

# MODELLIERUNG DES LASTPROFILS EINES ELEKTROLICHTBOGENOFENS MITTELS MARKOV-KETTEN

Johannes DOCK<sup>1</sup>, Daniel JANZ<sup>2</sup>, Thomas KIENBERGER<sup>1</sup>

## Inhalt

Im Vergleich zum energie- und emissionsintensiven Hochofenprozess bietet die Elektrolichtbogenofenroute eine Möglichkeit zur CO<sub>2</sub>-armen Stahlerzeugung. Das Erschmelzen von Stahlschrott oder direktreduziertem Eisen (DRI) im Elektrolichtbogenofen (EAF) anstatt der Reduktion von Eisenerz erfordert einen geringeren Energieeinsatz und verursacht geringere CO<sub>2</sub>-Emissionen [1]. Zudem kann der EAF mit Strom aus erneuerbaren Quellen versorgt werden. Im Jahr 2017 betrug der Anteil des in Europa entlang dieser sogenannten sekundären Route erzeugten Stahls 41.7 % [2].

Da die Elektrostahlproduktion vorwiegend in Chargenprozessen geschieht, sind die Energieverbräuche der Einzelaggregate sowie des gesamten Stahlwerkes zeitlich stark variabel. Erst die Kenntnis der variablen Lastprofile der Einzelaggregate ermöglicht eine Optimierung der Betriebsweise, eine Vorhersage über die Belastung des vorgelagerten Energienetzes sowie die Identifizierung von Flexibilitätsoptionen zum verstärkten Einsatz von erneuerbaren Energieträgern sowie Demand Side Management.

Das Ziel dieses Beitrages ist die Vorstellung einer Methodik zur Generierung des synthetischen Lastprofils eines Elektrolichtbogenofens. Die verwendeten Daten wurden im Rahmen des NEFI-Projekts OxySteel im Stahlwerk der Breitenfeld Edelstahl AG gesammelt.

## Methodik

Mit einem Anteil von 61 % des elektrischen Jahresenergieverbrauchs ist der Elektrolichtbogenofen sowohl energie- als auch leistungsmäßig der größte Verbraucher im Elektrostahlwerk. Die Chargenbetriebsweise des EAF führt außerdem zu den größten Lastschwankungen.

Zur Analyse des Energiesystems wurden die Leistungsdaten des EAF für 160 Chargen aufgezeichnet. Neben minutenaufgelösten Wirk-/Blind- und Scheinleistungswerten wurden auch die Tap-to-tap-Time, das Chargengewicht, das eingeblasene Sauerstoffvolumen, die Abstichttemperatur sowie der Kohlenstoffgehalt beim Abstich erfasst. Die Analyse ergab, dass die für eine Charge vom EAF konsumierte Energiemenge hauptsächlich von der Schrottmenge abhängt. Das zeitliche Verhalten des Ofens hinsichtlich des Leistungseintrages und des Auftretens von Lastspitzen sowie die Tap-to-tap-Time können nicht über die oben genannten Daten ermittelt werden, sondern sind stochastisch verteilt.

Abbildung 1 zeigt ein gemessenes relatives Lastprofil des Elektrolichtbogenofens, welches sich auf die folgenden Prozessphasen aufteilen lässt: Vorbereiten, Chargieren und Schmelzen eines oder mehrerer Schrottkörbe, Frischen und Abstechen. Der Energieeintrag findet dabei während der Schmelzphasen bzw. dem Frischen statt und beläuft sich laut Literatur auf 404 – 748 kWh/t Stahl [3].

Physikalische Systeme wie die Leistungsaufnahme des EAF lassen sich als Aneinanderreihung von diskreten Zuständen - in unserem Fall Leistungsintervallen - darstellen. Hängt der Zustand des Systems im nächsten Zeitschritt ausschließlich vom Status zum aktuellen Zeitpunkt und nicht von vorangegangenen Ereignissen ab, dann erfüllt der Prozess die sogenannte Markov-Eigenschaft [4].

In dem beobachteten Prozess gibt es eine bestimmte Wahrscheinlichkeit, dass das System im nächsten Zeitschritt in einen anderen Zustand übergeht. Für die Errechnung einer sogenannten Markov-Kette werden alle Übergangswahrscheinlichkeiten in einer Matrix angeordnet. Gibt man nun einen Anfangszustand als Startpunkt vor und zieht eine Zufallszahl  $z$  ( $0 \leq z \leq 1$ ), so gelangt man in den nächsten Zustand [4].

---

<sup>1</sup> Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Energieverbundtechnik, Franz-Josef-Straße 18, 8700 Leoben, +43 3843 4025401, evt@unileoben.ac.at, evt.unileoben.ac.at

<sup>2</sup> Breitenfeld Edelstahl AG, Breitenfeldstraße 22, 8662 St. Barbara-Mitterdorf, +4338586161219, daniel.janz@breitenfeld.at, breitenfeld.at

Durch die Aneinanderreihung dieser Zustände erhält man eine synthetische Zeitreihe, welche der Verteilung der beobachteten Sequenz gehorcht, jedoch bei jedem Aufruf der Markov-Kette eine andere Form annimmt. Dieses Prinzip lässt sich bei der Modellierung von synthetischen Lastprofilen des Elektrolichtbogenofens anwenden.

Zur Erstellung des synthetischen Lastprofils wird die benötigte Energiemenge aus der oben erwähnten Korrelation zwischen Schrottmenge und eingesetzter Energie berechnet und auf die Prozessschritte Schmelzen und Frischen aufgeteilt. Anschließend wird mithilfe eines Wahrscheinlichkeitsvektors sowie einer Zufallszahl eine Tap-to-tap-Time ermittelt. Für jede Prozessphase wird nun die zuvor ermittelte Energiemenge auf eine Markov-Kette umgelegt. Entspricht die Länge der aneinandergereihten Ketten der festgelegten Tap-to-tap-Time, wird das Lastprofil der Charge in die Zeitreihe übernommen.

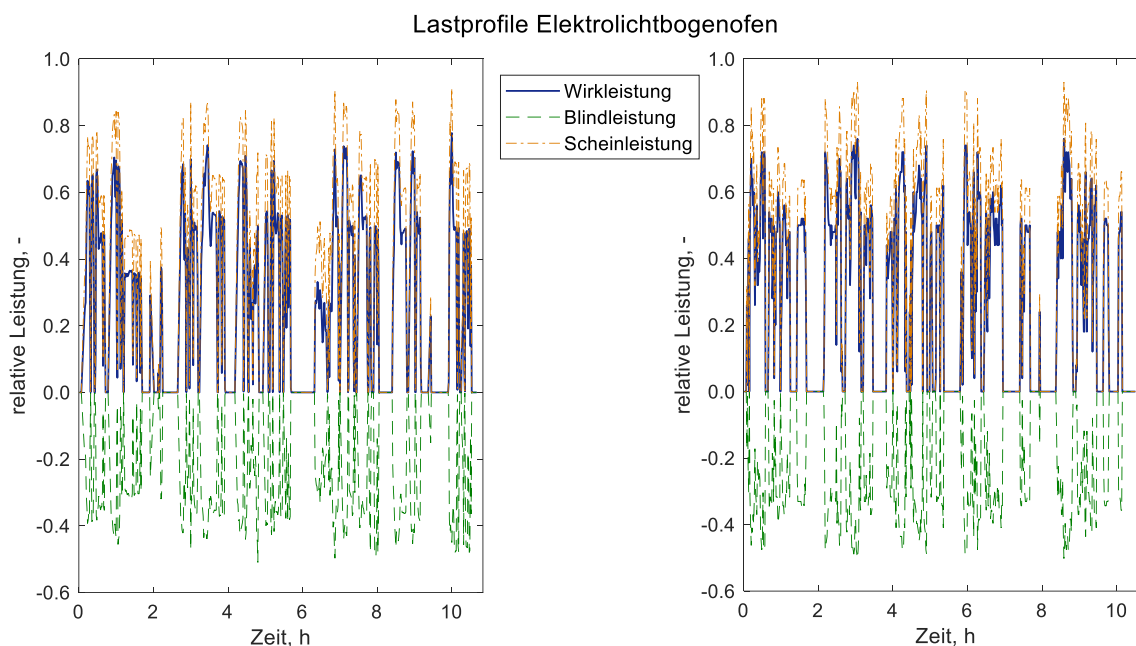


Abbildung 1: gemessenes (links) und synthetisches (rechts) Lastprofil des Elektrolichtbogenofens

## Ergebnisse

Das Modell liefert ein synthetisches Lastprofil (Abbildung 1, rechts) des Elektrolichtbogenofens, welches auf unterschiedliche Tap-to-tap-Times und Schrottmengen – und damit Ofengrößen - skalierbar ist. Das vorliegende Modell errechnet nur die Wirkleistung als Markov-Kette. Schein- und Blindleistung werden über Regressionsgleichungen für jeden Zeitschritt berechnet. Eine mit weniger Messaufwand verbundene Alternative stellt die Berechnung über einen durchschnittlichen Leistungsfaktor dar.

Insgesamt zeigen die synthetischen Lastprofile gute Übereinstimmung mit den gemessenen Profilen und sind dadurch für die Simulation von Energiesystemen geeignet. Zukünftig soll das EAF-Lastprofil in ein Energiesystemmodell des gesamten Elektrostahlwerks eingebunden werden.

## Referenzen

- [1] M. Arens, E. Worrell, W. Eichhammer, A. Hasanbeigi, and Q. Zhang, "Pathways to a low-carbon iron and steel industry in the medium-term – the case of Germany," *Journal of Cleaner Production*, vol. 163, pp. 84–98, 2017.
- [2] Eurofer, "European steel in figures," covering 2009 - 2018, Brussels, 2019. Accessed on: Nov. 06 2019.
- [3] R. Remus, Best available techniques (BAT) reference document for iron and steel production: Industrial emissions directive 2010/75/EU (integrated pollution prevention and control). Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2013.
- [4] W. J. Stewart, *Probability, Markov chains, queues, and simulation: The mathematical basis of performance modeling*. Princeton (N.J.), Oxford: Princeton University Press, op. 2009.