Themas durch das Management transparent den Mitarbeitenden dargelegt, bevor anschließend mit der operativen Arbeit begonnen wurde.

Neben der Ermittlung der aktuellen organisatorischen und technischen Struktur des Unternehmens waren ebenfalls die Durchführung einer Schutzbedarfsanalyse sowie die Erarbeitung von Richtlinien von elementarer Bedeutung. Die wichtigsten Projektergebnisse wurden in Form von Lernnuggets aufbereitet.

[1]

[Richtlinie \(EU\) 2022/2555 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 14. Dezember 2022](#)

Auch kleine und mittlere Unternehmen (KMU) sind zunehmend steigenden Bedrohungen in Bezug auf die Informationssicherheit ausgesetzt. Ein Informationssicherheitsvorfall kann zur Folge haben, dass Dienstleistungen nicht mehr angeboten werden oder die Produktion von Waren unterbrochen wird. Um sich als Unternehmen vor solchen Bedrohungen bestmöglich schützen zu können, bietet es sich an, ein Informationssicherheitsmanagementsystem einzuführen.

Ein ISMS betrachtet die Informationssicherheit ganzheitlich. Auch von Seiten der Gesetzgebung wird die Einführung eines ISMS indirekt gefordert, mit dem Ziel, die Informationssicherheit von Unternehmen zu erhöhen. So wird aktuell die europäische Richtlinie Netz- und Informationssysteme 2 [1] in nationales Recht überführt. Sie definiert verschiedene Anforderungen, die sich in der Regel mit Hilfe eines ISMS umsetzen lassen.

Unternehmen und Produkt

Das Andreaswerk ist ein eingetragener Verein mit der Prämisse, in staatlich anerkannten Einrichtungen und Diensten Menschen aus dem Landkreis Vechta zu fördern und zu betreuen. Aktuell sind es 1500 Menschen. Dabei ist es das Ziel, Menschen mit Beeinträchtigungen und ihren Familien möglichst optimale Hilfe zu gewährleisten. Um dies zu erreichen und die Menschen wohnortnah zu unterstützen, unterhält das Andreaswerk Einrichtungen im gesamten Landkreis. Das Andreaswerk konzentriert sich hierbei auf die drei Kategorien Leben, Lernen und Arbeiten. So werden beispielsweise Wohnungen, Kindergärten, Schulen, Berufsausbildungen und Werkstätten betrieben.

Herausforderung und Zielsetzung

Das Andreaswerk verfügt bereits über Prozesse im Bereich Informationssicherheit. Allerdings ändert sich die Bedrohungslage für Unternehmen aktuell und auch in Zukunft wird dies stetig der Fall sein, sodass hierauf mit einer kontinuierlichen Anpassung von Informationssicherheitsprozessen reagiert werden muss.

Das Ziel des Projektes ist es deshalb, das Unternehmen bei der Einführung eines Informationssicherheitsmanagementsystems (ISMS) mit Hilfe von Prozessen, Dokumentation sowie digitalen Lerneinheiten zu unterstützen.

Lösungsweg

Um ein ISMS im Unternehmen einführen zu können und im Anschluss kontinuierlich zu betreiben, ist es wichtig im ersten Schritt zu ermitteln, wie eine sinnvolle Umsetzung eines ISMS allgemein aussieht. In den darauffolgenden Schritten werden dann konkrete Maßnahmen umgesetzt.

Schritt 1: Allgemeine Vorgehensweise zur Einführung eines ISMS ermitteln

Ein ISMS ist ein Prozess, der nach dem PDCA-Zyklus ablaufen sollte. Der PDCA-Zyklus (Bild 2) besteht aus den vier verschiedenen Phasen Plan (Planen), Do (Durchführen), Check (Überprüfen) und Act (Verbessern), wobei nach Beendigung der vierten Phase wieder mit der ersten Phase begonnen wird. In den vier Phasen sind die umseitig folgenden Aufgaben durchzuführen.

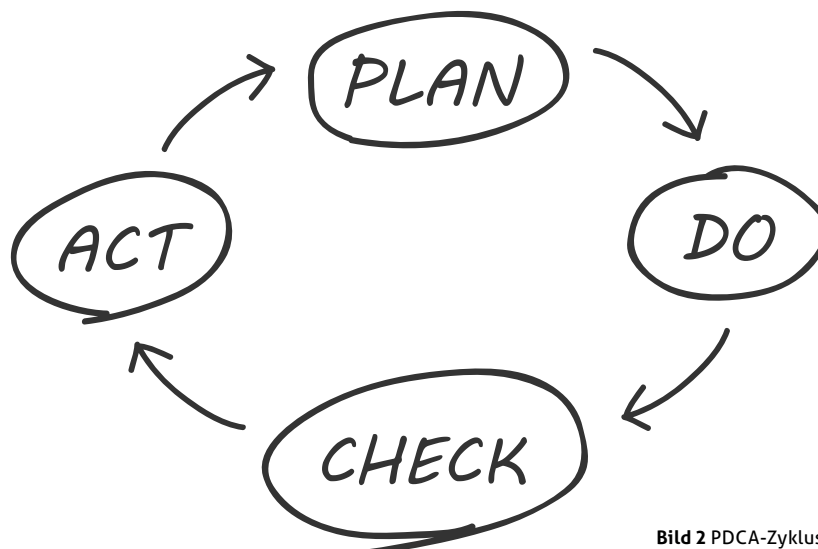


Bild 2 PDCA-Zyklus

Plan (Planen): In dieser Phase wird geplant, welche Maßnahme, beispielsweise neu einzuführende Strategien oder die Verbesserung von aktuellen Prozessen, wie umgesetzt werden sollte.

Do (Durchführen): In der Do-Phase wird die zuvor ausgearbeitete Planung umgesetzt und es werden die hierfür benötigten Ressourcen zur Verfügung gestellt.

Check (Überprüfen): In der dritten Phase wird überprüft, ob die Durchführung tatsächlich das Ziel der Planungsphase widerspiegelt oder Abweichungen festgestellt werden. Weiterhin wird überprüft, ob der aktuelle Prozess handhabbar ist oder Probleme aufgetreten sind, die in Zukunft vermieden werden können.

Act (Verbessern): In der vierten und letzten Phase des Zyklus, bevor dieser wieder von neuem beginnt, werden die in der Check-Phase überprüften Maßnahmen angepasst, sofern ein Bedarf ermittelt wurde.

Schritt 2: Voraussetzungen schaffen

Damit ein ISMS im Unternehmen erfolgreich sein wird, sind verschiedene Voraussetzungen zu erfüllen. Die wichtigste Voraussetzung ist das Management Commitment. Dies beschreibt die aktive Unterstützung durch das Top-Management. Nur wenn das ISMS aktiv vom Top-Management gefördert und gelebt wird, kann eine Umsetzung gelingen.

Neben der Etablierung des ISMS als Top-Down-Prozesses ist die Informationssicherheitspolitik und sind somit die verschiedenen Ziele eines ISMS zu definieren. Darüber hinaus sind die benötigten Ressourcen zur Verfügung zu stellen. Hierbei wird zwischen finanziellen Ressourcen und benötigten Personalressourcen unterschieden.

Beide müssen in der erforderlichen Menge vorhanden sein, so dass das ISMS für die Unternehmensgröße passend umgesetzt werden kann. Eine zwingend benötigte Funktion ist beispielsweise der Informationssicherheitsbeauftragte (ISB), der sich operativ mit der Umsetzung und Koordinierung des ISMS-Prozesses beschäftigt.

Außerdem wird in diesem Schritt der Betrachtungsbereich definiert. Der Betrachtungsbereich beschreibt, welche Abteilungen zunächst durch ein ISMS geschützt werden sollen. Dieser sollte zunächst auf ausgewählte Abteilungen beschränkt sein, um exemplarisch in diesen einen effektiven Schutz umzusetzen und erste Erfahrungen mit dem ISMS zu sammeln. Im weiteren Verlauf sollte das ISMS dann um weitere Abteilungen ausgedehnt werden.

Schritt 3: Einführen eines ISMS

Nach den umgesetzten Voraussetzungen beginnt mit dem nächsten Schritt die Umsetzung des operativen ISMS. Hierfür wird allen Mitarbeitenden zunächst transparent die Informationssicherheitspolitik dargestellt. Dies geschieht in Form einer Informationssicherheitsleitlinie.

Hierbei handelt es sich um ein Grundsatzdokument, welches die Herangehensweise des Unternehmens an das Thema darstellt. Als Teil des ISMS-Prozesses wird diese ebenfalls kontinuierlich an die aktuellen Gegebenheiten – beispielsweise die aktuelle Bedrohungsanfrage – angepasst. Konkret legt die Leitlinie in Bezug auf die Informationssicherheit folgendes fest:

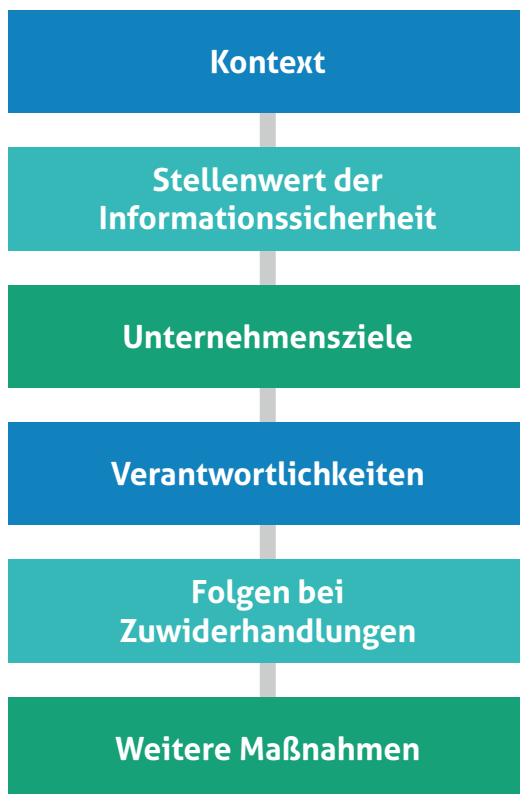
- Bedeutung und Stellenwert
- Verbindliche Prinzipien
- Anzustrebendes Niveau

Neben der Informationssicherheitsleitlinie ist die Einführung von spezifischen Richtlinien für die Umsetzung eines ISMS entscheidend. Diese richten sich jeweils an bestimmte Abteilungen und Personen und sind auch nur für diese zugänglich. Thematisch beinhalten sie Verhaltensweisen und Vorschriften mit dem Ziel, ein einheitliches Sicherheitsniveau zu erreichen. Auch die Richtlinien werden kontinuierlich an die aktuellen Gegebenheiten angepasst. Beispielhafte Richtlinien sind folgende:

- Umsetzung von starken, komplexen Passwörtern
- Vorgehensweise bei einem Verdacht auf Social Engineering
- Durchführen von Datensicherungen
- Durchführen einer Risikoanalyse

Um das Thema Informationssicherheit nachhaltig im Unternehmen zu etablieren, ist es ebenfalls entscheidend, dass die Mitarbeitenden in diesem Bereich umfangreich geschult sind, da diese ein häufiges Angriffsziel darstellen. Es sind die Mitarbeitenden, die eine betrügerische Nachricht, beispielsweise eine erfolgreich zugestellte Phishing-Nachricht erkennen müssen und so das Unternehmen vor einem möglichen Schaden schützen.

Damit Mitarbeitenden dies bestmöglich gelingt, müssen sie kontinuierlich über die aktuellen Bedrohungen informiert und geschult werden. Für die Ausarbeitung eines Schulungsprozesses, um notwendige Schulungen für Mitarbeitende zu planen und bereits durchgeführte Schulungen zu dokumentieren, eignet sich ebenfalls die Umsetzung einer Richtlinie.

**Bild 3**

Exemplarischer Aufbau einer Informationssicherheitsleitlinie

Nutzen für den Mittelstand

Neben dem Andreaswerk stehen viele kleine und mittlere Unternehmen vor der Herausforderung, sich gegen Cyber-Angriffe zu schützen, um nicht eines Tages Opfer eines Angriffs auf die Informationssicherheit zu werden. Um Unternehmen bei dieser Herausforderung zu unterstützen, wurde im Rahmen dieses Digitalisierungsprojektes die Einführung eines ISMS beispielhaft durchgeführt und es wurden die notwendigen Grundlagen und Schritte in Form von Lernnuggets ausgearbeitet. Diese Lernnuggets ermöglichen es auch anderen Unternehmen, ebenfalls ein ISMS einzuführen und nachhaltig zu etablieren.

Die Lernnuggets finden Sie online unter <https://digitalzentrum-hannover.de/e-learning/cybersicherheit>



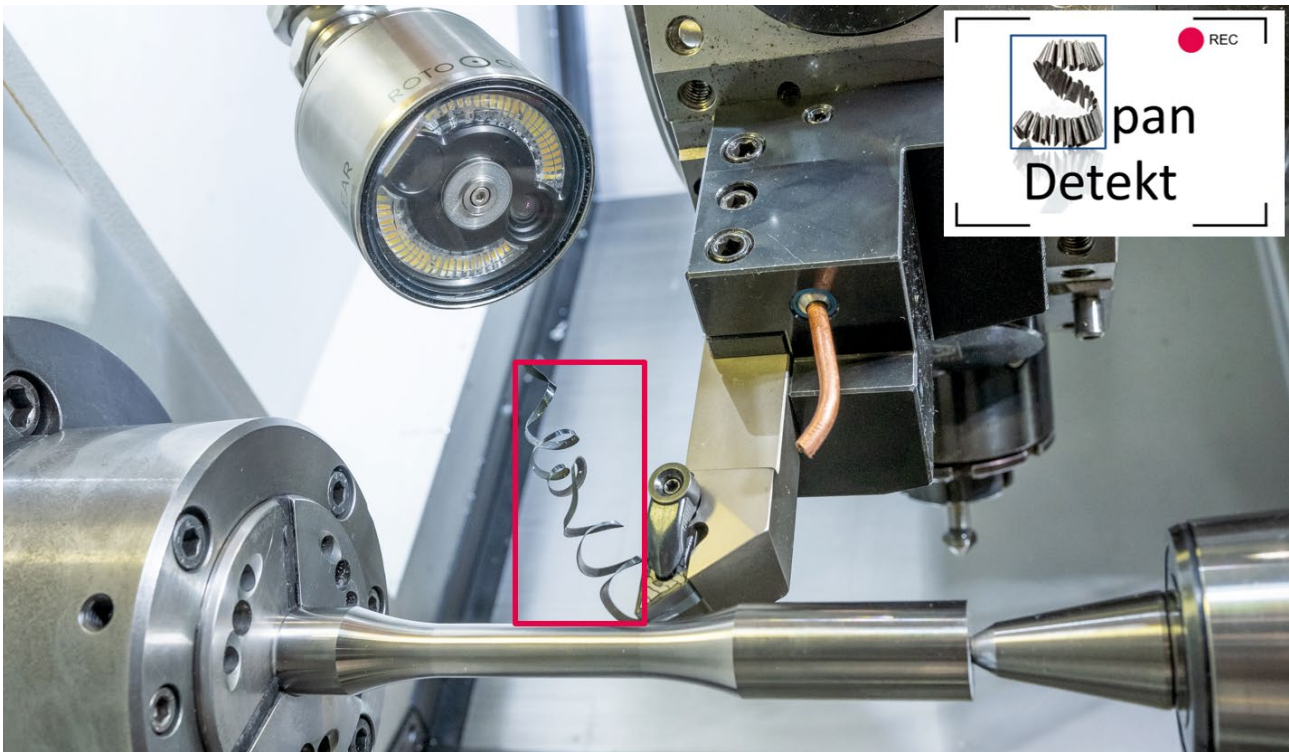
Autoren

Jan-Niklas Puls

Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Fakultät 1 Elektro- und Informationstechnik der Hochschule Hannover und Experte für IT-Sicherheit im Mittelstand-Digital Zentrum Hannover

Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinz Niemann

Professor im Fachbereich Prozess-informatik und Automatisierungstechnik (PIA) der Fakultät 1 Elektro- und Informationstechnik, Hochschule Hannover

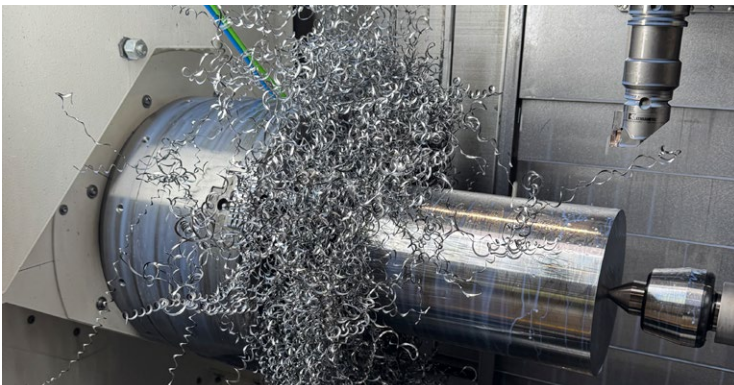


KI detektiert Späne im Prozess

Prof. Dr.-Ing. Berend Denkena, Henning Buhl, Lee Hartung

Die Prozesssicherheit und die Produktqualität werden maßgeblich durch Späne, die nicht ordnungsgemäß aus der Spanbildungszone abtransportiert werden, beeinträchtigt. Derzeit müssen lange Späne oder Spannester manuell erkannt und beseitigt werden, um Schäden am Werkstück oder der Werkzeugmaschine zu vermeiden. Im Projekt Span-Detekt wird daher von der Rotoclear GmbH und dem Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW) Hannover ein kamerabasiertes System zur automatisierten Erkennung kritischer Späne mittels Maschinellen Lernen entwickelt.

Bild 1 Spanstau beim Längsdrehen



Späne werden anhand ihrer Form und Raumvolumen in die Kategorien „gut“, „brauchbar“ und „ungünstig“, und eingeteilt (Bild 1). Die Spanraumzahl misst das Verhältnis zwischen dem Spanvolumen und dem abgetrennten Werkstoffvolumen. Abhängig von der Spanform und der Spanraumzahl sind acht Klassen definiert. Lange Späne, wie Band- oder Wirrspäne sowie Flachwendelspäne können bei Fertigungsprozessen mit kontinuierlichem Schnitt entstehen und gelten als ungünstig. Sie neigen dazu, sich während des Prozesses zu verfangen und Spannester zu bilden. Zudem können diese umherschlagen, was zu Schäden an Werkstück, Werkzeug und Maschine führen kann. Des Weiteren können umherschleudernde Späne eine Gefahr für das Personal darstellen.

Späne mit einer geringen Spanraumzahl können ebenfalls Schäden verursachen, wenn sie etwa bei Bohrprozessen nicht ordnungsgemäß abgeführt werden. Dadurch entsteht ein Spanstau, der einen Werkzeug-

bruch verursachen kann. Günstige Spanformen treten etwa bei Fertigungsprozessen mit nicht kontinuierlichem Schnitt oder durch forcierte Spanbrüche auf.

Aktuell werden die Spanformen optisch durch das Maschinenpersonal erfasst und bewertet. Dadurch werden Personalkapazitäten gebunden und der vollständig automatisierte Betrieb verhindert. Insbesondere in der Einzelteil- und Kleinstserienfertigung werden Prozesse nicht vollständig optimiert, wodurch kritische Späne entstehen können. Eine automatisierte Detektion und Bewertung von Spänen sind daher unabdingbar. Ein kommerzielles System zur Späne-Detektion ist derzeit am Markt nicht verfügbar. In der Forschung existieren Ansätze, den Spanbruch mittels Körperschallsensoren zu detektieren. Spanform und Position bleiben allerdings unbekannt.

Der Span-Detektor

Im Projekt „Span-Detekt“ wird die prozessparallele Detektion und Analyse von Spänen mittels bilddatenbasierter Ansätze erforscht. Hierfür kommen Methoden des

Maschinellen Sehens, einem Teilbereich des Maschinellen Lernens (ML), zum Einsatz. Ziel ist es, ein kostengünstiges System zur prozessparallelen Spanüberwachung zu entwickeln, das in bestehende Werkzeugmaschinen nachgerüstet werden kann. Der Aufbau gliedert sich in drei Teilsysteme: ein Kamerasystem (Bild 2 links), einen KI-basierten Objekt-Detektor (Bild 2 Mitte) und eine Prozessüberwachung (Bild 2 rechts).

Mithilfe des Kamerasystems werden die Bilddaten während des Fertigungsprozesses aufgezeichnet. Dies wird mit einem Kamerasystem Rotoclear C2 des Projektpartners umgesetzt. Dieses System ist speziell für den Einsatz in Werkzeugmaschinen ausgelegt und verfügt über einen LED-Ring zur Ausleuchtung des Innenraums sowie eine rotierende Scheibe zur Sichtoptimierung beim Einsatz von Kühlschmierstoff.

Die aufgezeichneten Bilddaten werden von dem Objekt-Detektor analysiert. Dabei werden Algorithmen des Maschinellen Sehens eingesetzt, da sie sich bereits für die Detektion und Klassifizierung von

Objekten in Bilddaten in anderen Domänen bewährt haben. Für eine zuverlässige Späneüberwachung müssen vorhandene Späne erkannt und die Spanformklasse korrekt zugeordnet werden. Für das dritte Teilsystem „Prozessüberwachung“ ist geplant, die Ergebnisse des Objekt-Detektors über einen definierten Zeitraum zu analysieren und den Fertigungsprozess als „gut“, „grenzwertig“ oder „kritisch“ zu bewerten.

Hierfür werden ML-Modelle untersucht, die den zeitlichen Kontext von Daten berücksichtigen können. Dadurch wird ein Prozess beispielsweise erst dann als „kritisch“ eingestuft, wenn sich ein langer Span über einen längeren Zeitraum am Werkstück oder Werkzeug befindet. Die ersten beiden Teilsysteme werden nachfolgend im Detail vorgestellt.

Systemaufbau

Das Kamerasystem Rotoclear C2 wurde mit zwei Kameras in einer Drehmaschine Gildemeister CTX 420 mittels Magnethalterungen befestigt. Dadurch kann die Position mit geringem Aufwand adaptiert

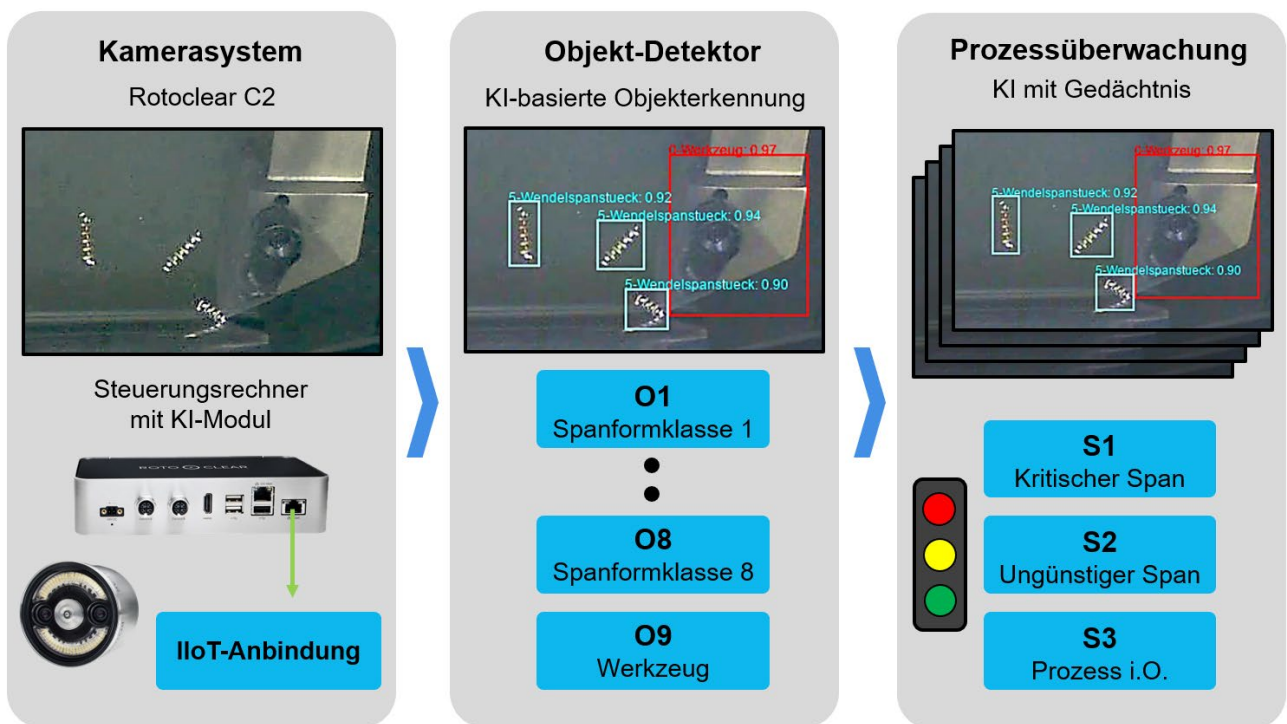
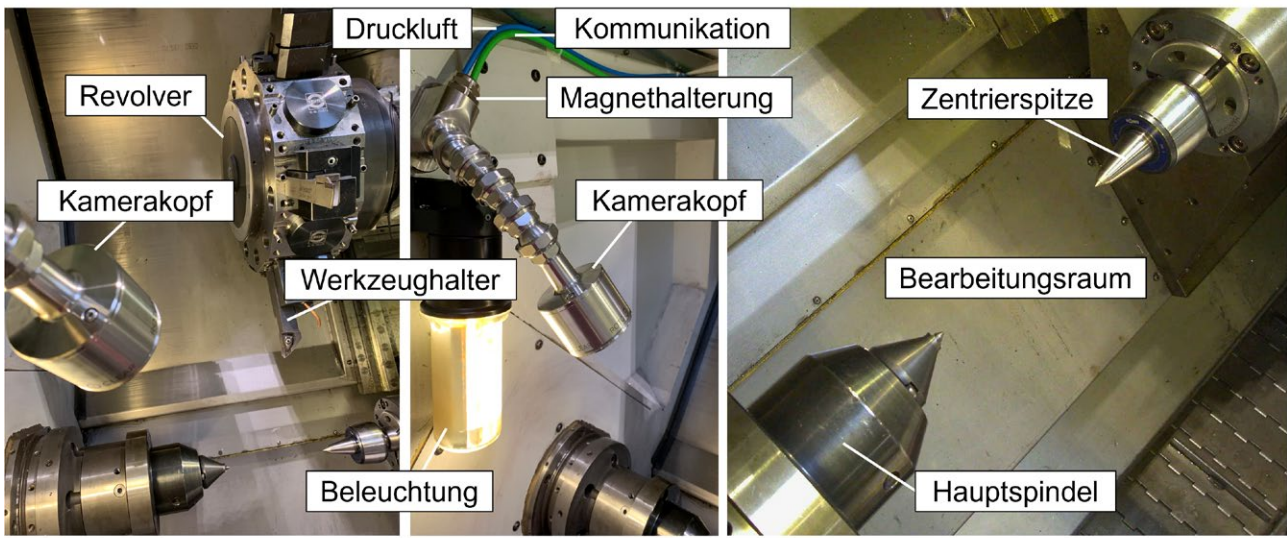


Bild 2 Teilsysteme des Span-Detektors



Kameraeinbau CTX 420

Magnethalterung & Kabelführung

Sicht auf den Bearbeitungsraum

Bild 3

Aufbau des Kamerasystems in der Gildemeister CTX 420

werden. Eine Kamera wurde mit direkter Sicht auf die Spanbildungszone gerichtet (Bild 3). Eine weitere Kamera wurde zur Arbeitsraumüberwachung installiert (nicht in Bild 3 abgebildet).

Bei der Montage eines Kamerakopfes am Revolver zeigte sich, dass das Sichtfeld der Kamera durch den Werkzeughalter eingeschränkt wird und Späne teilweise verdeckt werden können. Zudem erfolgt die Spanbildung in Richtung der Kamera-linse. Dadurch ist auf zweidimensionaler

Ebene kein Rückschluss auf die Spangröße möglich. Deswegen ist eine Positionierung der Kamera orthogonal zur Drehachse erforderlich. Erste Aufnahmen zeigten, dass die initiale Belichtungszeit von 16 ms zu hoch gewählt war, um Späne ohne Bewegungsunschärfe aufzuzeichnen. Deswegen wurde die Belichtungszeit schrittweise verkürzt, bis eine scharfe Detektion des Spanumrisses ermöglicht wurde. Durch die verkürzte Belichtungszeit fällt weniger Licht auf den Kamerasensor, wodurch die Bilder dunkler werden. Um dies zu kom-

pensieren, wurde der ISO-Wert erhöht, was zu erhöhtem Bildrauschen führte. Durch eine Rauschunterdrückung konnte dieser Effekt minimiert werden. Eine Belichtungszeit von 1 ms bietet einen guten Kompromiss aus Bewegungsunschärfe und Belichtung, sodass Späne in den Bilddaten klar erkennbar sind.

Teilsystem: Objekt-Detektor

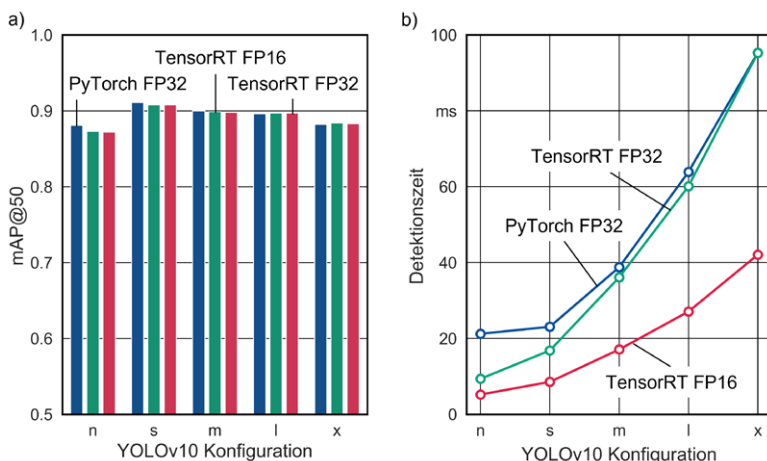
Zum Anlernen des Objekt-Detektors wurde aus unterschiedlichen Drehprozessen ein Datensatz aus etwa 3.000 Bilddaten erstellt und entsprechend der aufgetretenen Spanformklassen gelabelt. Für die Objektdetektion wurde YOLO (You Only Look Once) mit der Version YOLOv10 untersucht. Diese Version ist insbesondere für eine Echtzeit-Objekterkennung geeignet und somit auch für eine prozessparallele Späne-Detektion. YOLOv10-Modelle sind in verschiedenen Konfigurationen verfügbar und unterscheiden in der Anzahl der Modellparameter. Die Konfiguration beeinflusst daher die Trainings- und Detektionszeit sowie die Vorhersagegenauigkeit.

Es wurden fünf verschiedene Konfigurationen trainiert, um die Leistungsfähigkeit spezifisch auf die Späne-Detektion zu bewerten. Die Genauigkeit der Vorhersagen wurde anhand der Mean-Average-Preci-

Bild 4

Modellvergleich: NVIDIA Jetson Orin NX 8GB mit 70 TOPS

a) Genauigkeit, b) Detektionszeit



sion (mAP@50) charakterisiert. Dabei handelt es sich um eine gängige Metrik zur Bewertung von Objekterkennungsmodellen. Die mAP@50 gibt an, wie gut ein Modell die Positionen und Klassen von Objekten in Bildern vorhersagt. Typischerweise liegt die mAP@50 zwischen 0 und 1, wobei Werte näher an 1 eine bessere Leistung anzeigen. Die Modellkonfiguration hat neben der Trainingszeit auch einen Einfluss auf die Detektionszeit. Die Aufnahme der Detektionszeit erfolgt aus dem Durchschnitt von 1000 Vorhersagen je Modellkonfiguration. Bild 4 zeigt die validierte Modellgenauigkeit und die ermittelten Detektionszeiten für PyTorch (Standardausgabeformat bei allen neueren YOLO Versionen, Genauigkeit: FP32) und für TensorRT (Format zur Modelloptimierung bei Nutzung von Nvidia Hardware, Genauigkeit: FP16 und FP32).

Im Vergleich zu PyTorch ist die Detektionsgenauigkeit bei TensorRT innerhalb einer Modellkonfiguration nahezu identisch. Hingegen konnten die Detektionszeiten für weniger komplexe Modellarchitekturen deutlich gesenkt werden. Eine Reduzierung der Genauigkeit von FP32 auf FP16 geht mit einer weiteren Reduktion der Detektionszeit einher, ohne die Detektionsgenauigkeit zu beeinflussen. Für eine prozessparallele Überwachung ist die Detektionszeit von besonderer Bedeutung. Bei einer Schnittgeschwindigkeit von 150 m/min kann innerhalb von 10 ms ein Bandspan (Spanformklasse 1) mit einer Länge von ca. 25 mm entstehen.

Um bereits während der Spanbildung mögliche kritische Späne zu erkennen, wird eine Detektionszeit von 20 ms angestrebt. Um die Gesamtperformance zu beurteilen fällt neben der reinen Detektionszeit zusätzliche Rechenzeit für die Datenvor- und -nachbereitung sowie Bereitstellung im IIoT an. Dabei bildet die YOLOv10s FP16 Konfiguration einen guten Kompromiss zwischen Detektionsgenauigkeit und -zeit ab. Mit diesem Modell ist es möglich Späne während eines laufenden Prozesses zu detektieren (Bild 5).

Zusammenfassung und Ausblick

In Fertigungsprozessen, insbesondere beim Drehen, entstehen verschiedene Spanformen, die den Produktionsverlauf erheblich beeinflussen können. Lange Späne wie Band- oder Wirrspäne gelten als problematisch, da sie Maschinen, Werkzeuge und Werkstücke beschädigen sowie das Personal gefährden können. Aktuell werden diese kritischen Späne manuell von Maschinenpersonal erfasst und bewertet, was personelle Ressourcen bindet und eine vollständige Automatisierung verhindert.

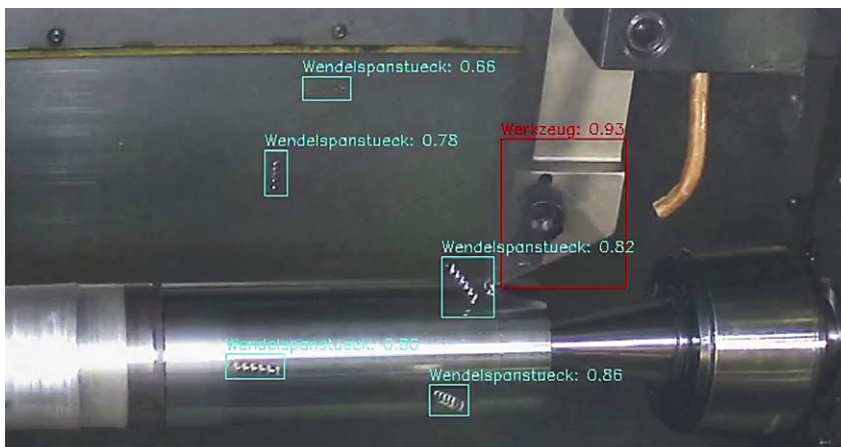
Das Projekt „Span-Detekt“ soll dieses Defizit durch eine automatisierte, bildbasierte Späne-Detektion und Bewertung beheben. Das System besteht aus drei Teilsystemen. Das Rotoclear Kamerasystem C2 erfasst die Bilddaten vom Prozess. Der Objektdetektor nimmt diese entgegen und führt eine Spandetektion durch. Auf der verwendeten Hardware, können Videos-

treams mit anschließender Detektion mit bis zu 60 Bildern pro Sekunde verarbeitet werden, was eine kontinuierliche Überwachung der Spanformen ermöglicht. Durch die aktuelle Begrenzung auf eine Werkzeugmaschine ist es von besonderer Bedeutung die Generalisierung des Modells zu verbessern. Dafür werden Daten aus anderen Werkzeugmaschinen dem Trainingsdatensatz hinzugefügt.

Im darauffolgenden Schritt gilt es, die Ergebnisse des Objekt-Detektors gezielt weiterzuverarbeiten, um eine prozessparallele Bewertung zu erzeugen (Teilsystem 3). Durch die kontinuierliche Bewertung der Spanform- und -position geht ein wichtiger Schritt in Richtung einer vollautomatisierten Fertigung einher. Perspektivisch könnte das System in industrielle Produktionslinien integriert werden, um das Risiko von Maschinen-, Werkzeug-, Werkstück- und Personenschäden zu minimieren.

Dieses ZIM-Projekt wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Das IFW und die Rotoclear GmbH bedanken sich für die finanzielle Unterstützung.

Bild 5 Ausschnitt Vorhersage des Objekt-Detektors



Autoren

Prof. Dr.-Ing. Berend Denkena
 Leiter des Instituts für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW) der Leibniz Universität

Henning Buhl
 Leiter des Bereiches Maschinen und Steuerungen am IFW

Lee Hartung
 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am IFW

Mit neuronalen Netzen zur präzisen Kraftrekonstruktion beim Fräsen

Prof. Dr.-Ing. Berend Denkena, Henning Buhl, Dennis Stoppel

Mithilfe künstlicher neuronaler Netze (KNN) ist es möglich, aus steuerungsinternen Signalen die Prozesskräfte beim Fräsen zu rekonstruieren. Jedoch können in der industriellen Anwendung Situationen entstehen, die das KNN zuvor nicht gelernt hat und daher nicht vorhersagen kann. Um diese Fälle rechtzeitig zu erkennen, wurde eine Methode zur Bestimmung der Unsicherheit eines KNN umgesetzt.

Für die Überwachung von Fräsprozessen sind Prozesssignale unerlässlich. Kräfte und Schwingungen, die während des Prozesses messbar sind, finden dabei in zahlreichen Fällen Anwendung, um z. B. Prozessstabilität oder Werkstückqualität sicherzustellen. Eine präzise Kraftmessung erfordert jedoch zusätzliche Sensorik. Die höchste Genauigkeit kann in der Praxis mit einem Dynamometer erreicht werden, das entweder werkzeug- oder werkstückseitig montiert wird. Der hohen Messgenauigkeit stehen eine Einschränkung des Arbeitsraums, hohe Anschaffungskosten und eine Erhöhung der Nachgiebigkeit gegenüber.

Als Folge dessen kommen Dynamometer nur in selten Anwendungsfällen in der Produktion zum Einsatz. Alternativ können anhand von Dehnungsmessstreifen (DMS), die am Spindelschlitten oder dem Werkzeughalter appliziert wurden, die Prozesskräfte rekonstruiert werden. Bislang erfordert dies jedoch einen hohen maschinenindividuellen Aufwand. Zusätzlich können Fehler beim Applizieren der DMS die Signalqualität und Lebenszeit der Sensoren deutlich reduzieren.

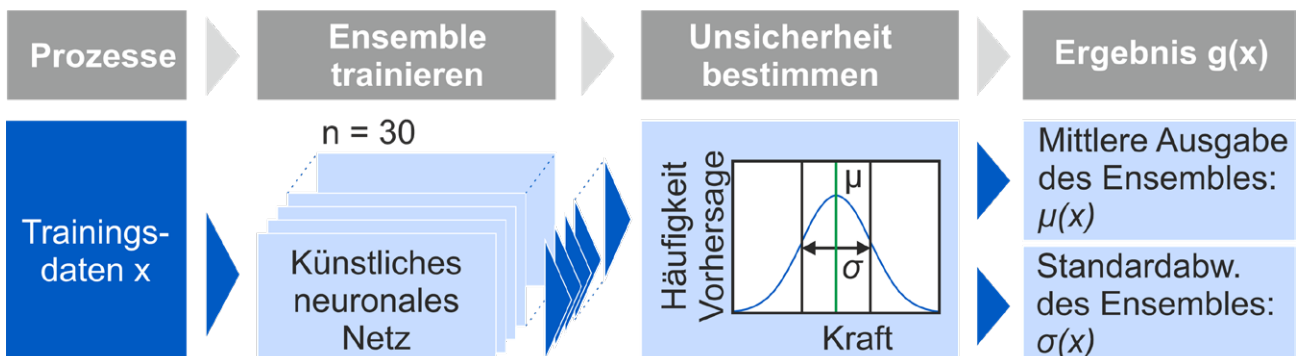
Als Alternative zur direkten Kraftmessung besteht die indirekte Kraftmessung, bei der die am Tool Center Point wirkenden Prozesskräfte aus den Antriebssignalen der Maschine rekonstruiert werden. Die Methode kommt daher ohne zusätzliche Sensorik aus. Um die Prozesskräfte mit ausreichender Genauigkeit aus den Antriebssignalen zu rekonstruieren, müssen die Massenträgheit der Maschinenkomponenten, Reibkräfte an den Achsführungen und andere Einflüsse jedoch kompensiert werden. Dies kann entweder über physikalische Modelle oder mittels Modellen des maschinellen Lernens (ML) erfolgen. In vorangegangenen Arbeiten des Instituts für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen der Leibniz Universität Hannover (IFW) wurden bereits beide Ansätze einander gegenübergestellt [1].

Die Ergebnisse zeigen, dass mittels ML eine höhere Genauigkeit und eine bessere Generalisierbarkeit für verschiedene Prozesse sichergestellt werden kann. Eine wesentliche Herausforderung ist bislang, die Unsicherheit des ML-Modells bei der Kraftrekonstruktion zu bestimmen. Dabei wird im Allgemeinen zwischen aleatorischer und epistemischer Unsicherheit unterschieden.

Die aleatorische Unsicherheit beschreibt die Unsicherheit des physikalischen Systems. Im Falle der Kraftrekonstruktion stellen Kraftmessungen mittels Dynamometer die Ground-Truth dar. Die aleatorische Unsicherheit wird daher durch die Messgenauigkeit des Dynamometers quantifiziert.

Die epistemische Unsicherheit hingegen beschreibt die Unsicherheit des ML-Modells gegenüber der Ground Truth. Sie ist ein wesentliches Maß, um die Gültigkeit des Modells zu beschreiben und somit falsche Vorhersagen zu erkennen.

Bild 1 Die Ensemble-Methode



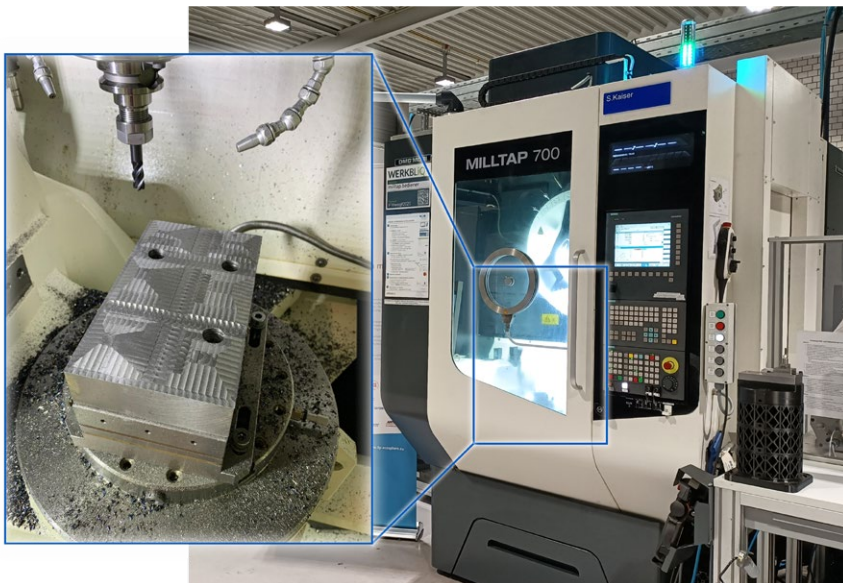


Bild 2
Versuchsaufbau an der MILLTAP700

Ein beispielhafter Störeffekt, der die Gültigkeit des ML-Modells einschränkt, ist eine Signaldrift über die Nutzungsphase der Maschine, was zu einer Reduzierung der Genauigkeit der Kraftrekonstruktion führt. Die Signaldrift kann durch Verschleiß der Lagerungen und Führungsflächen verursacht werden. Auch Extrapolation stellt ein Risiko für die Genauigkeit dar, wenn z. B. ein kinematischer Zustand der Werkzeugmaschine nicht in den Trainingsdaten abgebildet wurde. Aus diesem Grund wurde am IFW ein ML-Modell entwickelt, das neben den rekonstruierten Kräften auch einen Wert zur Schätzung der Unsicherheit ausgibt.

Die Unsicherheit von künstlichen neuronalen Netzen bestimmen

Um die Unsicherheit von künstlichen neuronalen Netzen zu bestimmen, existieren verschiedene etablierte Ansätze. Einen grundlegenden Ansatz stellen Bayesian Neural Networks dar. Diese bilden die Unsicherheit direkt im Netz in Form von Wahrscheinlichkeitsverteilungen ab. Jedoch ist das Training solcher Netze deutlich aufwendiger verglichen mit anderen Netzarchitekturen. Aus diesem Grund kommen sie in der Praxis kaum zum Einsatz. Eine einfachere Methode ist der Ensemble-Ansatz [2]. Dazu werden zunächst mithilfe eines Trainingsdatensatzes die Hyperparameter eines KNNs optimiert. Stehen Netzarchitektur und Hyperparameter fest, werden mehrere Instanzen des Netzes parallel trainiert (Bild 1).

Die einzelnen Instanzen unterscheiden sich dabei lediglich in den initialen Gewichtsvektoren zum Start des Trainings. Das Ergebnis ist ein Ensemble von künstlichen neuronalen Netzen. Das Ensemble kann anschließend parallel ausgeführt werden. Anstatt einer einzelnen Vorhersage liefert es eine Verteilung an Vorhersagen. Als Vorhersagewert wird der Mittelwert aller Vorhersagen des Ensembles gewählt. Die Unsicherheit ergibt sich hingegen aus der Standardabweichung bzw. der Varianz der Vorhersagen. Je größer die Varianz innerhalb des Ensembles, desto größer ist schließlich auch die Unsicherheit der Vorhersage.

Im Folgenden wird die Ensemble-Methode für die Kraftrekonstruktion beschrieben. Dazu werden zunächst die Grundlegenden Schritte der Datenakquise, -vorverarbeitung und dem Modelltraining erläutert. Anschließend wird die Ensemble Methode näher erläutert und ausgewertet.

- [1] Denkena, B., Bergmann, B., Stoppel, D. (2020). Reconstruction of process forces in a five-axis milling center with a LSTM neural network in comparison to a model-based approach. *Journal of manufacturing and materials processing*, 4(3), 62.
- [2] Lakshminarayanan, B., Pritzel, A., Blundell, C. (2017). Simple and scalable predictive uncertainty estimation using deep ensembles. *Advances in neural information processing systems*, 30.

Aufnahme der Trainingsdaten

Im Rahmen der Datenakquise wurden zunächst verschiedene Zerspanprozesse an der 5-Achs-Fräsmaschine MILLTAP700 von DMG Mori durchgeführt. Bei den Prozessen wurden verschiedene Werkstücke aus Stahl (AISI 1045) und Aluminium (A7075 T6) bearbeitet. Dazu wurden insgesamt 5 verschiedene Werkzeuge mit Durchmessern von 6, 8 und 10 mm verwendet. Zusätzlich wurden Schnitttiefe und -breite, Spindeldrehzahl sowie Vorschubgeschwindigkeit variiert. Darüber hinaus wurden bei den Prozessen unterschiedliche Vorschubrichtungen berücksichtigt und zwischen geraden und kreis- bzw. bogenförmigen Achsbewegungen variiert. Für die Datenaufnahme wurden die Steuerungssignale der Maschine aufgezeichnet. Zusätzlich wurden die Kräfte mit einem Kistler Dynamometer 9772B werkstückseitig aufgezeichnet (Bild 2).

Insgesamt wurden so 186 Prozesse aufgezeichnet. Davon wurden 161 Prozesse für das Training der ML-Ansätze und 25 Prozesse für die Testmenge verwendet. Für die Anpassung der Hyperparameter wurde jeweils 5-fache Kreuzvalidierung genutzt. Die Modell-Eingänge liegen als Vektor vor und werden durch die normierten Antriebssignale für x-, y-, z-Achse sowie die Spindel gebildet.

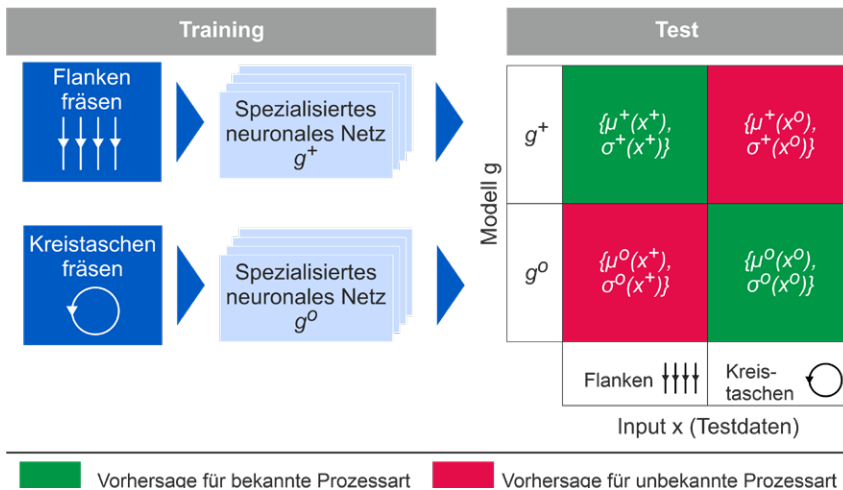


Bild 3
Vorgehen zur Bewertung der Ensemble Methode

Unsicherheitsvorhersage für die Kraftrekonstruktion

Für die prozessparallele Kraftrekonstruktion wird im Anschluss an die Datenvorverarbeitung ein 1D-Faltungsnetzwerk (Temporal Convolutional Network, TCN) mit den Trainingsdaten ausgelegt. Die Trainingsdaten umfassen Zeitreihen variabler Länge, mit jeweils 15 Eingangsgrößen je Zeitschritt und die gemessenen Kräfte in den drei Raumrichtungen als Ausgangsgrößen. Nach abgeschlossener Hyperparameteroptimierung werden 30 Instanzen des Netzes trainiert, vgl. Bild 1. Um die Ergebnisse im Nachhinein zu überprüfen, wird dieser Schritt zweimal mit unterschiedlichen Teil-Datensätzen aus den Trainingsdaten durchgeführt, wie in Bild 3 veranschaulicht ist.

Im ersten Fall enthält der Trainingsdatensatz nur Flankenfräsprozesse, bei denen der Vorschub konstant ist und die Bewegungsrichtung nicht geändert wird. Im zweiten Fall enthält der Datensatz ausschließlich Prozesse, bei denen Kreistaschen gefräst werden. Fall 1 enthält keine Prozesse mit Beschleunigung, Fall 2 enthält keine Prozesse ohne Beschleunigung. Mit den Datensätzen werden somit jeweils spezialisierte KNN trainiert, die bestimmte Maschinenzustände nicht erlernen konnten. Für beide spezialisierten Ensemble Modelle können Mittelwert und Standardabweichung bestimmt werden. Abschließend

wird für die Ensemble geprüft, wie gut diese die Kräfte bei zuvor ungesesehenen Flankenfräsprozessen und Kreistaschen rekonstruieren können. Zudem wird überprüft, ob die Standardabweichung zur Prognose der Unsicherheit genutzt werden kann.

In Bild 4 ist die Vorhersage der KNN-Ensembles am Beispiel eines Flankenfräsprozesses zu sehen. Qualitativ lässt sich anhand des Zeitverlaufs bestätigen, dass nur das auf Flankenfräsprozesse spezialisierte Netz in der Lage ist, den gemessenen Kraftverlauf zu rekonstruieren (Bild 4 a & c). Das auf Kreistaschen spezialisierte Netz (Bild 4 b & d) gibt hingegen Werte aus, die um Null schwanken. Bereits an den einzelnen Netzen des Ensembles sind

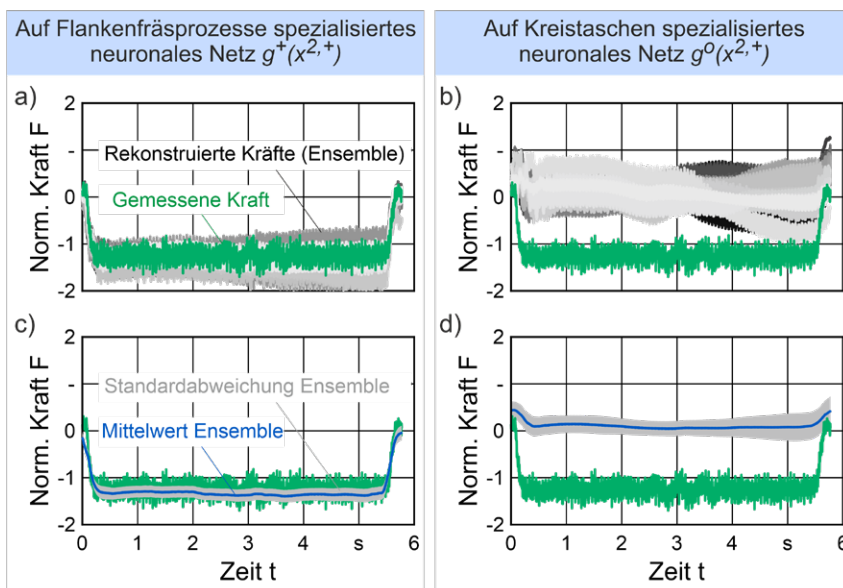


Bild 4
Vorhersage der KNN-Ensemble am Beispiel eines Flankenfräsprozesses:
 a) KNN-Ensemble $g^+(x^2,+)$
 b) KNN-Ensemble $g^o(x^2,+)$
 c) Standardabweichung des KNN-Ensembles $g^+(x^2,+)$
 d) Standardabweichung des KNN-Ensembles $g^o(x^2,+)$

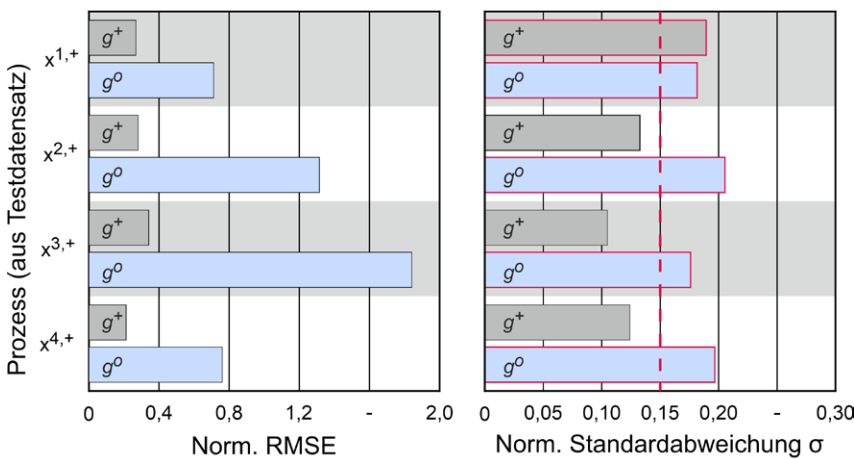


Bild 5
Auswertung von Fehlern und der Standardabweichung der Ensemble-Methode

größere Abweichungen voneinander zu erkennen, verglichen mit dem Ensemble in Bild 4 a. Dies spiegelt sich auch in der Standardabweichung der Ensemble-Verteilung wider, die in Bild 4 c und d für jeden Zeitpunkt zusammen mit dem Mittelwert aufgetragen ist.

Um die KNN-Ensemble quantitativ zu bewerten, werden Standardfehler (normierter RMSE) und Standardabweichung des Ensembles über die gesamte Zeitreihe bewertet. Die Ergebnisse des Testdatensatzes sind in Bild 5 auszugswise für Flankenfräsprozesse dargestellt. Das KNN-Ensemble g⁺, welches auf Flankenfräsprozesse spezialisiert ist, erreicht für alle Flankenfräsprozesse einen RMSE unter 40 N. Auf dem gleichen Datensatz hat das auf Kreistaschen spezialisierte KNN-Ensemble g⁰ stets einen mehr als doppelt so hohen Fehler > 80 N. Dies bestätigt die Hypothese, dass ein KNN bzw. KNN-Ensemble nicht in der Lage ist, die Prozesskräfte für unbekannte Prozessarten zu rekonstruieren.

Wird zusätzlich die Standardabweichung der KNN-Ensemble betrachtet, wird deutlich, dass ein hoher Fehler bei der Kraftrekonstruktion immer mit einer hohen Standardabweichung des Ensembles einhergeht ($\sigma > 0,15$). Umgekehrt ist bei einem geringen Fehler der Kraftrekonstruktion die Unsicherheit in der Mehrzahl der Fälle gering bewertet ($\sigma < 0,15$). Eine Ausnahme stellt der erste Flankenfräsprozess des Testdatensatzes (x^{1,+}) dar. Der Fehler des auf Flanken spezialisierten Ensembles beträgt hier 30,8 N (normiert 0,27) und ist somit als gering zu bewerten. Die Standardabweichung beträgt hingegen 0,19 und ist im Vergleich zu den anderen Prozessen als hoch zu bewerten.

Eine hohe Unsicherheit führt folglich nicht zwingend zu einem hohen Fehler, ist aber mehrheitlich ein Indikator dafür, dass der Fehler höher ist als bei den zuvor erlernten Prozessen. Der Gültigkeitsbereich der Kraftrekonstruktion wurde in diesen Fällen verlassen. Eine geringe Unsicherheit ist basierend auf dem verwendeten Testdatensatz ein eindeutiger Indikator dafür, dass der Fehler innerhalb der vom ML-Modell gegebenen Grenzen (< 40 N) liegt und der Gültigkeitsbereich der Kraftrekonstruktion nicht verlassen wurde.

Diskussion und Fazit

Mit einem Ensemble neuronaler Netze lässt sich die Unsicherheit der antriebssignalbasierten Kraftrekonstruktion bestimmen. Die Auswertung der Testdaten hat gezeigt, dass ein überdurchschnittlich hoher Fehler bei der Kraftrekonstruktion mittels KNN-Ensemble zu einer überdurchschnittlich hohen Unsicherheit des KNN-Ensembles führt. Dieser Zusammenhang ermöglicht die Überwachung der Kraftrekonstruktion. Wird der Gültigkeitsbereich des ML-Modells verlassen, kann dies durch eine Grenzwertkontrolle der Standardabweichung des KNN-Ensembles detektiert werden. Die Untersuchungen zeigen, dass dies der Fall ist, wenn z. B. Prozessarten beim Trainieren des ML-Modells

nicht berücksichtigt worden sind. Für eine Umsetzung der Kraftrekonstruktion ist es aus diesem Grund wichtig, bereits in den Trainingsdaten alle Achsbewegungen abzubilden. Doch auch bei umfangreichen Trainingsdaten kann es durch Verschleiß von Führungen oder Antrieben zu Änderungen in dem zugrundeliegenden Übertragungsverhalten kommen, die nicht von dem ML-Modell abgebildet werden. Die Überwachung der Unsicherheit kann in diesem Fall dazu genutzt werden, das Modell rechtzeitig nachzutrainieren.

Insgesamt ist die Bestimmung der Unsicherheit des KNN ein grundlegender Baustein für den Einsatz der Kraftrekonstruktion anhand von Daten der Maschinenachsen in der Praxis.

Autoren

Prof. Dr.-Ing. Berend Denkena
Leiter des Instituts für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW) der Leibniz Universität Hannover

Henning Buhl
Leiter des Bereiches Maschinen und Steuerungen am IFW

Dennis Stoppel
Wissenschaftlicher Mitarbeiter am IFW

Impressum

Schriftenreihe des Mittelstand-Digital Zentrums Hannover
Zukunft.Digital – Digitalisierung von der Idee zur Umsetzung
Ausgabe 02/2024

Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen
der Leibniz Universität Hannover
An der Universität 2, 30823 Garbsen

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Berend Denkena
Redaktion: Gerold Kuiper
Satz und Layout: Sofie Bauer

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind online unter <https://www.dnb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, auch das des Nachdruckes, der Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung des vollständigen Werkes oder von Teilen davon, sind vorbehalten.

© TEWISS – Technik und Wissen GmbH, Dezember 2024
An der Universität 2, 30823 Garbsen
Telefon: 0511 762 19434. Mail: info@tewiss-verlag.de
www.tewiss-verlag.de

Konsortialführung
des Mittelstand-Digital Zentrums Hannover:



Bildnachweis

- Titel, Seite 08: hrui/stock.adobe.com
- Seite 05, 30-37, Rückseite rechts mit-
tig: Institut für Fertigungstechnik und
Werkzeugmaschinen (IFW)/Leibniz
Universität Hannover
- Seite 06, 07, 29: Mittelstand-Digital
Zentrum Hannover
- Seite 10, Rückseite rechts unten:
Como una Reina/pixabay.com
- Seite 13: IPH - Institut für Integrierte
Produktion Hannover gGmbH
- Seite 14: INVENT GmbH
- Seite 16-19: Institut für Werkzeugma-
schinen und Fertigungstechnik (IWF)/
TU Braunschweig
- Seite 20, Rückseite rechts oben:
NVB Stocker/stock.adobe.com
- Seite 21: markobe/stock.adobe.com
- Seite 22-25, Rückseite links:
H&T Presspart GmbH & Co. KG
- Seite 26: KI-generiert (Adobe Firefly)
- Seite 27: JoyImage/stock.adobe.com

ISSN der Reihe Zukunft-Digital (online)
2944-7674

ISBN dieser digitalen Ausgabe
978-3-69030-005-6



Zukunft.Digital online
digitalzentrum-hannover.de/downloads



Mittelstand-Digital
**Zentrum
Hannover**