

# Modellierung des Lastprofils eines Elektrolichtbogenofens mittels Markov-Ketten

Johannes Dock\*, Daniel Janz, Thomas Kienberger

Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Energieverbundtechnik, Franz-Josef-Straße 18,  
8700 Leoben, +4338424025401, evt@unileoben.ac.at, evt.unileoben.ac.at

Breitenfeld Edelstahl AG, Breitenfeldstraße 22, 8662 St. Barbara-Mitterdorf,  
+4338586161219, daniel.janz@breitenfeld.at, breitenfeld.at

**Kurzfassung:** Die verstärkte Integration erneuerbarer Energieträger in industrielle Prozesse, die Implementierung von Demand-Side-Management sowie die Auslegung von Energiesystemen bedingt die Kenntnis von zeitlich aufgelösten Energieverbräuchen in Form von Lastprofilen. Da diese in der Industrie von Produktionsprozess, Produktionsvolumen und Produktqualität abhängen, ist der Einsatz von Standardlastprofilen nicht möglich. Bei der Herstellung von Stahl über die Elektrolichtbogenofenroute wird ein Großteil der aufgewendeten Energie für das Erschmelzen von Stahlschrott im Elektrolichtbogenofen eingesetzt. Neben dem hohen elektrischen Energieverbrauch zeichnet sich dieser auch durch große Lastschwankungen aus, was zu einer starken Belastung des vorgelagerten Netzes führt. Im vorliegenden Modell werden Markov-Ketten verwendet um synthetische Lastprofile eines mit Drehstrom betriebenen Elektrolichtbogenofens zu erzeugen.

**Keywords:** Energiesystemmodell, Elektrolichtbogenofen, Industrielles Lastprofil

## 1 Einleitung und Motivation

Die Stahlproduktion erfolgt derzeit hauptsächlich über die integrierte Prozessroute (Hochofen/Konverter) und die Elektrolichtbogenofenroute. Letztere bietet im Vergleich zur energie- und emissionsintensiven Hochofenroute eine Möglichkeit zur CO<sub>2</sub>-armen Stahlproduktion. Das Erschmelzen von Stahlschrott im Elektrolichtbogenofen (EAF) anstatt der Reduktion von Eisenerz erfordert einen geringeren Energieeinsatz und verursacht geringere CO<sub>2</sub>-Emissionen. Eine weitere Alternative ist die Weiterverarbeitung von direktreduziertem Eisen (DRI) im EAF. Aufgrund der vorgeschalteten Direktreduktion bewirkt diese gegenüber der Hochofenroute keine Energieeinsparungen, jedoch reduzieren sich die CO<sub>2</sub>-Emissionen beim Einsatz von Erdgas als Reduktionsmittel um etwa 18 % [1]. Zudem kann der EAF mit Strom aus erneuerbaren Quellen versorgt werden, wodurch sich die CO<sub>2</sub>-Intensität des Prozesses weiter verringert. Im Jahr 2017 betrug der Anteil des in Europa über die Elektrolichtbogenofenroute erzeugten Stahls 41.7 % [2].

Da die Elektrostahlproduktion vorwiegend in Chargenprozessen geschieht, sind die Energieverbräuche der Einzelaggregate sowie des gesamten Stahlwerkes zeitlich stark variabel. Der Wirk- und Blindleistungsbezug des Elektrolichtbogenofens schwankt in wenigen Minuten zwischen 0 und 100 % der maximalen Leistung. Zudem kommt es durch den Betrieb des EAF zu Oberschwingungen, Flicker und Unsymmetrien, deren Beurteilung nicht Teil der vorliegenden Arbeit ist. 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 Drehstrom-Elektrolichtbogenofens. Die verwendeten Daten wurden im Rahmen des NEFI-Projekts OxySteel im Stahlwerk der Breitenfeld Edelstahl AG gesammelt.

## 2 Elektrolichtbogenofen

Mit einem Anteil von 61 % des elektrischen Jahresenergieverbrauchs ist der Elektrolichtbogenofen sowohl energie- als auch leistungsmäßig der größte Verbraucher im untersuchten Elektrostahlwerk. Die Chargenbetriebsweise sowie die hohe Spitzenleistung des EAF führen außerdem zu den größten Lastschwankungen am Produktionsstandort.

Die Aufgabe des Elektrolichtbogenofens ist das Erschmelzen von Stahlschrott zu flüssigem Stahl. Der dazu nötige Wärmeeintrag in das Schmelzgut setzt sich aus der Strahlungswärme des Lichtbogens und der elektrischen Widerstandserwärmung des Schrottes zusammen [3].

Während des Schmelzens einer Charge kommen folgende Prozessschritte zur Anwendung:

- Vorbereiten und Chargieren
- Schmelzen
- Frischen
- Abstich.

Die Prozessschritte Chargieren und Schmelzen werden je nach Anzahl der zu chargierenden Schrottkörbe entsprechend oft wiederholt, bis sich ein flüssiges Stahlbad ausbildet.

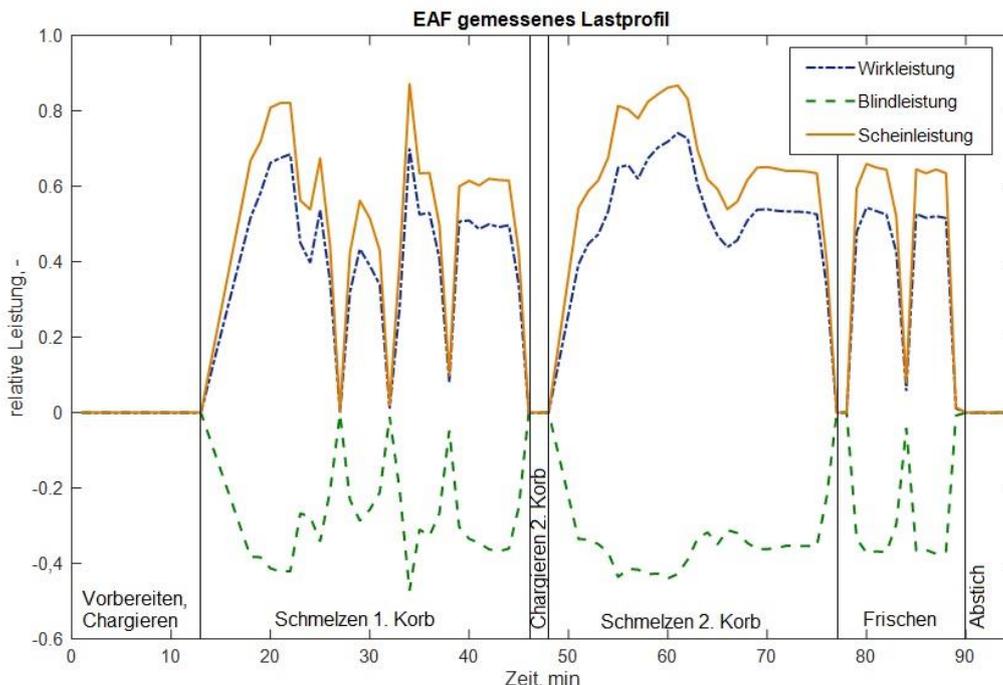


Abbildung 1: Gemessenes Verbrauchslastprofil des Elektrolichtbogenofens

Abbildung 1 zeigt ein gemessenes Lastprofil des Elektrolichtbogenofens. Die Wirk-, Blind- und Scheinleistung wurden als Minutenmittelwerte aufgezeichnet und sind im Diagramm als Verhältnis zur Nennleistung des Ofentransformators dargestellt. Je nach Anwendung kann auch eine höhere Zeitauflösung gewählt werden, wobei für Simulationen des Energiesystems des untersuchten Stahlwerkes die Minutenwerte einen Kompromiss zwischen Rechenzeit und Genauigkeit darstellen. Das Profil lässt sich auf die folgenden Prozessphasen aufteilen: Vorbereiten, Chargieren und Schmelzen zweier 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 [4].

### 3 Methodik

Der Aufbau des Modells zur Erstellung von synthetischen Lastprofilen für Elektrolichtbogenöfen lässt sich in vier Teile gliedern und wird im Folgenden erklärt.

- Berechnung des Energieverbrauchs,
- Berechnung der Markov-Ketten,
- Überprüfung der Tap-to-Tap-Zeit sowie
- Aneinanderreihen des Lastprofils.

#### 3.1 Energieverbrauch

Bei der Analyse des Energiesystems des untersuchten Stahlwerks wurden die Leistungsdaten des EAF für 160 Chargen aufgezeichnet. Neben minutenaufgelösten Wirk-/Blind- und Scheinleistungswerten wurden auch die Tap-to-tap-Zeit, welche die Zeitspanne zwischen zwei Abstichen beschreibt, das Chargengewicht, das eingeblasene Sauerstoffvolumen bei Normbedingungen, die Abstichtemperatur sowie der Kohlenstoffgehalt beim Abstich erfasst.

Eine Analyse der genannten Daten ergab, dass die für eine Charge vom EAF konsumierte Energiemenge hauptsächlich von der Schrottmenge abhängt. Das zeitliche Verhalten des Lastprofils und das Auftreten von Lastspitzen sowie die Tap-to-tap-Zeit können jedoch nicht über die oben genannten Daten ermittelt werden, sondern sind stochastisch verteilt.

Über die ebenfalls gemessene Ausbringung, die das Verhältnis an abgestochenem Stahl zu chargiertem Schrott beschreibt, lässt sich der spezifische Energieverbrauch bezogen auf die Masse an erschmolzenem Stahl berechnen. Es zeigte sich, dass sich die errechneten Werte mit den in Kapitel 2 angeführten Literaturwerten decken.

Es konnte weiters gezeigt werden, dass zwischen chargierter Schrottmenge und eingesetzter elektrischer Energie ein annähernd linearer Zusammenhang besteht. Im Modell wird mithilfe linearer Regression eine Geradengleichung aufgestellt, welche dann zur Berechnung der Energiemenge auf Basis des Schrottgewichts herangezogen wird. Das Schrottgewicht ist im Modell als Eingabgröße definiert.

#### 3.2 Markov-Ketten

Physikalische Vorgänge wie die Leistungsaufnahme des EAF lassen sich als Aneinanderreihung von diskreten Zuständen darstellen. Hängt der Zustand des zu

beschreibenden Systems im nächsten Zeitschritt ausschließlich vom Status zum aktuellen Zeitpunkt und nicht von vorangegangenen Ereignissen ab, dann erfüllt es die sogenannte Markov-Eigenschaft [5].

Im beobachteten Prozess ist die Veränderung der Leistungsaufnahme von einem Zeitschritt in den nächsten an eine bestimmte Wahrscheinlichkeit gebunden. Diese Wahrscheinlichkeiten werden in einer sogenannten Übergangswahrscheinlichkeitsmatrix angeordnet.

Für die Konstruktion einer Markov-Kette müssen diese Wahrscheinlichkeiten für jeden Ausgangszustand, das heißt für jede Zeile der Matrix, kumuliert werden. Gibt man nun einen Ausgangszustand als Startpunkt vor und zieht eine Zufallszahl  $z$  ( $0 \leq z \leq 1$ ), so gelangt man über die kumulierte Übergangswahrscheinlichkeitsmatrix in den nächsten Zustand, welcher dann als Ausgangszustand für den folgenden Zeitschritt dient [5].

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.

In unserem Fall wird die Leistung des Lichtbogenofens in 40 Intervalle unterteilt, das heißt es gibt 40 mögliche Leistungszustände, in denen sich der Ofen befinden kann. Die Zeitschritte betragen 60 s und entsprechen damit der zeitlichen Auflösung der Messung. Mit diesen Informationen wird nun auf Basis der Messzeitreihen eine  $40 \times 40$  - Übergangswahrscheinlichkeitsmatrix gebildet. Aufgrund der unterschiedlichen Leistungscharakteristik wird für jede Prozessphase jeweils eine eigene Matrix erstellt.

### 3.3 Lastprofilerstellung

Um das Lastprofil berechnen zu können, bedarf es der Festlegung mehrerer Eingangsgrößen. Es sind dies die chargierte Schrottmenge, die Anteile des Energieverbrauchs während der Schmelzphasen bzw. der Frischphase, die auf Basis der Beobachtungssequenzen erstellten Übergangswahrscheinlichkeitsmatrizen sowie die Verteilung der Tap-to-tap-Zeiten.

Mit Hilfe der Eingangsgrößen wird im Modell eine Reihe weiterer Größen berechnet, die dann die Leistungscharakteristik des Prozesses bestimmen. Dazu gehören die vom Ofen pro Charge aufgenommene elektrische Energie und die Tap-to-tap-Zeiten. Erst die Verknüpfung dieser Informationen stellt sicher, dass das Modell auch physikalisch sinnvolle Ergebnisse liefert. Verkürzt sich beispielsweise bei gleicher Energiemenge die Prozessdauer, so muss sich die durchschnittlich aufgenommene Leistung des Ofens erhöhen.

In einem ersten Schritt wird gemäß der in Kapitel 3.1 beschriebenen Beziehung zwischen Schrottmenge und eingesetzter Energie die einzubringende Energiemenge berechnet und mithilfe der als Eingangsgröße definierten Anteile auf die Prozessschritte Schmelzen und Frischen aufgeteilt. Anschließend wird mithilfe eines Wahrscheinlichkeitsvektors sowie einer Zufallszahl eine Tap-to-tap-Zeit 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-Zeit, wird das Lastprofil der Charge in die Zeitreihe übernommen.

## 4 Ergebnisse und Diskussion

Als Ergebnis wird ein synthetisches Verbrauchslastprofil des Elektrolichtbogenofens gewonnen. Abbildung 2 zeigt ein über das Modell berechnetes Lastprofil des EAF für eine Zweikorbcharge von 60 t. Der direkte Vergleich der Lastprofile (vgl. Abbildung 2) zeigt die gute Übereinstimmung zwischen gemessener und über das Modell berechneter Leistungscharakteristik.

Da das gemessene Wirkleistungsprofil als Beobachtungssequenz herangezogen wird, erhalten wir als Ergebnis ein synthetisches Wirkleistungsprofil. Durch lineare Regression wurde ein Zusammenhang zwischen gemessener Wirkleistung und Blind- bzw. Scheinleistung gefunden. Diese Regressionsgleichung dient zur Berechnung der Blind- und Scheinleistung für jeden Zeitschritt.

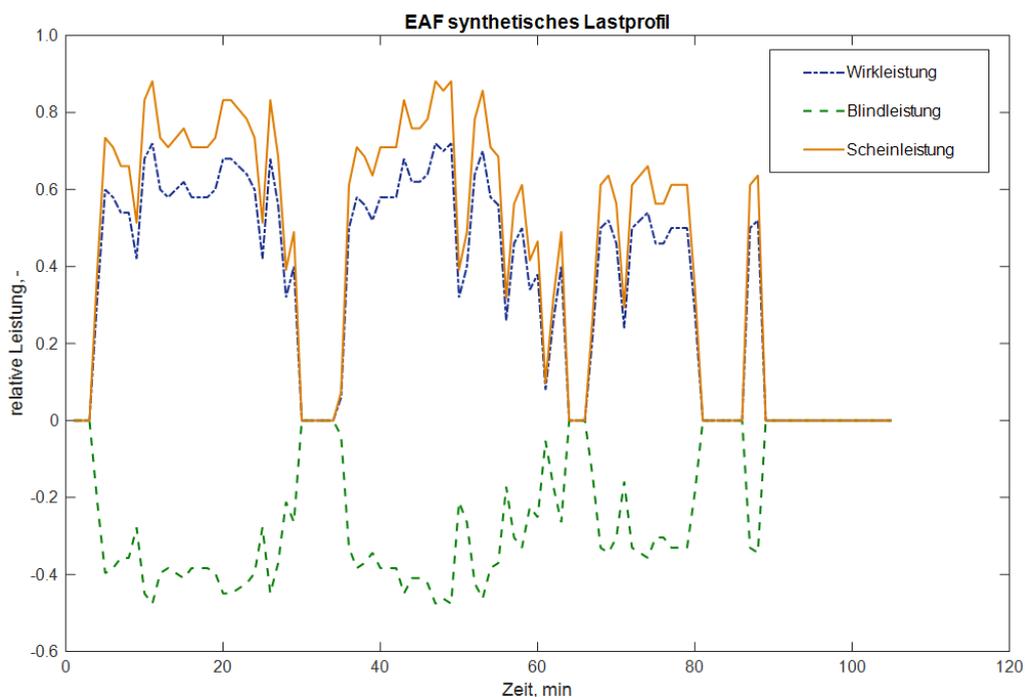


Abbildung 2: Synthetisch generiertes Lastprofil des EAF

## 5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Das vorliegende Modell liefert ein synthetisches Verbrauchslastprofil des Elektrolichtbogenofens, welches auf unterschiedliche Tap-to-tap-Zeiten und Schrottmengen – und damit Ofengrößen - skalierbar ist. Insgesamt zeigen die synthetischen Lastprofile gute Übereinstimmung mit den gemessenen Profilen und sind dadurch für die Simulation von Energiesystemen geeignet. Zukünftig soll das EAF-Modell in ein Energiesystemmodell des gesamten Elektrostahlwerks eingebunden werden.

## 6 Danksagung

Diese Arbeit wurde im Rahmen des Projektes OxySteel durchgeführt. OxySteel ist ein Teilprojekt von NEFI – New Energie for Industry, eine vom österreichischen Klima- und Energiefonds finanzierte Vorzeigeregion Österreichs.

## 7 References

- [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] M. Blesl and A. Kessler, *Energieeffizienz in der Industrie*. Berlin: Springer-Vieweg, 2013.
- [4] 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.
- [5] W. J. Stewart, *Probability, Markov chains, queues, and simulation: The mathematical basis of performance modeling*. Princeton (N.J.), Oxford: Princeton University Press, op. 2009.