

Hybridmodelle zur effizienten Regelung, Optimierung und Überwachung von thermo-chemischen Prozessen und Anlagen am Beispiel der oszillierenden Verbrennung

T. Freudenmann^{1*}, H.-J. Gehrman², M. El-Haji¹, D. Stapf²

* freudenmann@edi.gmbh

¹ EDI GmbH – Engineering Data Intelligence, *Wöschbacher Str. 73, 76327 Pfinztal-Berghausen, Deutschland*

² *Institut für Technische Chemie, Karlsruher Institut für Technologie, Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen, Deutschland*

Abstract

Vor dem Hintergrund einer ständig wachsenden Zahl an Informationen aus Sensorik und Messsystemen und dem Zwang zur Kostenreduktion spielen intelligente Auswerte- und Optimierungswerkzeuge eine immer bedeutendere Rolle.

Viele prozesstechnische Zusammenhänge können heutzutage aufgrund der theoretischen Grundlagen des Prozesses in numerischen Modellen dargestellt werden. Allerdings zeigt sich dabei immer wieder, dass zur Feinjustierung von Anlagen und Komponenten die jahrelange Erfahrung von Experten in Kombination mit tatsächlich online gemessenen relevanten Kenngrößen ein wesentlicher Bestandteil ist.

In diesem Beitrag wird deshalb ein Vorgehen und ein IT-Produkt beschrieben, dass eine Kombination aus numerischen Modellen, Expertenwissen und datenbasierten Modellen durch sogenannte Hybridmodelle ermöglicht, wodurch eine ganzheitliche Regelung, Optimierung und Überwachung von Prozessen und Anlagen dargestellt werden kann.

Gezeigt werden Vorgehen und Arbeitsweise des IT-Produkts am Beispiel einer Kraftwerkspilotbrennkammer am Institut für Technische Chemie des KIT, bei der durch ein Hybridmodell eine geführte oszillierende Verbrennung zur Reduktion von NO_x ermöglicht wird.

Mit dem cloud-basierten EDI hive Framework kann sowohl der Prozess des Erfassens des Expertenwissens als auch die Integration der verfahrenstechnischen Grundlagen, die KI-basierte Modellbildung und die später Anwendung des Hybridmodells im Kraftwerksbetrieb dargestellt werden. In dem Beitrag werden zunächst die Vorteile von Hybridmodellen in der industriellen Anwendung diskutiert. Des Weiteren werden die experimentellen Ergebnisse zusammen mit den Modellierungsergebnissen vorgestellt und aufgezeigt, wie EDI hive diesen Prozess softwaretechnisch durchgängig unterstützt.

Vorgehen und Methodik

Zunächst werden der modelltechnische Hintergrund, der Aufbau der Logik und die Anwendung auf den Verbrennungsprozess beschrieben. In diesem Zusammenhang wird die Pilotanlage kurz erläutert sowie das Versuchsprogramm dargestellt.

Hybridmodell

Die Künstliche Intelligenz (KI)-basierten Algorithmen werden in einem Hybridmodell durch formalisiertes Expertenwissen kalibriert und ermöglichen somit auch bei geringer Datenbasis robuste und technisch aussagekräftige Vorhersagen zur optimalen Steuerung eines Prozesses. Der Aufbau und die Möglichkeiten eines Hybridmodells sind in Abbildung 1 exemplarisch dargestellt.

Insbesondere können bei einem thermo-chemischen Prozess häufig nicht alle relevante Parameter zur Steuerung und Überwachung direkt gemessen und erfasst werden, wie z.B. lokal hohe Temperaturen

und Drücke oder Konzentrationen von instabilen Zwischenprodukten. Häufig sind prinzipiell messbare Daten bauartbedingt messtechnisch nicht zugänglich.

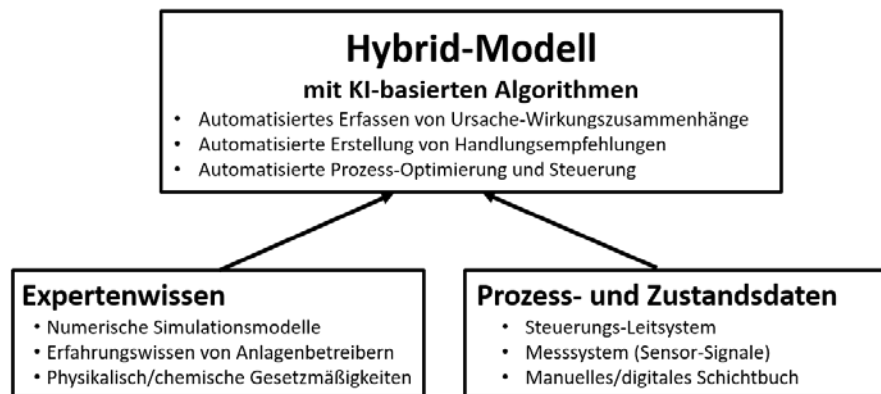


Abbildung 1. Hybrid-Modell

Demgegenüber können relevante Zustandsdaten aus einfachen messbaren Parametern mittels validen Simulationsmodellen oder auch basierend auf Expertenwissen berechnet bzw. vorhergesagt werden. Die Erfassung von solchen Arten von Parametern kann als Softsensor bezeichnet werden und unterstützt die KI-Algorithmen, die dann mit einer größeren und technisch aussagekräftigeren Datenbasis trainiert und für die Vorhersage kalibriert werden können [1], [2].

Des Weiteren liegen häufig die relevanten Prozess- und Zustandsdaten einer Anlage in heterogener Form vor; d.h. z. B. in unterschiedlichen Dimensionen, Formaten und teilweise in nicht zeitsynchronen Datenbanken. Teilweise stehen sogar wichtige Prozess- und Zustandsdaten nur in manuell geführten Schichtbüchern zur Verfügung. Allerdings wird die durchgängige Erfassung und Nutzung der Daten gerade auch in der Prozessindustrie als Schlüssel für zukünftige Wettbewerbsfähigkeit gesehen [3].

EDI hive Framework

Das EDI hive Framework ist ein Cloud-System und basiert auf modernster Microservices-Architektur, wodurch ein Orchestrieren von Ressourcen flexibel möglich ist. Somit können viele Nutzergruppen mit großen Datenmengen ohne Einschränkungen der Performance auf die Plattform mit unterschiedlichen Applikationen zugreifen, welche aus Datensicherheit als sogenannte private cloud on- oder off-premise betrieben werden kann [4]. Neben den üblichen Benutzer-, Rolle/Rechte- Messdaten-Management-Funktionen (z.B. *Aggregierte Messdaten*) usw. verfügt das EDI hive Framework über weitere generische Applikationen, die zur Optimierung und Steuerung von Prozessen eingesetzt werden können (siehe Abbildung 2). Insbesondere kann mit dem *EDI hive Wirkketten-Editor* das bereits existierende Expertenwissen formalisiert und für die Kalibrierung der KI-basierten Modelle genutzt werden [5]. Mit der *EDI hive Normnamen* Applikation können die System- und Systemgrößennamen im EDI hive bzgl. unterschiedlichen Sprachen aber auch spezifische häufig abgekürzte Namen von Steuerungs- und Messsystem-Kanalnamen semantisch vernetzt und in der jeweiligen gewünschten Sprache übersetzt werden.



Abbildung 2. – EDI hive Framework mit generischen Applikationen

Das EDI hive Framework kann direkt an Steuerungs- bzw. Leitsysteme von Maschinen bzw. Anlagen angebunden werden, wodurch das EDI hive Framework ebenfalls als eine sogenannte Internet of Things (IoT)-Plattform eingesetzt werden kann [6].

Im Folgenden werden der EDI hive Wirkketten-Editor sowie der EDI hive Modell-Generator näher beschrieben.

EDI hive Wirkketten-Editor

Aufgrund der nicht immer zugänglichen großen Datenbasis können relevante Zusammenhänge teilweise über bekannte physikalisch/chemische Gesetzmäßigkeiten hergeleitet und somit die vorhandene Datenbasis um weitere Parameter ähnlich der Ableitung von dimensionslosen Kennzahlen erweitert werden. Insbesondere soll das Wissen von erfahrenen Anlagenfahrern oder Wissenschaftlern mit spezifischen Kenntnissen bzgl. des Prozesses in sogenannten Wirkketten formal erfasst und für die Kalibrierung der KI-basierten Algorithmen genutzt werden können.

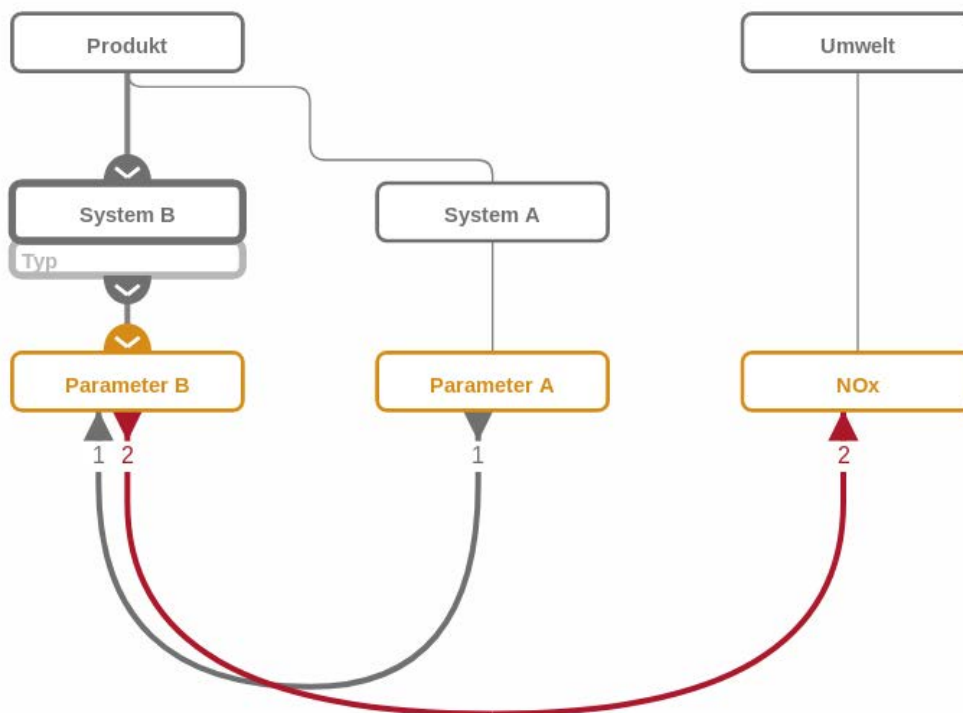


Abbildung 3. Beispiel für eine vereinfachte Wirkkette

Im Rahmen dieses Vorhabens kam eine patentierte Lösung von EDI zur Formalisierung von Expertenwissen zum Einsatz: Mittels des EDI hive Wirkketten-Editors wurde in Workshops mit den Experten der Pilotanlage BRENDA zum Thema Stickoxidminderung (NO_x) in Verbrennungsprozessen deren spezifisches Wissen gezielt geclustert und formal über die Wirkketten verknüpft. Damit kann das Expertenwissen rechnerverstärkt in semantisch vernetzten Kategorien erfasst werden, was eine wesentliche Voraussetzung für die sinnvolle Clusterung und Kalibrierung der KI-Algorithmen ist. Die ermittelten Wirkketten unterstützen eine geführte statistische Versuchsplanung, wodurch mit einem geringeren Versuchsaufwand die vermuteten Zusammenhänge zwischen den Parametern quantifiziert werden können. Abbildung 3 zeigt eine vereinfachte Wirkkette (englisch: Cause & Effect Chain), die einen Ursache-Wirkungs-Zusammenhang bzgl. der im Projekt relevanten Parametern, z.B. zur NO_x -Reduktion durch eine oszillierende Verbrennung repräsentieren kann.

In einer Wirkkette werden Systeme und deren Merkmale mit grauen Boxen und Systemgrößen (z.B. Parameter A) mit gelben Boxen dargestellt. Die Beziehungen zwischen den Systemen und den Systemgrößen werden mit einfachen Linien gekennzeichnet. Wie die Systemgrößen in Wechselwirkung stehen werden mit sogenannten Relationen dargestellt: die grauen Relationen geben relevanten Kontext wieder, die rote Relation steht im Fokus der Wirkkette und wird als Testrelation bezeichnet. Die Richtung des Pfeiles gibt an, ob eine Systemgröße eine Eingangsgröße (z.B. Parameter A, für die Kontextrelation) oder eine Ausgangsgröße (z.B. NO_x , für die Testrelation) ist.

Im späteren Anwendungsfall könnte Parameter B für die Oszillationsfrequenz stehen und die Systemgröße NO_x wäre die Zielgröße, die es in diesem Fall zu minimieren gilt und von der Oszillationsfrequenz abhängt. Weitere Systemgrößen können Steinkohlemassenstrom, Rauchgas-Temperatur sowie Förderluft zur Erzeugung des Dralls sein.

Ebenfalls können weitere physikalisch/chemische Gesetzmäßigkeiten oder relevante gesetzliche Vorgaben mit den jeweiligen Relationen hinterlegt werden; z.B. die richtige Umrechnung des Volumengehalts an Sauerstoff nach der 17. Bundes-Immissionsschutzgesetz-Verordnung (17.BImSchV). Somit kann nachhaltig das Wissen erfasst und für spätere Versuche wiederverwendet werden.

Der Wirkketten-Editor ermöglicht somit eine einfache formale Modellierung von relevanten Systemen mit spezifischen Merkmalen und Systemgrößen mit deren Wertebereiche und deren Beziehungen über Relationen, welche als Kontext oder Test-Relation definiert sein können. Ebenfalls wird der Nutzer bei der Modellierung, durch hinterlegte Regeln, Schritt für Schritt zu einem sinnvollen Zusammenhang geführt, welcher im nächsten Schritt z.B. im Rahmen eines Versuches auch quantifiziert werden kann. Darüber hinaus werden durch die implementierten Ähnlichkeits-Algorithmen dem Nutzer fortlaufend ähnliche Wirkketten, d.h. ähnliche ggf. bereits durchgeführte Versuche angezeigt, wodurch auf der bereits vorhandenen Wissensbasis aufgebaut und relevante Zusammenhänge nicht vergessen werden. Diese Art der Formalisierung von Wissen konnte bereits in anderen Projekten demonstriert und der Mehrwert aufgezeigt werden [7], [8].

EDI hive Modellgenerator

Basierend auf den erfassten Messdaten und dem formalisierten Expertenwissen können die implementierten KI-basierten Algorithmen genutzt werden, damit im ersten Schritt die Zusammenhänge in den Messdaten quantifiziert und intuitiv visualisiert werden. In Abbildung 4 ist die Übersicht bzgl. eines Modells dargestellt, wobei deutlich wird, welcher Datensatz verwendet wurde, was die Zielgrößen und Einflussgrößen sind und welche Modellqualität erreicht wurde.

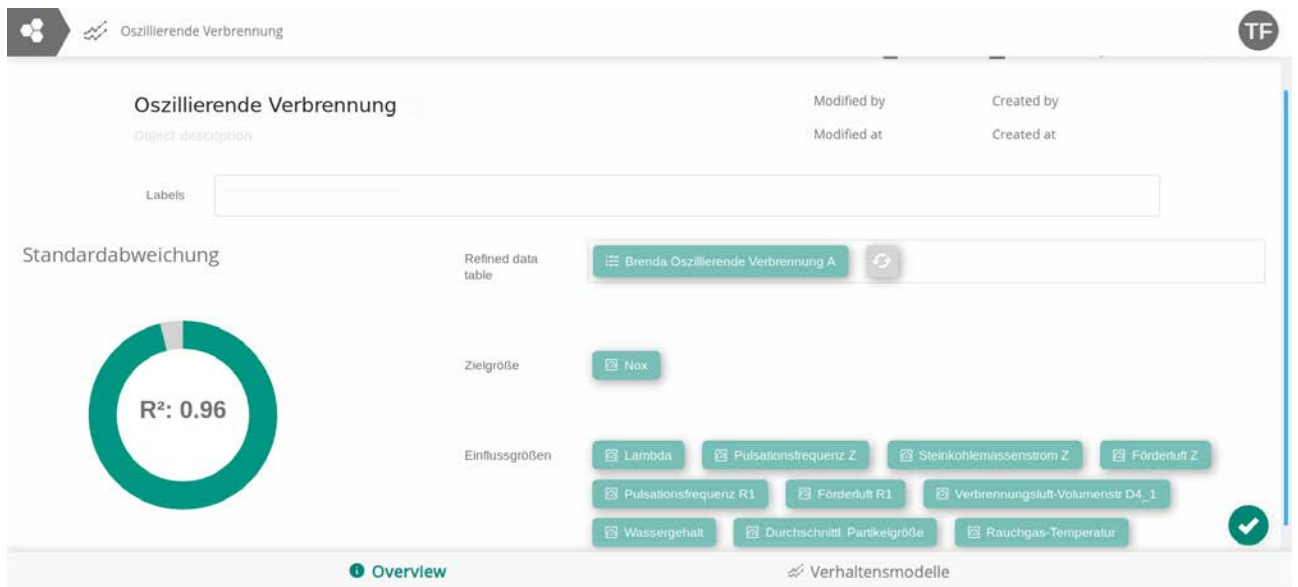


Abbildung 4. Exemplarische Übersichts-Seite des EDI hive Modellgenerators

Versuchsanlage BRENDA und Bilanzierung

Die Pilotanlage „Brennkammer mit Dampfkessel – BRENDA“ besteht aus einer Drehrohrfeuerung mit 1,5 MW thermischer Leistung, an die eine vertikale Brennkammer mit 2 antiparallel angeordneten Brennern mit insgesamt 1 MW angeschlossen ist. Eine der beiden Brenner ist als Mehrstoffstaubbrenner ausgeführt (Abbildung 5), mit dem sich unterschiedliche Brennstoffe gleichzeitig fördern lassen [9].

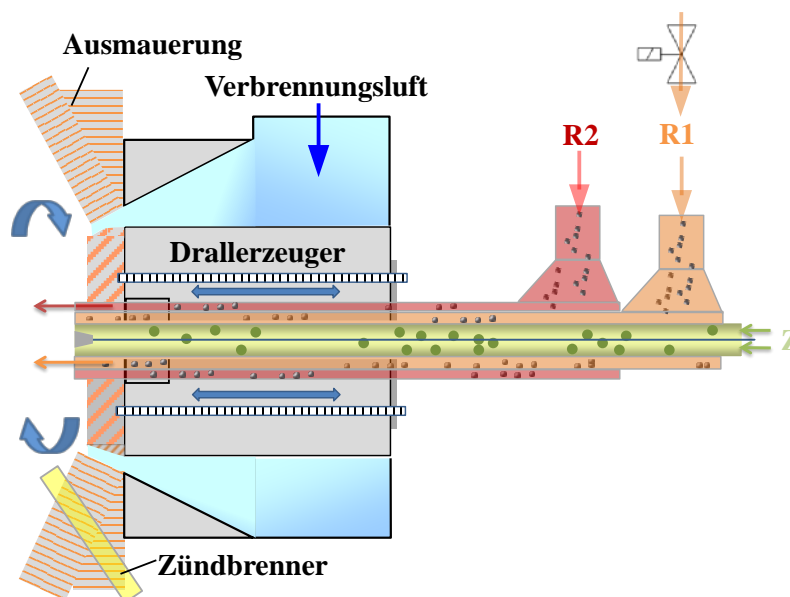


Abbildung 5. Schematischer Aufbau des Drallbrenners.

Für den betrachteten Fall der Untersuchungen zur Stickoxidminderung durch Oszillation wurde ein Quetschventil in den Ringspalt R1 eingesetzt, der den Kohleförderstrom periodisch unterbricht. Zentral, im Ringspalt R2 und außen werden Luftströme zugeführt, die Verbrennungsluft kann zudem verdrallt werden. Da die Anlage nach 17.BImSchV mit einer entsprechenden Abgasreinigung und Dampfkessel betrieben wird, muss zur Einhaltung der 850 °C nach der Brennerebene in der Nachbrennkammer die Drehrohrfeuerung bei Versuchen mit dem Staubbrenner mitlaufen. Die Stickoxid- und Sauerstoffkonzentrationen werden unmittelbar nach dem Kessel im Rohgas gemessen, Kohlenmonoxid wird nach etwa 5 Sekunden Verweilzeit des Rauchgases oberhalb des Staubbrenners ermittelt. Beide Größen dienen im Wesentlichen zur Beschreibung des oszillierenden Verbrennungsvorganges.

Zur Beschreibung des Stickstoffumsatzes zu NO_x wird der Stickstoffkonversionsgrad aus einer Stickstoffbilanz um die gesamte Anlage einschließlich der Drehrohrfeuerung gemäß Gleichung 1 berechnet. Das NO_x wird als NO_2 bilanziert und nach dem Kessel im Rauchgas gemessen. Die zur Bilanzierung erforderlichen Messgrößen feuchter Abgasvolumenstrom und Wasserdampfgehalt sowie der Sauerstoffgehalt zur Umrechnung auf 6 Vol.-% Sauerstoff und der CO- werden ebenfalls nach dem Kessel gemessen.

$$N_{\text{Konversion}} = \frac{NO_2 \left[\frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \right] \cdot 10^{-6}}{\tilde{M}_{NO_2} \left[\frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \right]} \cdot \dot{V}_{\text{Abgas},f} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right] \cdot (1 - \gamma_{H_2O, \text{Abgas},f}) \cdot \frac{\tilde{M}_{N_2} \left[\frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \right]}{\psi_{N, \text{Kohle}} \cdot \dot{m}_{\text{Kohle}} \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right]} \quad [-] \quad (1)$$

$\gamma_{H_2O, \text{Abgas},f}$ Wasserdampfgehalt im feuchten Abgas [Vol.-Anteilen]

$\psi_{N, \text{Kohle}}$ Stickstoffgehalt in der Kohle [Ma.-Anteile roh]

Dies ist erforderlich, da die Verbrennung von Heizöl im Drehrohr bereits eine Stickoxidfracht generiert, die von der Gesamtracht aus Drehrohr- und Kohlestaubfeuerung abgezogen wird. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Stickoxidfracht aus dem Drehrohr sich durch die Verbrennung mit Kohle nicht verändert.

Versuchsprogramm

Für das Versuchsprogramm wurde zur systematischen Planung die vermuteten, relevanten Systeme, Systemgrößen und Beziehungen mittels dem EDI hive Wirkketten-Editor formalisiert erfasst. Der Ausschnitt der Wirkkette in Abbildung 6 zeigt die wichtigsten Einflussgrößen, welche im Rahmen der Untersuchung systematisch verändert wurden. Im Fokus der Untersuchung stand der *Brenner D4.1*, welcher ein Zentralrohr (*Zentrallanze*) besitzt und über *Ringspalt 1* und *Ringspalt 2* verfügt. Neben dem großen Luftvolumenstrom *Verbrennungsluft-Volumenstrom D4.1* können über die Ringspalte und Zentrallanze ebenfalls eine Förderluft in den Brennraum eingebracht werden. Die Förderluft aus Ringspalt 1, Ringspalt 2 und Zentrallanze kann mit einer definierten Frequenz gepulst werden, wodurch die gewünschte oszillierende Verbrennung dargestellt werden kann.

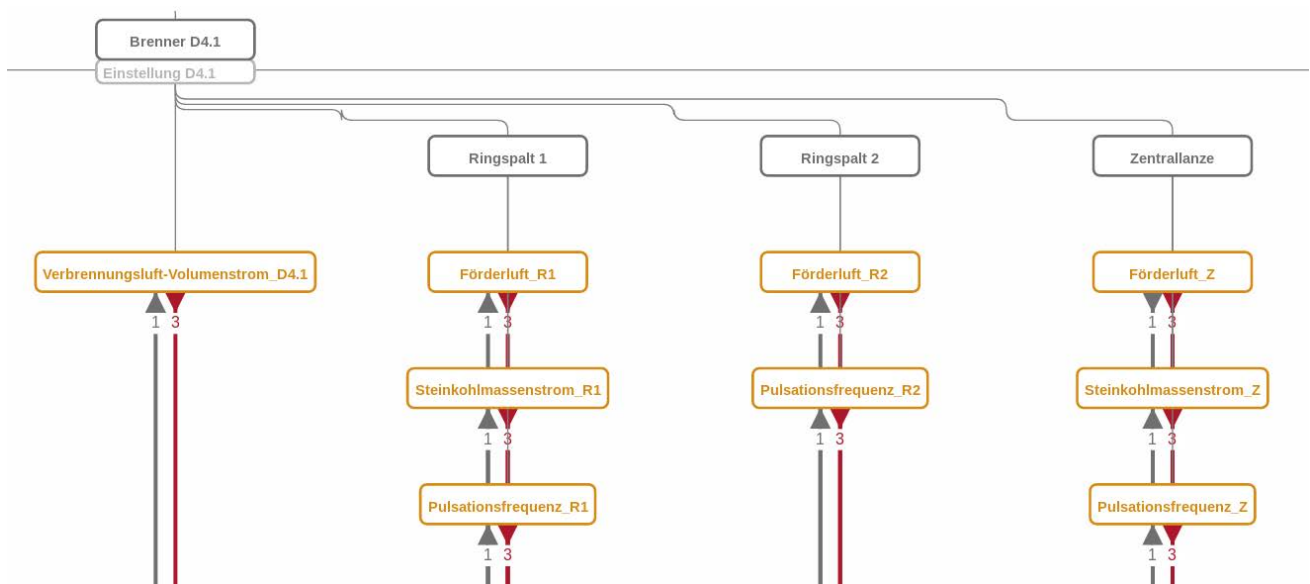


Abbildung 6. Ausschnitt aus den Wirkketten

Die Abbildung 7 zeigt alle relevanten Einflussgrößen (Eingang) und Zielgrößen (Ausgang), welche im Rahmen der Kampagne formalisiert und während den Versuchen gezielt konstant bzw. systematisch im entsprechenden Designbereich variiert werden (siehe Tabelle 1). Aufgrund der Tatsache, dass die Flamme und die dabei vorliegenden unterschiedlichen Temperaturbereiche in der Flamme bzgl. der NO_x-Bildung relevant sind, wurde dieser Parameter in die Liste der Einflussgrößen mit aufgenommen. Die Flammenform, die durch die Eingangsgrößen bei konstantem Drall resultiert, kann als Softsensor in der Steuerung der Anlage eingesetzt werden [10].

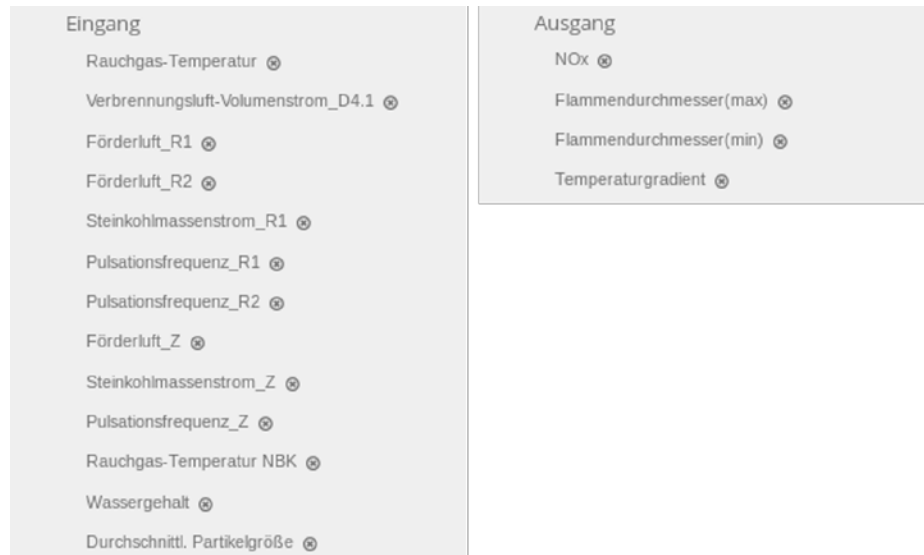


Abbildung 7. Relevante Einfluss- und Zielgrößen der Kampagne

Das Versuchsprogramm wurde nach Maßgabe und in Abstimmung mit EDI erarbeitet, wobei zeitliche, technische und wirtschaftliche Restriktionen berücksichtigt wurden. Das Versuchsprogramm umfasste zwei Versuchsreihen A und B, die sich u.a. in der Anzahl variiertes Parameter gemäß Tabelle 1 unterschieden.

Tabelle 1. Versuchsprogramm

Versuchsreihe	Steinkohlemassenstrom	Zufuhr Steinkohle	Förderluft Z	Förderluft R1	Förderluft R2	Verbrennungsluft	Oszillationsfrequenz Z	Oszillationsfrequenz R1	Oszillationsfrequenz R2
	[kg/h]	-	[Nm ³ /h]				Hz		
Variationsbreite									
A	70, 80, 90	zentral Z	70, 80, 90	70, 80, 90	0	500	0, 1, 2, 3	0, 1, 2, 3	-
B	70, 90	Ringspalt R1	0, 70, 90	70, 90	0, 70, 90	420	0, 3	0, 3	0, 3

Für die Versuchsreihe A wurden, die in Tabelle 1 dargestellten Einflussgrößen teilweise auf 3 bzw. 4 Faktorstufen variiert, wodurch ein quadratischer Einfluss auf die Zielgrößen beobachtet werden kann. Insbesondere stand bei der Versuchsreihe A der Einfluss der Pulsationsfrequenz auf NO_x im Fokus. Insgesamt wurden 26 Faktorkombinationen eingestellt und die entsprechenden Messwerte über das Leitsystem und extra Messsysteme erfasst.

Bei der Versuchsreihe B stand vor allem der Einfluss der örtlichen Luftzufuhr im Fokus, wobei alle Faktoren, aufgrund der begrenzten Versuchszeit nur auf zwei Stufen variiert wurden und der Versuchsumfang somit 36 Einzelversuche umfasste.

Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse unterteilen sich in eine Momentaufnahme aus den Versuchsreihen, die den Wechsel vom nicht-oszillierenden Betrieb in den oszillierenden Betrieb gemäß Abbildung 8 zeigt, den Teil-Modellbaum des Hybridmodells (Abbildung 6) sowie die berechnete Funktion zur Ermittlung eines optimalen Betriebspunktes für den Brenner am Beispiel der Frequenz (Abbildung 9).

Aus der Versuchsreihe B ist exemplarisch ein Zeitabschnitt gewählt worden, der den Einfluss der Oszillation auf die Stickoxidkonzentration zeigt (siehe Abbildung 8).

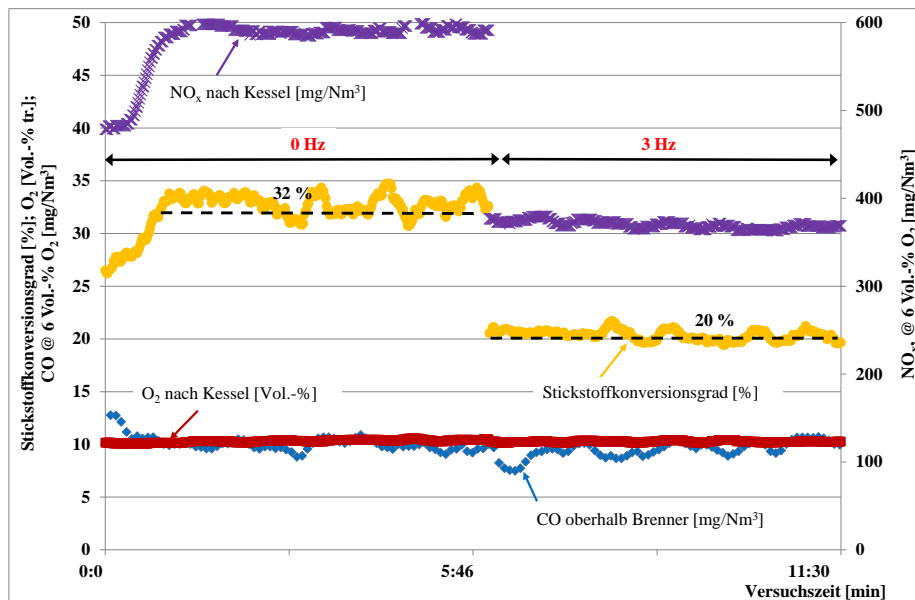


Abbildung 8. Verlauf der Konzentrationen von CO, NO_x, O₂ sowie des Stickstoffkonversionsgrades für den nicht-oszillierenden und den oszillierenden Betrieb.

Aufgetragen sind auf der linken y-Achse der nach Gl. (1) berechnete Stickstoffkonversionsgrad in Ma.-%, der Sauerstoffgehalt nach dem Kessel in Vol.-% trocken sowie die auf 6 Vol.-% Sauerstoff normierten CO- Gehalt oberhalb des Brenners. Der NO_x nach Kessel ist auf der rechten y-Achse gegenüber der Versuchszeit aufgetragen.

Man erkennt deutlich die Reduktion von NO_x durch die Oszillation mit 3 Hz von rund 600 mg/Nm³ auf 370 mg/Nm³, jeweils bezogen auf 6 Vol.-% O₂. In diesem Fall wurde der über den Ringspalt R1 dosierte Steinkohlemassenstrom oszilliert. Drückt man diese Reduktion unter Berücksichtigung der Bilanzierung um die Anlage durch den Stickstoffkonversionsgrad aus, reduziert sich dieser von 32% auf 20%.

Durch die unterschiedlichen Kombinationen aus Brennstoffmassenstrom und Luftvolumenströmen gemäß Tabelle 1 verändert sich jedoch die Gesamtluftzahl am Brenner. Die lokale Luftzahl, die u.a. maßgeblich für das Minderungspotential ist, konnte messtechnisch bisher nicht erfasst werden.

Aufgrund der systematischen Versuchsplanung mittels dem EDI hive Wirkketten-Editor und des Versuchsplans wurde im Rahmen dieser Arbeit, aufgrund der geringen Datenmenge ein Regressionsmodell mit Wechselwirkungen und höherer Ordnung zur Beschreibung der Zusammenhänge eingesetzt [11].

Als Ergebnis der Versuchsreihen A ergibt sich das in Abbildung 7 dargestellte Interaktions-Diagramme exemplarisch gezeigt für die Pulsationsfrequenz Z und dem Steinkohlenmassenstrom Z. Es zeigt deutlich, wie sensitiv die Oszillations-Frequenz der Förderluft aus der Zentrallanze sich auf die um den O₂-Bezug korrigierten Zielgröße NO_x auswirkt, da die Kurve innerhalb des Designbereichs einen großen Gradienten aufweist. Bei definierter Einstellung der anderen Parameter wird bei 0,54 Hz und einem 70 kg/h Steinkohlemassenstrom eine O₂- korrigierte NO_x-Emission von 483,79 mg/Nm³ erreicht. Die optimale Pulsationsfrequenz für die Oszillation des Luft- und Kohlemassenstroms in der Zentrallanze liegt bei 1,8 Hz, wobei bei gleicher Einstellung der anderen Parameter eine deutliche NO_x-Reduktion erreicht wird und nur noch ca. 380 mg/Nm³ anfallen.

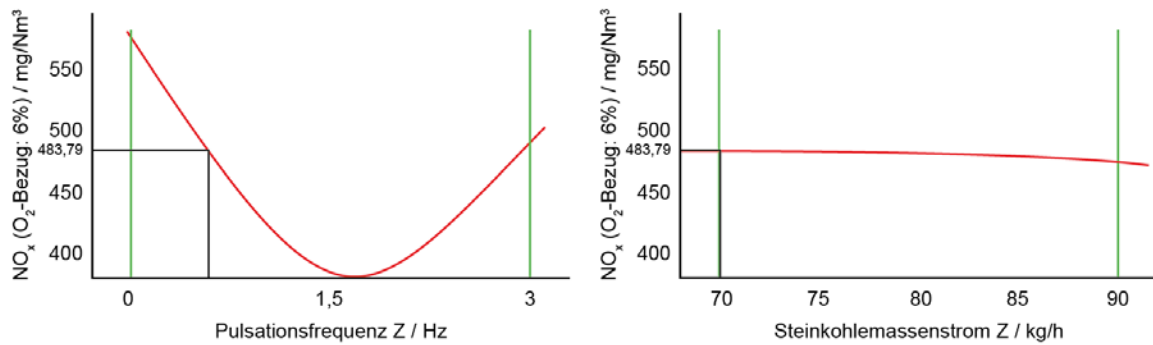


Abbildung 9. Ermittlung der optimalen Frequenz der Oszillation bzgl. NO_x

Ebenfalls zeigt Abbildung 10, dass die zusätzliche Luftzufuhr aus Ringspalt 1 ebenfalls sensitiv auf das NO_x wirkt und durch entsprechende Zufuhr eine NO_x -Reduktion erreicht werden kann. Aufgrund des großen Einflusses der Pulsation des Kohlestroms in der Zentrallanze, fällt der Einfluss der Oszillation der Luftzufuhr im Ringspalt 1 eher gering aus und muss bei der aktuellen Versuchsanordnung bzw. Parametereinstellungen als statistisch nicht signifikant beurteilt werden.

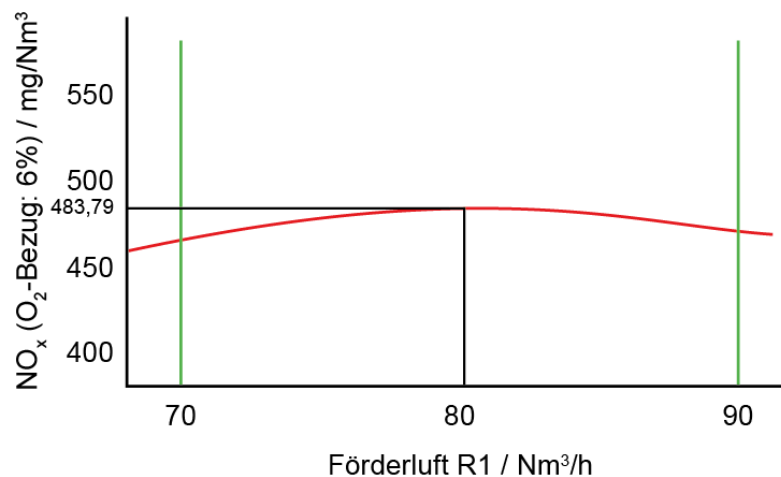


Abbildung 10. Sensitivität bei zusätzlicher Förderluft über den Ringspalt 1 bzgl. NO_x

Im Rahmen der Kampagne wurden alle Einflussgrößen und auch die Wechselwirkung untereinander auf diese Art und Weise dargestellt und evaluiert.

Im nächsten Schritt könnten diese quantifizierten Hybridmodelle zur Optimierung und Steuerung der Anlage verwendet werden, wodurch eine automatisierte Steuerung der optimalen oszillierenden Verbrennung ermöglicht wird. Dies wurde aber im Rahmen der Arbeit nicht dargestellt.

In weiteren Untersuchungen soll u.a. der Frage nachgegangen werden, ob es neben quantifizierten Einflüssen (siehe Abbildung 9 und 10) gezeigtem Minimum auch Nebenminima gibt, bei der eine minimale NO_x -Konzentration auch nur durch die Oszillation einer Ringspaltluft und nicht des Kohlemassenstroms erreicht werden könnte. Eine periodische Unterbrechung des Kohlestroms ist mit dem eingesetzten Quetschventil auf Dauer nicht praktikabel. Ebenfalls könnten durch weitere Versuche die Datenbasis für das Modell vergrößert und somit in Zukunft eine robustere Steuerung und Regelung der Anlage ermöglicht werden.

Literatur

- [1] Schenk, M.: *Softsensoren – Holen sie mehr aus ihren Proben heraus*, Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung (IFF), 2013.
- [2] Saza, J., Sánchez-Torres, J., Jiménez-Rodríguez, E., Botero-Castro, H.: *A Soft Sensor for Biomass in a Batch Process with Delayed Measurements* in Latin American Conference of Automatic Control, Colombia, 2016.
- [3] Geissbauer, R., Schrauf, S., Koch, V., Kuge, S.: *Industrie 4.0 – Chancen und Herausforderungen der vierten industriellen Revolution*, 2014.
- [4] Sen, J.: *Security and Privacy Issues in Cloud Computing*, in Architectures and Protocols for Secure Information Technology, USA, 2013.
- [5] Freudenmann, T., El-Haji, M.: *Vorrichtung und Verfahren zur Erfassung, Überprüfung und Speicherung von Prozessdaten aus mindestens zwei Prozessschritten*. EU Patent EP 3 056 994 B1, 2018.
- [6] Krause, T., Strauß, O., Scheffler, G., Kett, H., Lehmann, K., Renne, T.: *IT-Plattformen für das Internet der Dinge (IOT)*, Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2017.
- [7] Iwanicki, M., Heo, S.-J., Park, D., Freudenmann, T., El-Haji, M.: *Do the Right Things – Tyre Performance Parameter Evaluation by using Cross-Linked Cause & Effect Chain Models Coupled with Behaviour Models*, in International VDI Conference Tyres - Chassis - Road, Hannover, 2015.
- [8] Freudenmann, T., El-Haji, M., Müller, M., Sibla, C., Schick, B.: *Sustainable Design Decisions Based on Cross-linked Cause & Effect Chain Models Applied for the Optimisation of an Automatic Transmission*, in 6th International Symposium on Development Methodology, Wiesbaden, 2015.
- [9] Gehrman, H.-J., Hauser, M., Matthes, J., Waibel, P., Vogelbacher, M., Keller, H. B., Paur, H.-R., Stapf, D.: *Kamerabasierte Prozesskontrolle bei der Lastabsenkung mithilfe torrefizierter Biomasse in Kohlekraftwerken*; 50. Kraftwerktechnisches Kolloquium Dresden, 23. und 24. Oktober 2018
- [10] Waibel, P., Matthes, J., Keller, H.B., Gehrman, H.J., Kolb, T., Seifert, H.: *Kamerabasierte Analyse von Mehrstoffbrennern*. 25. Deutscher Flammentag, Karlsruhe, 14.-15. September 2011 Düsseldorf : VDI-Verl. GmbH, 2011 S.421-426 (VDI-Berichte ; 2119) ISBN 978-3-18-092119-8
- [11] Siebertz, K., van Bebber, D., Hochkirchen, T.: *Statistische Versuchsplanung: Design of Experiments (DoE)*, Deutschland: Springer Vieweg, 2017.