

Effizientes Datenmanagement zur Klassifizierung elektrischer Signale in der Funkenerosion

S. Lezama, E. Uhlmann, IWF, TU Berlin

Abstract

The integration of Artificial Intelligence (AI) into manufacturing processes offers significant potential for efficiency improvements, particularly in small and medium-sized enterprises (SMEs). The ProKI-Berlin project, as part of the nationwide ProKI network, facilitates the adoption of AI-driven methods in production technology by providing practical applications, training programs, and interdisciplinary research. This paper presents a novel methodology for real-time process monitoring and optimization in electrical discharge machining (EDM) using graphite electrodes. By leveraging real-time signal classification techniques, process anomalies can be detected early, enabling adaptive control and enhanced machining precision. The approach not only improves the understanding of discharge phenomena but also contributes to the development of sustainable and resource-efficient manufacturing solutions. The findings demonstrate the potential of AI in optimizing EDM processes and highlight broader implications for intelligent production systems.

1. Einleitung

Das Transferprojekt ProKI-Berlin ist Teil des deutschlandweiten ProKI-Netzwerks und hat das Ziel, Künstliche Intelligenz (KI) in der Produktionstechnologie zu etablieren. Es unterstützt insbesondere kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) bei der Einführung von KI-unterstützten Methoden im Bereich der Produktionstechnik. Ein zentraler Forschungsbereich ist die Prozessüberwachung und -optimierung mittels KI im Bereich der trennenden und abtragenden Fertigungstechnologien. Ein wesentliches Ziel von ProKI ist die Entwicklung und Demonstration von KI-Anwendungen in der Produktion, um den Technologietransfer in die industrielle Praxis zu beschleunigen. Insbesondere kleine und mittelständische Unternehmen sollen bei der Implementierung von KI-Technologien unterstützt werden, indem praxisnahe Anwendungsfälle bereitgestellt und Schulungsangebote entwickelt werden. Ein zentraler Fokus liegt zudem auf der Verbesserung der Prozessüberwachung und -optimierung durch den Einsatz intelligenter Algorithmen, die eine präzisere Steuerung und Kontrolle industrieller Fertigungsprozesse ermöglichen. Darüber hinaus werden nachhaltige Lösungen für industrielle Anwendungen angestrebt, um langfristig eine ressourcenschonende und effiziente Produktion zu gewährleisten.

Dabei verfolgt ProKI-Berlin einen interdisziplinären Ansatz, indem es verschiedene Forschungsbereiche wie Maschinenbau, Automatisierungstechnik und Datenwissenschaft miteinander verbindet. Ein wesentlicher Bestandteil der Arbeit von ProKI-Berlin ist der Technologie- und Wissenstransfer, der durch die Entwicklung von Demonstratoren sowie gezielte Schulungsangebote speziell für kleine und mittelständische Unternehmen gefördert wird.

Darüber hinaus konzentriert sich das Vorhaben auf praxisnahe Anwendungen. Dabei werden industrierelevante Anwendungsfälle identifiziert und umgesetzt, um den Mehrwert von KI-Technologien in realen Produktionsumgebungen zu demonstrieren. Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf dem Datenmanagement und der Integration von KI-Methoden, wofür Modelle zur Echtzeitanalyse von Produktionsprozessen entwickelt werden. Diese sollen die Effizienz der Fertigung steigern und neue Optimierungsmöglichkeiten aufzeigen. Ein Beispiel der Anwendung von KI-Methoden liegt hierbei auf abtragenden Fertigungsverfahren, wie beispielsweise der Funkenerosion.

Die Funkenerosion (engl. EDM) wird häufig in der Werkzeug- und Formenbauindustrie eingesetzt, da sie die Bearbeitung elektrisch leitfähiger Werkstoffe unabhängig von ihrer Härte ermöglicht. Beim Senkerodieren (engl. S-EDM) gehören Graphit und Kupfer zu den am häufigsten verwendeten Elektrodenwerkstoffen. Graphit wird überwiegend für Schruppprozesse genutzt, während Kupfer bei der Feinbearbeitung bevorzugt wird. Vorherige Untersuchungen zeigen jedoch, dass Graphit sich besonders für Werkzeugelektroden eignet, da es die Herstellung gratfreier Strukturen in kurzen Prozesszeiten bei gleichzeitig hoher Abtragrate \dot{V}_w im Funkenerosionsprozess ermöglicht. Graphitelektroden sind darüber hinaus eine kostengünstige Alternative zu Elektrolytkupferelektroden, weisen jedoch in der Regel einen erhöhten Elektrodenverschleiß ϑ auf [1,2]. Darüber hinaus zeigten erste Forschungsarbeiten, dass der Elektrodenverschleiß ϑ von Graphitelektroden mit optimierten Prozessparametersätzen für Finishing-Prozesse erfolgreich reduziert werden kann [3].

Ein Anwendungsfall innerhalb von ProKI-Berlin ist die Echtzeitüberwachung des funkenerosiven Finishing-Prozesses mit Graphitelektroden. Die vorliegende Methodik ermöglicht ein verbessertes Verständnis über die Zusammenhänge zwischen Prozessparametern, Entladungsphänomenen und Prozessergebnisse. Darüber hinaus legt sie die Grundlagen zur Anwendung von KI-Methoden zur möglichen Optimierung des Prozesses durch die Steuerung der entstandenen elektrischen Entladungen mithilfe der dazugehörigen Prozessparameter. Durch den Einsatz von Signalklassifizierungstools werden die Prozesssignale des funkenerosiven Prozesses in Echtzeit klassifiziert, um Prozessabweichungen frühzeitig zu erkennen. Darüber hinaus ermöglicht eine Offline-Klassifizierung den Einsatz von KI-Methoden um Rückschlüsse auf Prozessparameterabhängigkeiten und Prozessergebnisse zu ziehen.

In diesem Beitrag wird die im Rahmen von ProKI-Berlin entwickelte Methodik zum effizientem Datenmanagement zur Klassifizierung elektrischer Signale erläutert. Darüber hinaus wird sie mithilfe eines Anwendungsfalls im Bereich der senkerosiven Bearbeitung mittels Graphitelektroden demonstriert.

2 Datenmanagement zur Signalklassifizierung

In bereits etablierten Methoden zur Auswertung des funkenerosiven Prozesses werden zum Stand der Technik vornehmlich Prozesssignale auf Basis der Spannung U und des Stroms I analysiert. Dabei liegt der Fokus auf der Erkennung von elektrischen Entladungsarten. Diese Methoden liefern qualitative Erkenntnisse über derartige Entladungserscheinungen und ermöglichen deren Klassifizierung in abtragswirksame Entladungen und entartete Entladungen, wie Kurzschlüsse, Lichtbögen und Leerläufe.

UHLMANN ET AL. [4] behandelten numerische Methoden zur Echtzeit-Überwachung des funkenerosiven Fertigungsprozesses. Dabei werden Entladeenergien E_e , Entladungsarten und Entladedauern t_e erfasst, um eine präzisere Prozesskontrolle zu ermöglichen. Dies erlaubt eine effizientere Bearbeitung ohne Qualitätseinbußen, eine Standzeitverlängerung sowie eine verbesserte Qualitätssicherung bereits während der Fertigung von Bauteilen und Geometrien. Zudem können lokale thermische Verformungen des Werkzeugs vermieden und erhebliche Kosteneinsparungen durch eine optimierte Bearbeitungsdauer t_{ero} und Standzeit t_s erzielt werden. Die Analyse der Entladeparameter trägt zur Reproduzierbarkeit der Bearbeitungsbedingungen und zur gleichmäßigen Qualität der gefertigten Geometrien bei. Dabei wird die Entladeenergie E_e aus der Spannung U , dem Strom I und der Entladedauer t_e berechnet. Die Entladeenergie E_e beeinflusst zudem die Abtragrate \dot{V}_w , den Elektrodenverschleiß ϑ und die Oberflächenrauheit.

Physikalische Prozesse wie Bremsstrahlung und Wärmebildung bestimmen dabei ihre Verteilung. Aufgrund der zufälligen Natur der Funkenerosion variieren Messergebnisse, wobei der Energieeintrag in das Werkstück (EWS) zwischen 1,0 % und 65,5 % liegen kann. Die Analyse von Spannung U und Strom I bleibt jedoch eine bewährte Methode zur Prozessanalyse. Abbildung 1 fasst die implementierte Vorgehensweise zur Prozessanalyse im vorgestellten Anwendungsfall zusammen.

Die effiziente Verarbeitung großer Datenmengen bei der Signalanalyse erfordert fortschrittliche Methoden des Multiprocessing, um eine Echtzeit-Klassifizierung zu ermöglichen. Im Vergleich zum Multithreading, bei dem mehrere Threads auf einem einzelnen Prozessorkern laufen, erlaubt Multiprocessing die gleichzeitige Nutzung mehrerer Kerne und ist daher für rechenintensive Anwendungen besser geeignet. Um ein effektives Datenmanagement zu gewährleisten, wird die Kommunikation zwischen Haupt- und Subprozessen über prozesssichere Warteschlangen realisiert, die das First-In-First-Out (FIFO)-Prinzip nutzen [4]. Das Producer-Consumer-Schema stellt eine etablierte Methode zur Prozesssynchronisation dar und wird je nach Art der Datenquelle unterschiedlich implementiert:

- Online-Daten, wie beispielsweise Signale aus einem Oszilloskop, werden in Echtzeit verarbeitet. Ein einzelner Producer-Thread überträgt die Strom- und Spannungssignale aus dem Oszilloskop-Puffer in eine gemeinsam genutzte Warteschlange. Mehrere Consumer-Prozesse klassifizieren die Daten parallel. Dabei müssen kritische Signale erkannt und korrekt segmentiert werden, um Informationsverluste zu vermeiden.
- Offline-Daten, wie gespeicherte Messdaten, werden durch mehrere Multiprocessing-Erzeugerprozesse aus Dateien geladen, verarbeitet und klassifiziert, während ein einzelner Consumer-Thread die grafische Darstellung übernimmt. Da die Signale bereits in vektorieller Form vorliegen, können einzelne Entladungsereignisse verloren gehen, was jedoch aufgrund der hohen Entladefrequenzen als vernachlässigbar gilt.

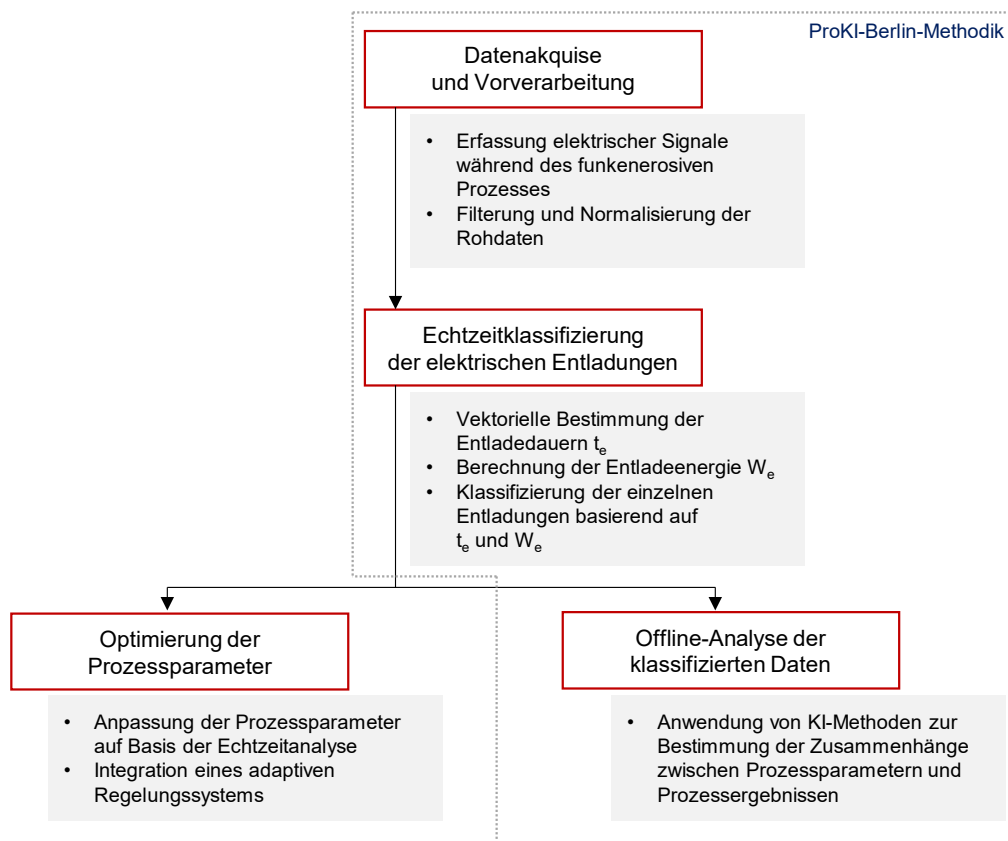


Abbildung 1: In ProKI-Berlin eingesetzte Vorgehensweise (Use-Case: Senkerosion mit Graphitelektroden)

Die Laufzeitanalyse zeigt die Effizienzsteigerung durch optimierte Algorithmen. Während ein iterativer Algorithmus mit Schleifeniterationen eine Analysezeit t_a von mehr als vier Stunden benötigte, reduzierte eine vektorielle Methode die Berechnung auf wenige Sekunden, was einer Verbesserung von über 2.000 % entspricht. Dies wird durch den vollständigen Verzicht auf rechenintensive Iterationen und eine optimierte Datenverarbeitung erreicht [4].

Durch die Kombination von Multiprocessing, effizienter Speicherverwaltung und vektoriieller Datenanalyse kann eine hochleistungsfähige Echtzeit-Klassifizierung erreicht werden. Diese Softwarelösung bietet eine flexible Alternative zu hardwarebasierten Ansätzen, wie beispielsweise mit Field-Programmable Gate Arrays (FPGAs), und erlaubt eine skalierbare, anpassbare Verarbeitung der Signaldaten. Zudem ermöglicht sie eine weitere Erhöhung der Abtastrate f_s , ohne die Echtzeitfähigkeit zu beeinträchtigen [4].

3 Senkerosion mittels Graphitelektroden

Das Ziel der vorliegenden Arbeit liegt darin, die Methode aus Kapitel 2 anzuwenden, um den Einfluss von Materialeigenschaften und Prozessparametern auf die Abtragsrate \dot{V}_w , den relativen Werkzeugverschleiß ϑ und die Oberflächenrauheit beim Einsatz von Graphitelektroden in der Senkerosion zu untersuchen. Dabei werden mit der vorgestellten ProKI-Methodik Prozesssignale in abtragswirksame Entladungen, Lichtbögen und Kurzschlüsse klassifiziert.

Es werden zwei verschiedene Graphitsorten eingesetzt, sowohl Graphitelektroden des Typs HK-6 der Firma TOKAI CARBON CO. LTD., Tokyo, Japan, mit Korngröße von $D_g = 3 \mu\text{m}$ als auch Elektroden des Typs Ellor+25 der Firma MERSEN DEUTSCHLAND SUHL GMBH, Suhl, mit einer Korngröße von $D_g = 9 \mu\text{m}$. Die ausgewählten Graphitsorten wurden in vorliegenden Studien hinsichtlich Elektrodenverschleiß ϑ und erzeugter Oberflächenrauhigkeiten R_a als die mit Standardparametersätzen bestgeeigneten Sorten für die beschriebene Anwendung identifiziert [5]. Hierfür besitzen die Graphitelektroden Abmessungen 5 mm x 5 mm, um Kavitäten mit Senktiefen von $d_s = 0,5 \text{ mm}$ und niedrigen Oberflächenrauhigkeiten zu fertigen. Anschließend wurden optimale Prozessparameter zur Erzielung einer gewünschten Oberflächenrauheit von $R_a = 0,8 \mu\text{m}$, welche einer VDI3400 Stufe 18 entspricht, ermittelt und eingesetzt [5]. Die Senkerodierversuche wurden an einer Senkerodieranlage des Typs Genius 1000 der Firma ZIMMER & KREIM GMBH & CO. KG, Brensbach, durchgeführt. Insgesamt wurden 43 Parameterkombinationen je Graphitsorte untersucht.

Darüber hinaus wurden zusätzlich zu der in Kapitel 2 beschriebenen Methode eine Strommesszange des Typs TCP 303 der Firma TEKTRONIX, Beaverton, USA, ein Hochspannungstastkopf des Typs HV150 der Firma TESTEC ELEKTRONIK GMBH, Dreieich, sowie ein Oszilloskop des Typs PicoScope PS3406D der Firma PICO TECHNOLOGY, St. Neots, Großbritannien, zur Erfassung der Prozesssignale mit einer Abtastrate $f_s = 1 \text{ MHz}$ und deren spätere Analyse eingesetzt. Für die Analyse der Prozessergebnisse wurden ein Fokusvariationsmikroskop des Typs InfiniteFocus G4 der Firma ALICONA IMAGING GMBH, Raaba, Österreich, sowie ein taktiles Oberflächenmessgerät des Typs nanoscan 855 der Firma JENOPTIK AG, Jena, verwendet. Abbildung 2 zeigt hergestellte Kavitäten mit unterschiedlichen Prozessparameterkombinationen. Nur die Kavität in Abbildung 2a erweist jedoch die erwartete Formgenauigkeit GF. Die Kavität in Abbildung 2b zeigt eine unregelmäßige Oberfläche mit einer Senktiefe $d_s < 0,5 \text{ mm}$ an den Rändern.

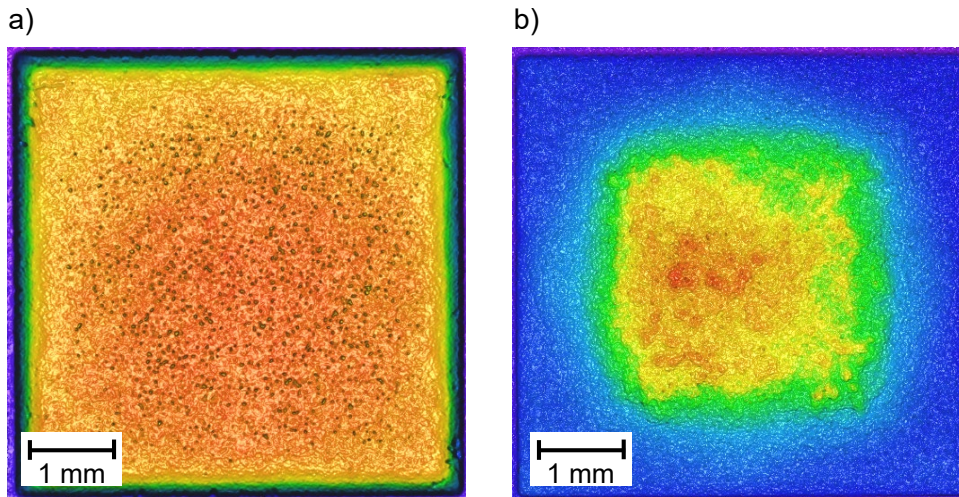


Abbildung 2: Hergestellte Kavitäten; a) gewünschte Geometrie, b) unerwünschte Geometrie

Für die Klassifizierung der Prozesssignale in abtragswirksame Entladungen, Lichtbögen und Kurzschlüsse wurden darüber hinaus die in Tabelle 1 gezeigten Schwellwerte verwendet, diese basieren auf den von UHLMANN ET AL. [6] bestimmten Schwellwerte und ermöglichen eine hochgenaue Eingruppierung der Entladungsarten. Dabei wurden die definierten Thresholds für die spezifische Materialkombination Graphit/Stahl mittels partitionierender Clusterverfahren anhand bereits verfügbarer Daten von anderen senkerosiven Versuchen mit gleicher Materialkombination bestimmt. Mithilfe dieser Daten konnten die Prozessparameter Leerlaufspannung U und Entladestrom I identifiziert werden, die einen bestimmten Prozesszustand hinsichtlich der Art der Funkenentladung verursachen.

Tabelle 1: Verwendete Schwellwerte für die Signalklassifizierung des senkerosiven Prozesses

Thresholds		Entladungsart
Leerlaufspannung U	Entladestrom I	
$U \geq 0,7 \times \hat{u}_i$	$I \geq i_{th}$	abtragswirksam
$0,2 \times \hat{u}_i \leq U < 0,7 \times \hat{u}_i$	$I \geq i_{th}$	Lichtbögen
$U < 0,2 \times \hat{u}_i$	$I \geq i_{th}$	Kurzschluss

Für die detaillierte Analyse der Signalklassifizierungsergebnisse wurden außerdem vier Prozessparameterkombinationen ausgewählt. Diese ermöglichen eine genauere Gegenüberstellung der effektiven Entladungen mit dem jeweiligen relativen Werkzeugverschleiß ϑ . Die verwendeten Prozessparameterkombinationen werden in Tabelle 2 gezeigt. Diese repräsentieren Prozessergebnisse mit einem erreichten relativen Werkzeugelektrodenverschleiß im Bereich von $10\% < \vartheta < 100\%$.

Tabelle 2: Analytierte Prozessparameterkombinationen

Parameter	Parameterkombination			
	A	B	C	D
Entladestrom i_e [A]	1,75	1,75	1,00	2,50
Entladedauer t_e [μ s]	47	20	32	32
Pausendauer t_0 [μ s]	20	20	32	32
Leerlaufspannung \hat{u}_i [V]	200	150	250	150
Prozessergebnis	Graphit HK-6			
Oberflächenrauheit R_a [μ m]	1,52	1,99	1,78	2,01
	Graphit Ellor+25			
	1,68	3,19	2,86	4,91

Die Analyse von Prozesssignalen mit den in Tabelle 2 dargestellten Prozessparametern zeigt, dass eine höhere Anzahl von effektiven Entladungen $N_{rel,eff}$ mit einem geringeren relativen Werkzeugelektrodenverschleiß ϑ korreliert. Diese Ergebnisse legen außerdem nahe, dass niedrige Entladeenergien E_e zu stabileren Bearbeitungsbedingungen führen, was eine genauere Bearbeitung ermöglicht und unerwünschte Geometrien mit geringer Formgenauigkeit G_F vermeidet, siehe Abbildung 2b.

Abbildung 3 und Abbildung 4 zeigen die Signalklassifizierungsergebnisse und den jeweiligen Werkzeugelektrodenverschleiß ϑ . Allerdings zeigen diese, dass nicht nur die verwendeten Prozessparameter einen möglichen Einfluss auf die Prozessstabilität haben, sondern auch die Materialeigenschaften der Elektroden, wie beispielsweise die Korngröße D_g .

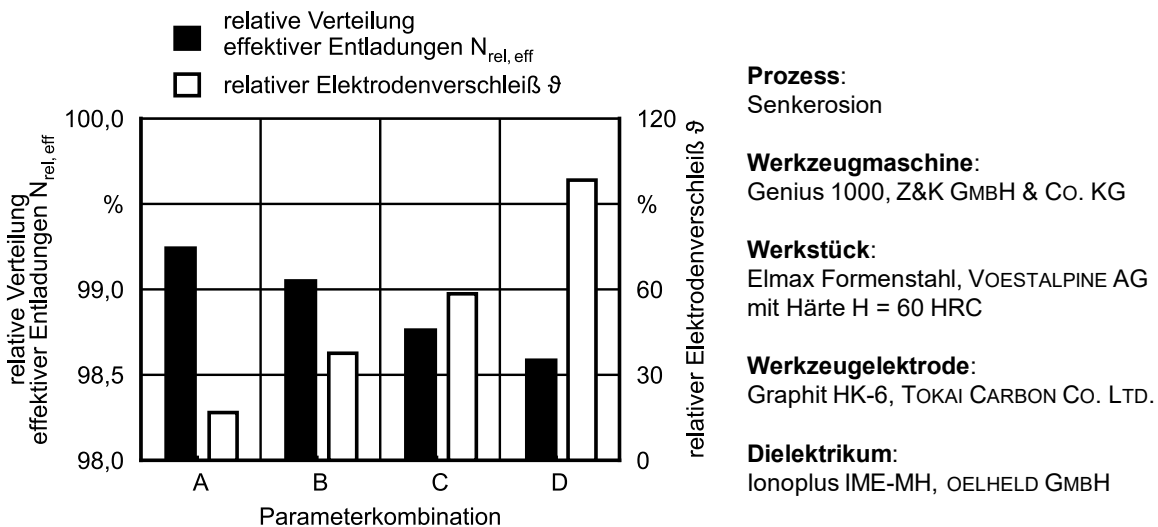


Abbildung 3: Ergebnisse der Signalklassifizierung für die Graphitsorte HK-6

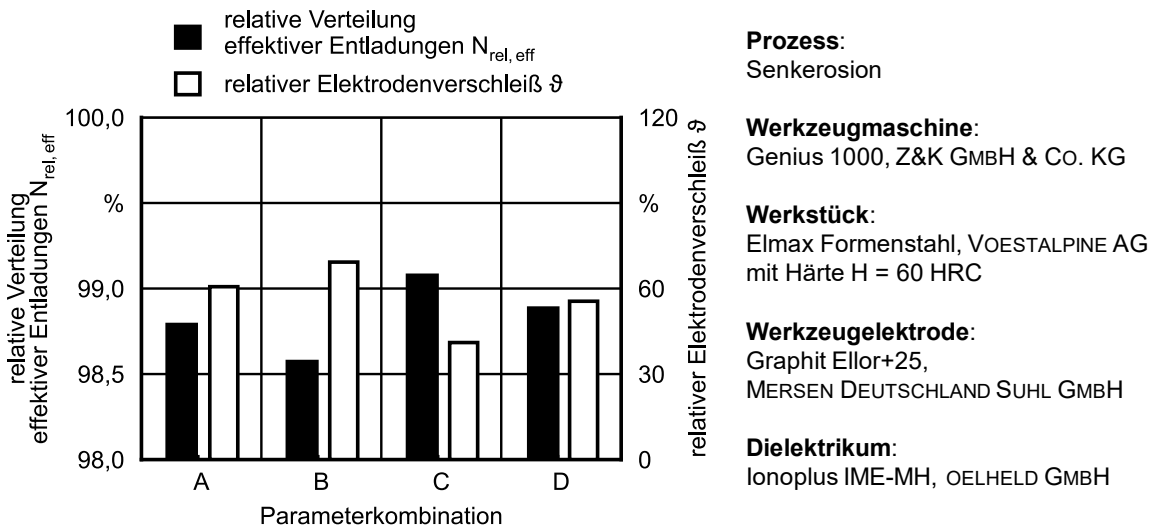


Abbildung 4: Ergebnisse der Signalklassifizierung für die Graphitsorte Ellor+25

Um weitere Zusammenhänge zwischen Prozessparametern und Prozessergebnissen zu bestimmen, wurde eine Offline-Analyse der verfügbaren Daten, wie beschrieben in Abbildung 1, durchgeführt. Dabei wurden alle Prozessparameter und Prozessergebnisse berücksichtigt, indem eine Random-Forest-Methode implementiert wurde. Im Rahmen der Implementierung dieser Methode konnte festgestellt werden, dass ein Modell zur Vorhersage der Prozessergebnisse erfolgreich erstellt werden kann, insbesondere zur Vorhersage der Abtragrate \dot{V}_w und des Elektrodenverschleißes ϑ . Die

Leistung des Modells erwiesen durch die Determinationskoeffizienten R^2 konnte mit $R^2_{MRR} = 0,958$ und $R^2_{TWR} = 0,961$ für jeweils die Vorhersage der Abtragrates \dot{V}_w und des Elektrodenverschleißes ϑ festgestellt werden. Abbildung 5 zeigt die sogenannten Feature Importances der einzelnen Prozessparameter. Diese zeigen an, welche Prozessparameter den größten Einfluss auf die Modellleistung hinsichtlich der Vorhersage haben.

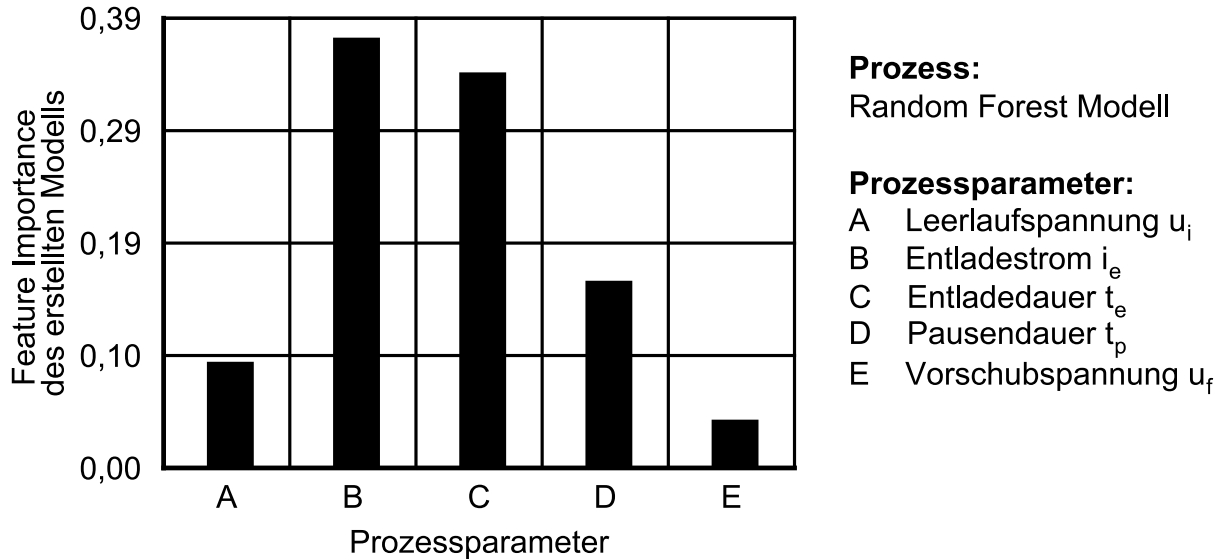


Abbildung 5: Feature Importances des erstellten Vorhersagemodells mittels Random-Forest-Methode

4 Zusammenfassung

Der vorliegende Beitrag untersucht die (Echtzeit-)Signalklassifizierung in der Funkenerosion am Beispiel eines Senkerosionsprozesses mittels Graphitelektroden zum besseren Verständnis des Einflusses von Prozessparametern auf die Fertigungsergebnisse. Durch Echtzeit-Datenverarbeitung konnten Prozessabweichungen frühzeitig erkannt werden, was perspektivisch eine adaptive Steuerung der Prozesskenngrößen ermöglicht.

Die Kombination aus Multiprocessing und vektoriiellen Berechnungen reduzierte die Signalanalysezeiten um über 2.000 %. Zudem zeigte ein Random-Forest-Modell hohe Vorhersagegenauigkeiten für Abtragrates \dot{V}_w ($R^2 = 0,958$) und Werkzeugverschleiß ϑ ($R^2 = 0,961$). Die Ergebnisse belegen zudem das Potenzial von KI, insbesondere für die Anwendung von bestehenden Prozessen mit neuartigen Materialkombinationen.

5 Förderhinweise

ProKI-Berlin wurde vom BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG (BMBF) im Rahmen des Programms „Zukunft der Wertschöpfung – Forschung zu Produktion, Dienstleistung und Arbeit“ (02P22A060) bis zum 31.12.2024 gefördert. Die Untersuchungen im Bereich der Senkerosion mittels Graphitelektroden werden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) – Projektnummer 496148524 gefördert.

Literaturverzeichnis

- [1] Bergs, T. Klocke, F. *Fertigungsverfahren 3*. Springer-Verlag, 2024.
- [2] Uhlmann, E., Kuche, Y., Polte, J., Polte, M. Manufacturing of graphite electrodes with high geometrical requirements. *Procedia 19th of the International Conference and Exhibition euspen, Bilbao, Spanien, 2019*.
- [3] Uhlmann, E., Polte, M., Hocke, T., Thißen, K., Bolz, R., Streckenbach, J. Analysis of various graphite types for electrical discharge finishing. *Procedia 23rd of the International Conference and Exhibition euspen, Kopenhagen, Dänemark, 2023*.
- [4] Uhlmann, E., Polte, M., Yabroudi, S., Thißen, K., Penske, W. Echtzeit-Energieüberwachung in der Funkenerosion, *wt Werkstatttechnik-online*, 113(07-08), S. 304-310, 2023.
- [5] Uhlmann, E., Polte, M., Lezama, S., Thißen, K. Investigation on reduction of tool wear in electrical discharge finishing processes with graphite tool electrodes. *Procedia ASPE 2024 Annual Meeting, Houston, USA, S. 340-343, 2024*.
- [6] Uhlmann, E., Polte, M., Yabroudi, S., Gerhard, N., Sakharova, E., Thißen, K., Penske, W. Helical electrodes for electro-discharge drilling experimental and CFD based analysis of the influence of internal and external flushing geometries on the process characteristics. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 7(6), 217, 2023.