



Dekarbonisierung der Stahlindustrie

KI-gestütztes Produktions- und Energiemanagement

Dr. Rudolf Felix, Heinz-Josef Ponten, Michael Haischer, Peter Bachmann

Die Produktion von grünem Stahl bedingt einen umfassenden Transformationsprozess mit schrittweiser Ersetzung CO₂-intensiver Produktionsverfahren. Unabdingbar ist dabei die Digitalisierung der Produktionsprozesse, um die komplexere Stahlerzeugung im Hinblick auf Logistik sowie effizienten Material- und Energieeinsatz zu planen und zu steuern. Ganz entscheidend ist dabei eine KI-gestützte Schmelzplanoptimierung inklusive Material- und Energiebedarfsprognose, und kombiniert mit einer intelligenten Intraday-Energiebeschaffung.

CO₂-Emissionen reduzieren, Energieverbrauch senken, neue Energiebeschaffungsstrategie entwickeln: Die Stahlindustrie steht bei der Herstellung ebenso wie bei der Weiterverarbeitung von Stahl vor großen Herausforderungen (**Bild 1**). Parallel müssen die Unternehmen hochkomplexe Prozesse optimieren, neue Verfahren etablieren sowie Kompetenzen aufbauen. Und zwar unter hohem Handlungsdruck. Denn wer keine Dekarbonisierungs-Maßnahmen ergreift, setzt laut Studien rund 14 Prozent des potenziellen Unternehmenswerts aufs Spiel. Ein Anteil, den sich kein Unternehmer leisten kann. Die Branche hat sich daher längst auf den Weg zum sogenannten grünen Stahl begeben und setzt vor allem auf die Umstellung der Stahlerzeugung von der klassischen Hochofenroute auf Direktreduktion – allen voran mit Wasserstoff. Letzteres – der Ersatz von Erdgas und Koksenergie durch Wasserstoff – gilt als Schlüsselfaktor auf dem Weg zu weniger CO₂-Ausstoß.

Komplexität im Hybridbetrieb beherrschen

Fest steht, dass der notwendige Transformationsprozess im Hybridbetrieb erfolgen wird, bei dem klassische Produktionsverfahren und -routen schrittweise durch neue ersetzt werden. Die Branche ist daher über Jahre oder gar Jahrzehnte gefordert, neue und bisherige Systeme in ihrem Einsatz parallel zu betreiben und zu koordinieren. Hierdurch wird die Komplexität der ohnehin vielschichtigen Abhängigkeiten in der Stahlproduktion weiter zunehmen. Unternehmen müssen die unterschiedlichen Anlagen auf den verschiedenen Routen

zielgerecht synchronisieren, die Produktion optimieren, Qualitätsstandards aufrechterhalten und gleichzeitig ein Gleichgewicht zwischen Kosteneffizienz und Umweltaspekten schaffen.



Ganzheitliches Produktions- und Energiemanagement: Klimaschutz und Wirtschaftlichkeit im Einklang [Bildquelle: PSI Metals GmbH]



Die Stahlproduktion
ist für 7 % der weltweiten Treibhausgas-
Emissionen verantwortlich

 **“Die Zukunft gehört erneuerbarer Energie”**

Bild 1: Der Transformationsprozess hin zur Produktion von „grünem Stahl“ ist vielschichtig und fordert die Branche, ein Gleichgewicht zwischen Kosteneffizienz und Umweltaspekten herzustellen. Ein zentraler Hebel ist das intelligente Management von Zielkonflikten [Bildquelle: PSI Metals GmbH]

Um diese Komplexität zu beherrschen und die genannten Ziele zu erreichen, ist ein effizientes Planungs- und Dispositionsmanagement essenziell. Ein Blick in die Praxis zeigt, dass hierfür vor allem drei Hebel in Frage kommen:

- der Einsatz von Software zur effektiven Schmelzplanoptimierung, um die Logistik zu beherrschen und den Energieverbrauch zu senken,
- in Kombination mit einer präzisen Vorhersage des Energie- und Materialverbrauchs sowie
- untertägigem Energiehandel, um die für die Produktionsprozesse jeweils benötigte Energie punktgenau bereitzustellen und dafür kurzfristig günstig erneuerbare Energie dazuzukaufen oder gewinnbringend zu verkaufen.

Produktion muss Energiemanagement folgen

Der Hintergrund: Die wasserstoffbasierte Stahlproduktion bedarf deutlich mehr elektrischer Energie als die konventionelle Herstellung. Pro Tonne erfordert z. B. der Betrieb eines Elektrostahlwerks eine zusätzliche Menge von 310 bis 640 kWh, je nach Schrott- und DRI-Mix, DRI-Temperatur sowie spezifischer Schlackenmasse. Hinzu kommt, dass auch andere Industrien fossile durch regenerative elektrische Energie

ersetzen werden, so dass die Nachfrage erheblich steigen und dies die Preise treiben wird. Energieeffizienz ist folglich ein zentraler Faktor für die Wirtschaftlichkeit und Wettbewerbsfähigkeit grüner Stahlproduktion (**Tabelle**). Nicht zuletzt müssen sich Unternehmen in diesem Kontext auf die Einspeisevolatilität der Wind- und Solarenergie einstellen. Das heißt, dass der Verbrauch in Zukunft der Verfügbarkeit folgen muss, während sich die Schwankungen gleichzeitig direkt auf die Energiepreise auswirken. Unternehmen sind in diesem Kontext gefordert, in ihre Planungen auch Prognosen zur verfügbaren Energie sowie zur Nachfrage zu berücksichtigen. Sind sie dazu in der Lage, in Zeiten niedriger Marktpreise flexibel zu produzieren, können sie erhebliche Kosten sparen. Neben der effizienten Produktionssteuerung wird zusätzlich ein steuerndes Energiemanagement notwendig.

KI-gestützte Schmelzplanoptimierung

Eine wichtige Stellschraube für einen nachhaltigen Herstellungsprozess ist die Schmelzplanoptimierung, die das Stahlwerk minutiös taktet und so u. a. hilft, Sequenzunterbrechungen zu vermeiden. Denn schon kürzeste Stillstände führen zu Durchsatzproblemen und zu gesteigertem Energieverbrauch durch

Tabelle: Die favorisierte, wasserstoffbasierte Herstellung von Stahl bedarf deutlich mehr elektrischer Energie als der konventionelle Ansatz. Energieeffizienz ist folglich ein zentraler Faktor für die Wirtschaftlichkeit und Wettbewerbsfähigkeit „grüner Stahlproduktion“ [Quelle: CO₂-Emissionen und Energieintensität nach Produktionsverfahren im Jahr 2021]

	CO ₂ -Emissionsintensität nach Produktionsweg in Tonnen CO ₂ pro Tonne Rohstahl	Energieintensität nach Produktionsweg in GJ pro Tonne Rohstahlguss
Globaler Durchschnitt	1.91	21.31
BF-BOF	2.32	24.43
Schrott-EAF	0.67	10.04
DRI-EAF	1.65	25.29

Daten über die weltweite Rohstahlproduktion unter Verwendung von DRI werden derzeit nicht erhoben; der Nenner in dieser Berechnung vom Worldsteel-Datenverwaltungsteam auf der Grundlage von Informationen aus den Worldsteel-Sammeldatenbanken berechnet.

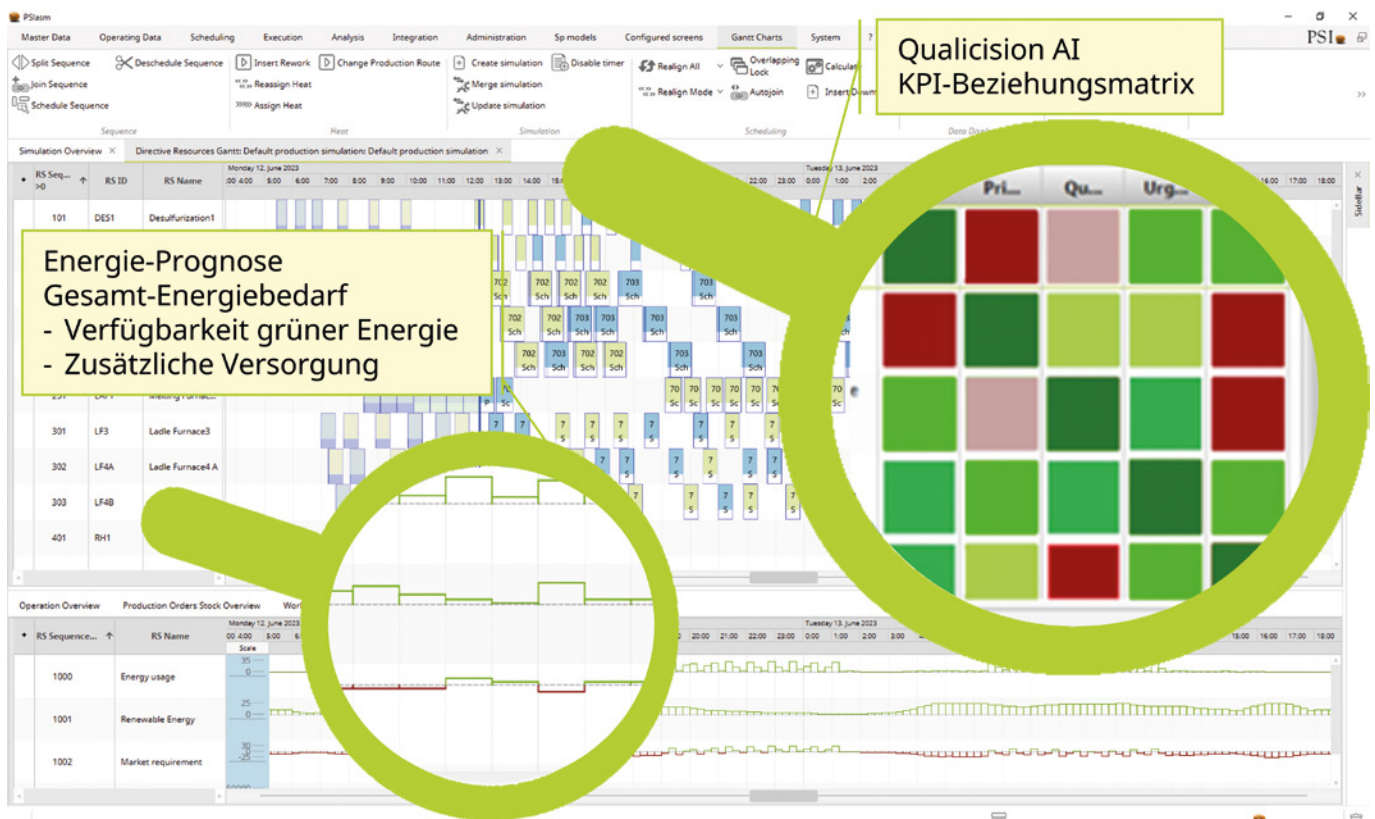


Bild 2: Der PSImetals Online Heat Scheduler visualisiert den Zusammenhang zwischen Energie-Prognose, Gesamt-Energiebedarf und Qualicision AI-basierter KPI-Beziehungsmatrix. Die Matrix zeigt die wechselseitigen Abhängigkeiten zwischen den KPIs [Quelle: PSI Metals GmbH]

höhere Abstichtemperaturen oder zusätzliches Heizen. Ein entsprechendes Modul zur Schmelzplanoptimierung hat z. B. der Berliner Softwarehersteller PSI Metals gemeinsam mit dem Schwesterunternehmen PSI FLS Fuzzy Logik & Neuro Systeme in seine Produktionsmanagementlösung integriert. Im Zusammenspiel mit dem Basissystem berechnet der Qualicision Online Heat Scheduler kontinuierlich ausbalancierte Arbeitspläne für jede Schmelze. Den Kern dieses Moduls bilden eine KI-basierte Entscheidungsunterstützung auf Basis frei definierbarer und flexibel priorisierbarer Leistungskennzahlen (Key Performance Indicators, KPIs) sowie Qualitatives Labeln (**Infokasten**).

Reduzierter Energieverbrauch

Bei der Erstellung optimierter Schmelzpläne müssen unterstützende IT-Lösungen sehr viele Einflussfaktoren einbeziehen, die für die Produktion von CO₂-unbedenklichem, grünen Stahl entscheidend sind. Insbesondere Bedarfs- und Verfügbarkeitsprognosen verschiedener Einsatzstoffe und benötigter Energie sowie exakte Informationen zur Transportlogistik zählen in einem hybriden Stahlwerk zu den wichtigsten Kennzahlen für die Planung und Disposition der Anlagen. Der Online Heat Scheduler des Produktions-Managementsystems PSImetals wurde um die Qualicision AI-Funktionalität erweitert und berechnet z. B. alle erforderlichen Behandlungs- und Transportschritte mit deren Dauern, definiert die optimalen Start- und Endzeitpunkte, ordnet die passenden Anlagen und verfügbaren Betriebsmittel zu und balanciert automatisch Zielkonflikte aus. In Echtzeit berücksichtigt das System zudem Änderungen und

INFO

Qualitatives Labeln von Prozessdaten mit Qualicision AI

Lernende KI-Verfahren für die Optimierung von Geschäftsprozessen und echtzeitfähige Entscheidungsunterstützung benötigen automatisiert aufbereitete Daten. Das heißt, ihnen muss bereits vor dem Lernvorgang eine Bedeutung zugeordnet werden. Denn anders als z. B. bei der Spracherkennung entstehen hier kontinuierlich neue Datenmuster, die laufend nachgelernt werden müssen. Dies kann nur per Software und automatisch erfolgen.

Das Qualitative Labeln ist ein solches Verfahren. Mit seiner Hilfe lassen sich in historisierten und aktuellen Daten automatisch mittels Zielkonfliktanalyse Zusammenhänge erkennen – und zwar in Form selbstberechneter Klassen von Datenmustern, die Anwenderinnen und Anwendern zur Bestätigung oder zur Korrektur präsentiert werden. Qualitativ gelabelte Daten schlagen folglich eine Brücke zwischen Datenmustern in den Rohdaten und ihrer Bedeutung in der realen Welt des betreffenden Prozesses. So schaffen sie die Voraussetzung für eine kontinuierliche Prozessverbesserung in Kombination mit qualitativen, optimierungsbasierten KI-Verfahren (Qualicision AI).

Verzögerungen, wodurch Schmelzen einer Sequenz immer zum geplanten Zeitpunkt und mit der erforderlichen Temperatur übergeben werden. Der Bediener kann zudem verschiedene

Szenarien simulieren und vergleichen, um die richtige Lösung für ein Problem herauszufiltern. So kann er z. B. Arbeitsschritte hinzufügen, Schmelzsequenzen ändern oder Behandlungs-, Transport- ebenso wie Pufferzeiten verkürzen. Insbesondere die zeitliche Optimierung hat erhebliche Auswirkungen auf die Reduzierung des Energieverbrauchs und damit auf den CO₂-Fußabdruck. Das Ergebnis: optimierte Sequenzen, ideale Abstichtemperaturen, reduzierte Pufferzeiten sowie weniger Ressourceneinsatz- und Energieverbrauch.

Akkurat ausbalancierte Energieverbrauchsprognosen

Die Produktion klimafreundlichen Stahls – insbesondere auch in den Übergangsjahren im Hybrid-Betrieb – ist untrennbar verbunden mit einer präzisen Planung und Terminierung des Energieverbrauchs. Planung und Energiebedarfsprognose müssen also eng miteinander verknüpft werden, um die Produktion an Verfügbarkeit und Preis auszurichten und gleichzeitig die Prognosen an Energiemanagement-Systeme oder Energielieferanten übermitteln zu können. Nur so lässt sich zudem ein stabiles Stromnetz – und zwar sowohl für das Werk als auch für das gesamte Übergangs- und Verteilungsnetz sicherstellen. Um den Energiebedarf eines Stahlwerks erfolgreich vorherzusagen zu können, müssen die wichtigsten energieverbrauchenden Prozesse bekannt sein (**Bild 2**). Für Prozesse mit konstantem Energieverbrauch ist eine Vorhersage einfach. Bei Prozessen mit schwankendem Energieverbrauch hängt der Energiebedarf hingegen von den Produkten und Prozessparametern der Produktionslinien sowie vor allem auch vom Zeitgerüst ab. Hierfür ermittelt der Qualicision Online Heat Scheduler grundlegende Daten: Er berechnet die benötigte Energie pro Produktion und Produktionsphase unter Ein-

beziehung des aktuellen Produktionszeitpunkts – für Prozesse mit gleichbleibendem ebenso wie mit schwankendem Energiebedarf. Entscheidend ist hierbei vor allem die automatisierte, kontinuierliche Anpassung der Produktionspläne unter Berücksichtigung der Verfügbarkeit von Anlagen sowie Ressourcen wie z. B. Roheisen, DRI oder Energie. Dazu prognostiziert der Qualicision Online Heat Scheduler auch diese weiteren, sogenannten „secondary Resources“, basierend auf qualitätsabhängigem Einsatzmix bzw. Energieverbrauch. In der Praxis kann ein Planer im Zuge der Produktionsfreigabe des mit dem Qualicision Online Heat Scheduler optimierten Produktionsplans auch sofort die Energiebedarfsprognose für die Energiebeschaffung übermitteln. Eine Anpassung der Bedarfsprognosen erfolgt automatisch mit jeder Neuberechnung des Produktionsplans in Folge des Produktionsfortschritts oder – bei notwendigen Veränderungen – in Folge von Störungen bzw. Unterbrechungen.

Optimierte Energiebeschaffung

Darüber hinaus muss es das Ziel sein, bei steigenden und volatilen Strompreisen durch eine engere Zusammenarbeit zwischen Energieplanung und -beschaffung Kosten zu sparen und so die Wettbewerbsfähigkeit zu sichern oder sogar zu erhöhen. Industrielle Verbraucher kaufen elektrische Energie in der Regel auf der Grundlage einer Mischung aus lang- und mittelfristigen Verträgen und unter Berücksichtigung selbst erzeugter Energie (**Bild 3**). Der tagesaktuelle und untertägige Energiehandel spielt heute bei vielen industriellen Stromverbrauchern nur noch eine untergeordnete Rolle. Mit der Umstellung der Stahlindustrie auf Green DRI und evtl. Elektrostahlroute benötigen die Werke deutlich mehr Strom und

Industrielle Verbraucher beschaffen Energie auf der Grundlage eines Mixes

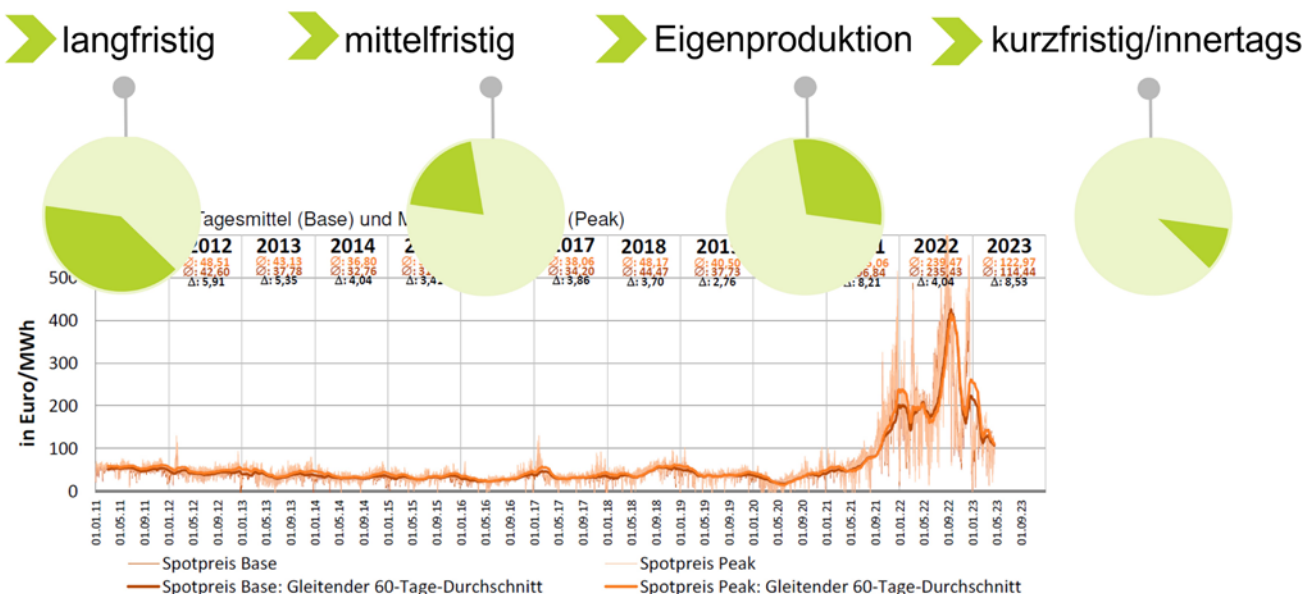


Bild 3: Die Darstellung der historischen Entwicklung des Spotpreises und der Anteile der Energiebeschaffung an den verschiedenen Beschaffungskategorien verdeutlicht die Dringlichkeit, auch die Energiehandelsstrategien anzupassen (Quelle: PSI Metals GmbH)

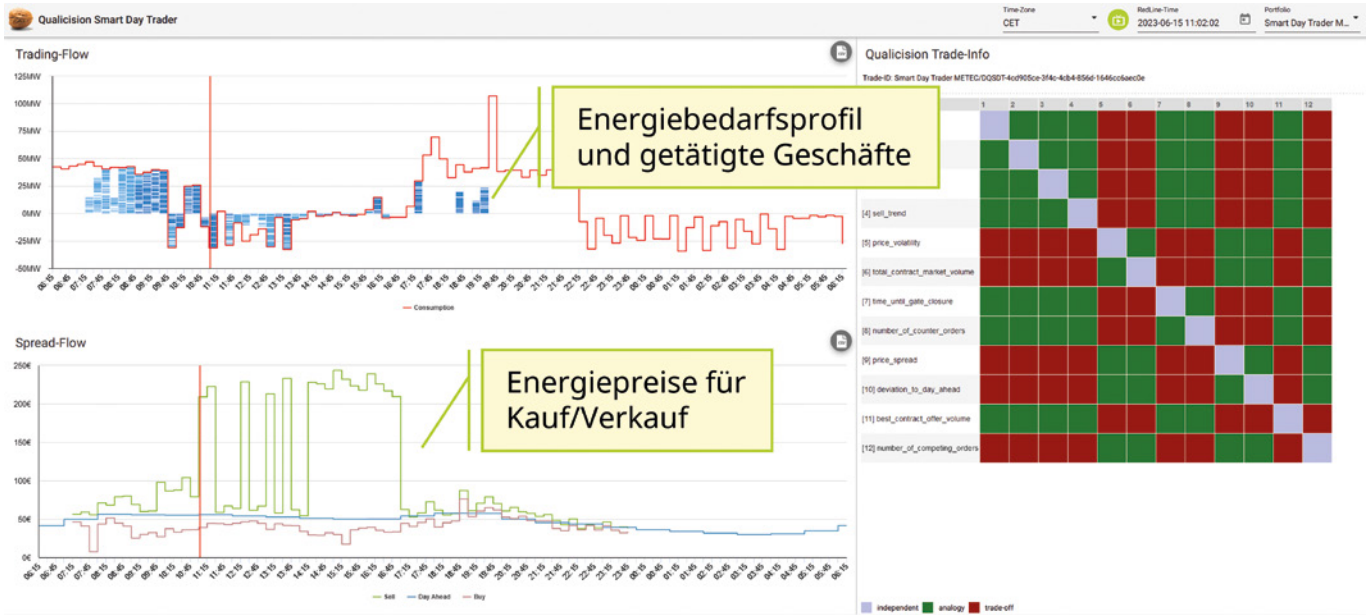


Bild 4: Das Dashboard des Qualicision Smart Day Trader stellt offene Positionen, getätigte Kontrakte sowie die korrespondierende Marktpreis-Situation und die Qualicision AI-basierte KPI-Beziehungsmatrix dar [Quelle: PSI Energy Markets]

produzieren gleichzeitig weniger eigene Energie. Auch hier sehen die Unternehmen einem zentralen Änderungsprozess entgegen: der Anpassung ihrer Energiehandels-Strategie. Klassische Konzepte zielen im Kern darauf ab, langfristig ein Grundniveau an Energie zu beschaffen. Als Basis für die Berechnung dienen Absatzprognosen, zu erwartende Produktionszeiten sowie Schichtmodelle für die relevanten Produktionslinien und -wege. Mittelfristig werden die Prognosen durch bestätigte Kundenaufträge ersetzt und die Energiebeschaffung auf die genaue Schichtplanung pro Produktionslinie abgestimmt. Den aktuellen Begebenheiten wird diese Herangehensweise nicht mehr gerecht – weder in Hinblick auf kurzfristige Änderungen in der Produktion, die mit deutlich höheren Schwankungen beim Energiebedarf verbunden sind, noch in Bezug auf die Verfügbarkeit regenerativer Energie und die damit einhergehenden steigenden und volatilen Strompreise. Das trifft z. B. auf die erforderliche Unterbrechung einer längeren Gießsequenz zu. In der Regel ist in der Folge eine Neueinstellung der Gießanlage erforderlich, die etwa 45 Minuten in Anspruch nimmt. In dieser Zeit muss einerseits die erzeugte Schmelze warmgehalten werden, andererseits verzögern sich alle weiteren Sequenzen um die Dauer der Umrüstungszeit der Anlage. Dies hat enorme Auswirkungen auf den Energiebedarf pro Zeitfenster – bzw. das aktualisierte Energiebedarfsprofil unterscheidet sich erheblich von der Prognose, auf deren Basis die Energie beschafft wurde.

Mittels Intraday-Handel effizient Energielücken schließen

Ändert sich die Vorhersage aufgrund bestimmter Faktoren während des Tages, ist die Lücke zwischen tatsächlichem Energiebedarf und beschaffter Energiemenge besonders groß. Dabei kann der Energiebedarf höher (positive Differenz) oder niedriger (negative Differenz) sein als die beschaffte Energiemenge. Diese Diskrepanzen lassen sich mittels Intraday-Handel, bzw. mit einem täglichen Energieaustausch, ausgleichen. Erste Unternehmen setzen hierfür auf spezialisierte Software,

die automatisch Handelsmöglichkeiten ermittelt und ausführt, um die Energielücken zu schließen und die dadurch nicht nur den Energiebedarf exakt deckt, sondern möglichst auch Handelsgewinne erzielt.

Der PSImarket Qualicision Smart Day Trader etwa nutzt komplexe qualitativ gelabelte KI-Algorithmen, technische Indikatoren und statistische Modelle zur KI-basierten Optimierung des Kurzfristhandels. Die automatisierten Handlungsfunktionen basieren auf Strategien, Regeln und Bedingungen, welche die Unternehmen im Vorfeld flexibel definieren. Eine Regel kann z. B. lauten: Kaufe immer dann, wenn der Gebotspreis möglichst weit unter dem mittleren Produkt-Preis liegt, verkaufe zu möglichst hohen Preisen. Standard ist auch die folgende Regel: Schließe die offenen Positionen nach Möglichkeit vollständig bis zu der (zuvor) definierten Zeit. Jede Regel wird anschließend in Kennzahlen (Key Performance Indicators, KPIs) gegossen, die das System kontinuierlich für jede Marktorder berechnet und prüft. Auf diese Weise liefert es die Basis, um optimierte Handelsentscheidungen treffen zu können (**Bild 4**).

Mit Grünstrom-Zertifizierung ökologische Handelsentscheidungen treffen

Ein wesentlicher Vorteil von entsprechenden Systemen ist darüber hinaus, dass sich durch ihren Einsatz auch kurzfristige Änderungen effizient ausgleichen lassen und so auch hier für die erforderliche Balance zwischen Ökonomie und Ökologie gesorgt ist. Weil derzeit allerdings noch keine Grünstrom-Zertifizierung an den Kurzfristmärkten existiert, verliert der Grünstrom hier noch seine Öko-Qualität und wird gemeinsam mit der konventionellen Elektroenergie zu anonymem Graustrom. Fest steht aber schon heute: Mit Erweiterung der Handelsmärkte um eine solche zusätzliche Kennzeichnung der Gebote, kann das System den ökologischen Aspekt bei Handelsentscheidungen durch eine zusätzliche Qualicision-KPI ebenfalls berücksichtigen. In Summe können Unternehmen mithilfe einer integrierten

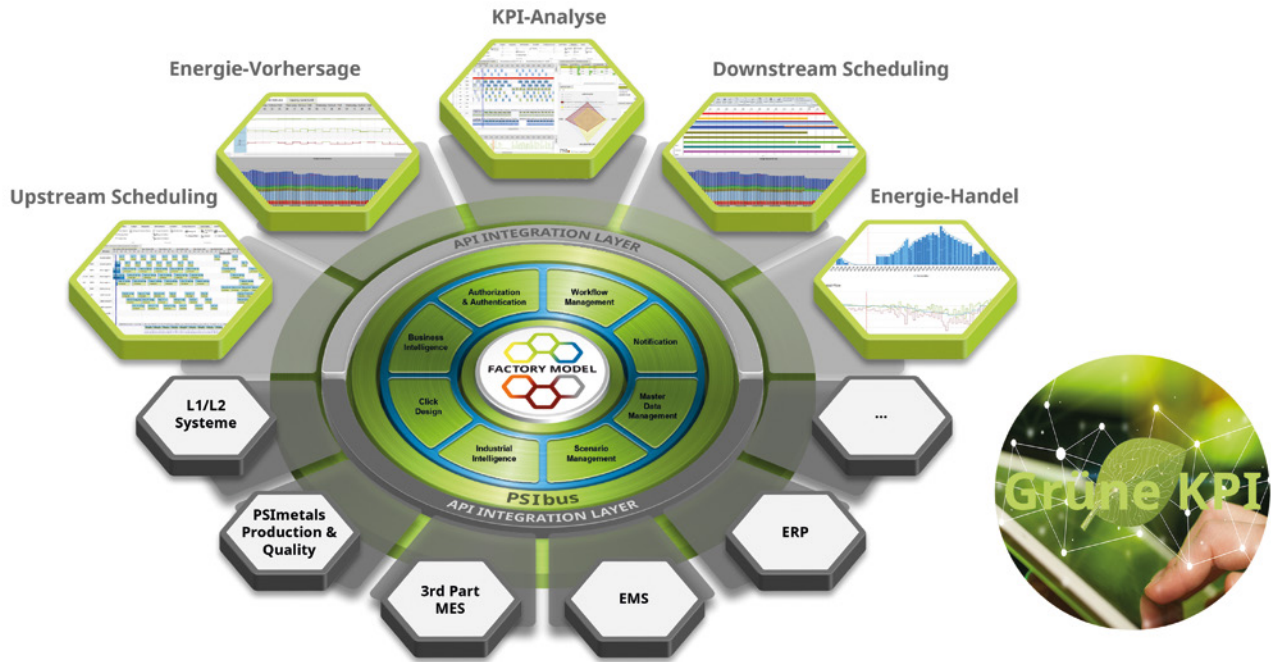


Bild 5: Stahlproduzenten sind zukünftig auf System-Plattformen angewiesen, die Produktionsfeinplanung, Energiemanagement und Energiehandel integriert abbilden [Quelle: PSI Metals GmbH]

Produktions- und Energiemanagementlösung die Komplexität der „grünen Stahlproduktion“ beherrschen und Entscheidungen treffen, die ökologische, technische sowie wirtschaftliche Ziele gleichermaßen berücksichtigt.

Lückenloses Zusammenspiel schafft Vorteile

Der Umbau zur „grünen Stahlproduktion“ ist alternativlos – ebenso der Einsatz eines effizienten Planungs- und Dispositionsmanagements. Um die Komplexität in der Umstellungsphase im Hybrid-Betrieb und darüber hinaus zu beherrschen, wird es vor allem darauf ankommen, Produktionsplanung inklusive Schmelzplänen, Energieverbrauch und Energiehandel zu optimieren. Dabei werden Unternehmen insbesondere von Lösungen profitieren, die schon heute auf einer integrierten Systemplattform (**Bild 5**) basieren, die das lückenlose Zusammenspiel dieser drei Schlüsselaspekte ermöglicht.

Autoren

Dr. Rudolf Felix

Geschäftsführer
PSI FLS Fuzzy Logik & Neuro Systeme GmbH, Dortmund
Tel.: +49 231/9700921
E-Mail: rfelix@psi.de
www.qualicision.ai

Heinz-Josef Ponten

Product Manager PSImetals Liquid & Energy
PSI Metals GmbH, Düsseldorf

Tel.: +49 211/60219-0
E-Mail: hjponten@psi.de
www.psimetals.de

Michael Haischer

Geschäftsführer
PSI Energy-Markets, Hannover
Tel.: +49 172 / 810 8660
E-Mail: mhaischer@psi.de
www.psi-energymarkets.de

Peter Bachmann

Strategisches Produktmanagement
PSI Energy-Markets, Hannover
Tel.: +49 170/4156114
E-Mail: pbachmann@psi.de
www.psi-energymarkets.de

Literatur

- [1] Green Hydrogen-Based Direct Reduction for Low-Carbon Steel-making, Katharina Rechberger et al., 2020, <https://doi.org/10.1002/srin.202000110>
- [2] Daten über die weltweite Rohstahlproduktion unter Verwendung von DRI werden derzeit nicht erhoben; der Nenner in dieser Berechnung vom Worldsteel-Datenverwaltungsteam auf der Grundlage von Informationen aus den Worldsteel-Sammeldatenbanken berechnet.
- [3] <https://www.stefanschroeter.com/268-der-stromboersen-preis-wurde-mit-oekostrom-bestaendiger.html>