

2 Das Warmwalzen – ein energieintensiver Produktionsprozess im integrierten Hüttenwerk

Die Stahlherstellung umfasst vielfältige Produktionsprozesse, die vier Produktionsstufen zugeordnet werden: der Erzeugung flüssigen Stahls, der Urformgebung, der Umformung und der Oberflächenbehandlung. Sind mehrere Produktionsstufen (insbesondere die Stahlerzeugung auf Basis von Eisenerz, die Urformgebung und die Umformung) an einem Standort vereint, wird dieser als integriertes Hüttenwerk bezeichnet.¹¹ In integrierten Hüttenwerken finden sich des Weiteren Anlagen der Rohstoffaufbereitung wie Kokerei und Sinteranlage¹² und technische Anlagen, die nicht dem direkten Produktionsprozess zuzuordnen sind. Zu letztgenannten zählen Kraftwerke und Anlagen zur Verwertung von Kuppelprodukten wie Schlacken und Prozessgasen.

Dieses Kapitel widmet sich dem Warmwalzen als energieintensivem Umformungsprozess in der Stahlherstellung. Dazu gibt Abschnitt 2.1 zunächst einen Überblick über die Prozesse der Stahlherstellung und den damit zusammenhängenden Materialflüssen in integrierten Hüttenwerken. Anschließend wird in Abschnitt 2.2 die Bedeutung der Energieintensität der Stahlherstellung anhand der Energieverbräuche in integrierten Hüttenwerken aufgezeigt. Abschnitt 2.3 betrachtet die Charakteristika des Warmwalzprozesses im Detail. So können in Abschnitt 2.4 Anforderungen an die Walzprogrammplanung abgeleitet werden.

2.1 Produktionsprozesse der Stahlherstellung in integrierten Hüttenwerken

In diesem Abschnitt erfolgt die Darstellung der Produktionsprozesse in integrierten Hüttenwerken am Beispiel der Flachstahlerzeugung.¹³ Als Flachstahl werden im Allgemeinen Produkte bezeichnet, die durch Warmwalzen von Brammen, anschließendes Kaltwalzen und ggf. weitere Bearbeitungsprozesse entstehen und überwiegend in der Produktion von Fahrzeugen und Haushaltsgeräten eingesetzt werden.¹⁴ Die Beschreibung der Produktionsprozesse gliedert sich anhand der vier Produktionsstufen der Stahlherstellung.

¹¹ Vgl. Garbracht et al. (1996), S. 127 und 130.

¹² In der Kokerei wird aus Kohle Koks für den Hochofeneinsatz hergestellt. Sinteranlagen dienen der Vorbehandlung von Erzen. Dabei werden Feinerze durch Erhitzen in Stückerze umgewandelt. Vgl. Stahlinstitut VDEh und Wirtschaftsvereinigung Stahl (2013), S. 24f und 21f.

¹³ Es gibt viele weitere Erzeugnisse, die durch Warmwalzen umgeformt werden (siehe Abbildung 1-1). Die zu durchlaufenden Produktionsstufen ähneln aber denen der Flachstahlerzeugung. Vgl. Stahlinstitut VDEh (2011), S. 185.

¹⁴ Vgl. Salzgitter AG (2016b).

Erzeugung flüssigen Stahls

Ziel der ersten Produktionsstufe ist die Erzeugung von flüssigem Stahl. Diese Produktionsstufe untergliedert sich in die Rohstahlherstellung und die Sekundärmetallurgie.

Bei der Rohstahlherstellung werden vier Verfahrensrouten unterschieden. Drei von ihnen basieren auf der Verarbeitung von Eisenerz. Dies sind die Koksmetallurgie, die Kohlemetallurgie und die Direktreduktionsmetallurgie. Die vierte Verfahrensrouten basiert auf der Verarbeitung von Schrott und wird daher auch Schrottmetallurgie genannt. Aufgrund ihrer Bedeutung wird die Koksmetallurgie hier detaillierter beschrieben.¹⁵

Die Koksmetallurgie umfasst zwei Produktionsprozesse, den Hochofenprozess und den Konverterprozess. Im Hochofen wird Eisenerz unter Zugabe von Koks und Zuschlägen bei sehr hohen Temperaturen aufgeschmolzen und reduziert¹⁶. Als Ergebnis entstehen flüssiges Roheisen sowie Schlacke¹⁷ und Hochofengas (Gichtgas) als Kuppelprodukte.¹⁸ Der sich im Stahlwerk anschließende Konverterprozess wird auch als Sauerstofffrischen bezeichnet. Dabei werden unerwünschte Begleitelemente in dem flüssigen Roheisen durch Aufblasen von Sauerstoff oxidiert. Durch die Zugabe von Zuschlägen werden die Elemente in der Schlacke gebunden. Außerdem werden Schrott und Legierungsmittel hinzugefügt. Sie dienen der Kühlung und groben Einstellung der Zusammensetzung des entstehenden Rohstahls. Neben dem Rohstahl und der Schlacke entsteht Konvertergas als Kuppelprodukt.¹⁹

Unabhängig von der gewählten Verfahrensrouten bei der Rohstahlherstellung wird der erzeugte Rohstahl anschließend in der Sekundärmetallurgie behandelt. Die Sekundärmetallurgie umfasst mehrere Prozesse. Hierzu gehören das Entfernen überschüssigen Sauerstoffs und anderer Elemente, die Zugabe von Legierungsmitteln, die Temperaturhomogenisierung und das Einstellen des Gehalts gelöster Gase. Auf diese Weise werden die gewünschten Werkstoffeigenschaften, z. B. die Festigkeit und Zähigkeit, eingestellt. Das Ergebnis ist flüssiger Stahl, der hinsichtlich einer bestimmten Güte legiert ist. In Stahlpfannen wird dieser zur nächsten Produktionsstufe, der Urformgebung, transportiert.²⁰

Urformgebung

Das wesentliche Prinzip der zweiten Produktionsstufe der Stahlherstellung ist das Gießen flüssigen Stahls zu einer ersten festen Form. Für die Flachstahlherstellung sind kontinuierliche Gießverfahren²¹

¹⁵ Vgl. Stahlinstitut VDEh (2011), S. 27ff. Ein Stahlwerk, das Stahl ausschließlich aus Schrott erzeugt, fällt nicht unter die Definition eines integrierten Hüttenwerks.

¹⁶ Der Begriff Reduktion bezeichnet den Entzug von Sauerstoff.

¹⁷ Die Schlacke enthält die Zuschläge und Verunreinigungen aus dem Eisenerz.

¹⁸ Vgl. Stahlinstitut VDEh (2011), S. 30ff., Taube (1998), S. 62ff.

¹⁹ Vgl. Stahlinstitut VDEh (2011), S. 53ff., Taube (1998), S. 169ff.

²⁰ Vgl. Stahlinstitut VDEh (2011), S. 69ff.

²¹ Neben den kontinuierlichen gibt es auch diskontinuierliche Gießverfahren wie den Blockguss. Dieser ist aber von geringer Bedeutung und wird heute hauptsächlich zur Herstellung von Schmiedestücken eingesetzt. Vgl. Stahlinstitut VDEh (2011), S. 87f.

relevant. Zu ihnen gehören das konventionelle Stranggießen sowie endabmessungsnahe Gießverfahren.

Beim Stranggießen wird der flüssige Stahl in einen Verteiler gegeben. Von dort aus läuft er in eine wassergekühlte Kokille. Die Wasserkühlung sorgt dafür, dass der Stahl an der Oberfläche erstarrt und eine Strangschale ausbildet. Um das Aufbrechen dieser Schale zu vermeiden, wird der Strang von Rollen gestützt aus der Kokille geführt. Nach dem vollständigen Erstarren des Strangs wird dieser durch Schneidbrenner oder Scheren in einzelne Stücke geteilt. Je nach Anlage sind unterschiedliche Querschnitte des Strangs möglich. Zur Flachstahlherstellung werden vorrangig rechteckige Halbzeuge erzeugt, die ungefähr eine Dicke von 250 mm aufweisen. Sie werden als Brammen bezeichnet.²²

Das endabmessungsnahe Gießen unterscheidet sich vom Stranggießen zum einen durch eine geringere Gießdicke. Zum anderen schließt sich zusätzlich ein Walzvorgang an der gleichen Anlage an. Aufgrund dessen werden die verwendeten Anlagen auch als Gießwalzanlagen bezeichnet. In Abhängigkeit von der Gießdicke werden drei Verfahren unterschieden: das Dünnbrammengießen, das Vorbandgießen und das Bandgießen. Beim Dünnbrammengießen werden Dünnbrammen mit Dicken von 50-90 mm erzeugt. Diese werden durch einen Durchlaufofen geführt und passieren anschließend mehrere Walzgerüste. Das Vorbandgießen wird auch als Direct Strip Casting bezeichnet. Dabei wird ein Vorband mit Dicken von 10-15 mm erzeugt. Dieses geht ebenfalls über einen Ausgleichsofen zu den Walzgerüsten. Zum Bandgießen wird beispielsweise das Twin-Roll-Casting eingesetzt.²³ Hierbei wird der flüssige Stahl direkt zwischen zwei großen gekühlten Walzrollen abgegossen. Dabei entsteht ein Band mit 1-5 mm Dicke.²⁴

Mit Abstand am weitesten verbreitet ist jedoch das Stranggießen.²⁵ An Stranggießanlagen erzeugte Brammen werden über Straßen oder Schienen zum Warmwalzwerk bzw. in das davor liegende Brammenlager transportiert. Aus Materialflusssicht kommt dem Brammenlager im integrierten Hüttenwerk eine große Bedeutung zu. Die von den Stranggießanlagen produzierten Brammen können aufgrund unterschiedlicher technologischer Restriktionen i. d. R. nicht synchron beim Walzen eingesetzt werden. Das Brammenlager dient somit sowohl der zeitlichen Entkopplung der Prozesse als auch der Umsortierung der zu bearbeitenden Halbzeuge.

²² Vgl. Stahlinstitut VDEh (2011), S. 78ff., Taube (1998), S. 193ff.

²³ Alternativ zu diesem Verfahren wird das horizontale Bandgießen (Belt Casting Technology) erprobt. Vgl. Salzgitter AG (2016a).

²⁴ Vgl. Stahlinstitut VDEh (2011), S. 83ff. Unter den Gießwalzanlagen gibt es Anlagen, die auf einen unterbrechungsfreien Prozess ausgerichtet sind, wie z. B. die ESP-Anlagen (engl.: Endless Strip Production) der Firma Averbil, vgl. Jungbauer et al. (2014).

²⁵ Im Jahr 2014 wurden 95,9 % des produzierten Rohstahls im Stranggießverfahren gegossen. Vgl. World Steel Association (2015), S. 12.

Umformung

Die dritte Produktionsstufe der Stahlherstellung ist die Umformung. Die wesentlichen Umformverfahren zu Herstellung von Flachstahlprodukten sind das Walzen und das Schneiden. Beim Walzen, genauer gesagt dem Längswalzen, wird das Halbzeug in Richtung seiner Längsachse zwischen übereinander stehenden Arbeitswalzen hindurchgeführt. Dabei wird seine Dicke durch Druckumformung reduziert.²⁶ Zweck des Walzens ist neben der Dimensionsänderung die Gefügeänderung. Je nach Art der Gefügeänderung wird zwischen Warmwalzen und Kaltwalzen unterschieden.²⁷

Beim Warmwalzen werden Brammen in Durchlauföfen auf ca. 1.250 °C erwärmt. Das Walzen in der Walzstraße findet bei 800-1.150 °C statt. Die hohe Temperatur verringert den Formänderungswiderstand und ermöglicht die Rekristallisation des durch die Druckumformung zerstörten Kristallgefüges im Stahl. Das entstehende Stahlband wird am Ende des Prozesses zu einem Coil aufgewickelt. In Anlehnung an den Produktionsprozess wird das Produkt (ungebeiztes) Warmband genannt. Es kann als erstes Endprodukt der Flachstahlherstellung am Markt abgesetzt werden.²⁸ Ansonsten durchläuft das Warmband den Beizprozess, der bei der Oberflächenbehandlung beschrieben wird, und wird daran anschließend zumeist im Kaltwalzwerk eingesetzt.²⁹

Das Kaltwalzen ermöglicht Eigenschaften, die durch das Warmwalzen nicht erreicht werden. Hierzu zählen eine geringere Dicke sowie eine höhere Oberflächenqualität und Abmessungsgenauigkeit. Das Kaltwalzen umfasst mehrere Prozessschritte. So schließen sich an das eigentliche Walzen i. d. R. das Glühen und Dressieren an. Das Walzen erfolgt entweder kontinuierlich an einer Tandemstraße oder über Reversiergerüste. Die Walzdicken liegen überwiegend bei 0,4-3,0 mm. Da zuvor keine Erwärmung stattfindet und die Umformung somit unterhalb der Rekristallisationstemperatur erfolgt, kommt es zu einer Verzerrung und Verfestigung des Kristallgefüges im Stahl. Das anschließende Glühen ermöglicht die Rekristallisation. Das Dressieren ist ein abschließendes Kaltnachwalzen. Dabei findet kaum noch eine Dickenreduktion statt. Vielmehr dient das Dressieren der Verfestigung und Einstellung der Oberflächenstruktur. Das aus dem Kaltwalzen hervorgehende Endprodukt der Flachstahlherstellung wird als kaltgewalztes Feinblech bezeichnet.³⁰

Das Schneiden ist als Umformprozess an unterschiedlichen Stellen in der Flachstahlproduktion zu finden. Zum einen werden die Ränder von Stahlbändern besäumt. Zum anderen werden diese durch Längs- oder Querteilen bedarfsgerecht zu Bandstahl oder Tafeln verarbeitet.³¹

²⁶ Es resultiert eine Streckung in Längsrichtung sowie eine freie Breitung. Vgl. Stahlinstitut VDEh (2011), S. 95.

²⁷ Vgl. Stahlinstitut VDEh (2011), S. 92f.

²⁸ Ungebeiztes Warmband wird vor allem zur Herstellung von Rohren eingesetzt.

²⁹ Vgl. Stahlinstitut VDEh (2011) S. 93.

³⁰ Vgl. Stahlinstitut VDEh (2011), S. 93 und S. 120, Wirtschaftsvereinigung Stahl und Stahlinstitut VDEh (2016d).

³¹ Vgl. Stahlinstitut VDEh (2011), S. 128.

Oberflächenbehandlung

Die vierte Stufe der Stahlherstellung umfasst die Prozesse der Oberflächenbehandlung. Ein wesentlicher Prozess ist das Beizen von Warmband. Beim Beizen wird das Warmband durch eine Beizsäure geführt und der darauf befindliche Zunder³² wird abgetragen. Die Bänder werden einzeln in Schubbeizen oder zusammengeschweißt in kontinuierlichen Beizlinien behandelt. Das daraus hervorgehende Produkt ist das gebeizte Warmband.

Weitere Prozesse der Oberflächenbehandlung dienen dem Korrosionsschutz und der Veränderung der Oberflächenoptik. Bei der Herstellung von Flachstahlprodukten lassen sich drei wesentliche Verfahren unterscheiden: Bei der Schmelztauchbeschichtung und der elektrolytischen Beschichtung werden metallische Beschichtungsstoffe eingesetzt. Dahingegen kommen bei der Bandbeschichtung organische Beschichtungsstoffe zum Einsatz. Alle Verfahren laufen kontinuierlich. Das heißt, die Bänder werden für die Behandlung zusammengeschweißt und hinterher wieder geteilt und aufgewickelt.

Die Bänder für die Schmelztauchbeschichtung kommen direkt vom Kaltwalzen. Sie werden in Durchlauföfen rekristallisierend geglüht und anschließend durch ein Bad mit erschmolzenem Metall geführt. Die Beschichtungsdicke von 5-50 µm wird durch Abblasen des überschüssigen Materials eingestellt.³³

Bei der elektrolytischen Beschichtung wird geglühtes und dressiertes Band eingesetzt. Dieses wird zunächst gereinigt und dann durch ein elektrolytisches Bad geführt. Durch Anlegen von Strom lagert sich das Beschichtungsmetall auf der Bandoberfläche ab. Als Beschichtungsmaterial wird in integrierten Hüttenwerken typischerweise Zink eingesetzt.³⁴ Die Beschichtungsstärke lässt sich bei der elektrolytischen Beschichtung feiner einstellen als bei der Schmelztauchbeschichtung und beträgt 2,5-10 µm.³⁵

Bei der Bandbeschichtung wird eine organische Beschichtung aus Lack oder Folie aufgetragen. Das eingesetzte Stahlband ist entweder unbeschichtet oder hat schon eines der beiden anderen Verfahren durchlaufen. Es wird zunächst gereinigt und chemisch vorbehandelt. Anschließend wird der Beschichtungsstoff durch einen Coater auf das Band aufgebracht und eingebrannt. Alternativ wird das Band mit Folie laminiert. Die Beschichtungsdicke liegt bei 3-200 µm.³⁶

³² Zunder ist eine Eisenoxidschicht, die sich beim Erwärmen der Brammen im Warmwalzprozess ausbildet. Sie wird im Warmwalzwerk durch Presswasser beseitigt, vgl. Degner (2012), S. 31 und 33. Verbleibende Zunderückstände werden beim Beizen chemisch entfernt.

³³ Vgl. Wirtschaftsvereinigung Stahl und Stahlinstitut VDEh (2016b).

³⁴ Neben der elektrolytischen Verzinkung sei auch die elektrolytische Verzinnung erwähnt, vgl. Wirtschaftsvereinigung Stahl und Stahlinstitut VDEh (2016b). Dieses Verfahren ist jedoch eher in spezialisierten Werken zu finden, die z.B. auf die Herstellung von Dosen ausgerichtet sind. Je nach Beschichtungsmaterial ist gegebenenfalls eine Nachbehandlung, z.B. Erwärmen und Abschrecken, erforderlich.

³⁵ Vgl. Wirtschaftsvereinigung Stahl und Stahlinstitut VDEh (2016b).

³⁶ Vgl. Wirtschaftsvereinigung Stahl und Stahlinstitut VDEh (2016b).

Die Produktionsprozesse der Flachstahlproduktion sind in Abbildung 2-1 illustriert. Anhand dieses Überblicks über die Prozesse der Flachstahlproduktion wird deutlich, dass dem Warmwalzprozess eine zentrale Rolle zukommt. So durchläuft jedes Erzeugnis der Flachstahlproduktion den Warmwalzprozess, bevor sich die Prozessrouten entsprechend dem zu erzeugenden Endprodukt diversifizieren.³⁷ Damit bestimmt der beim Warmwalzen produzierte Produktmix auch die Materialversorgung nachfolgender Anlagen. Der Warmwalzprozess stellt also eine Drehscheibe im integrierten Hüttenwerk dar.

2.2 Energiebetrachtung in integrierten Hüttenwerken

Dass die Stahlindustrie als energieintensiv zu bezeichnen ist, wird anhand des spezifischen Primärenergieverbrauchs der Produkte deutlich. Dieser beträgt für Stahlfertigprodukte 19,5 GJ pro Tonne.³⁸ Rechnerisch entspricht demnach der jährliche Energieverbrauch eines beispielhaften Stahlwerks mit einer Jahresproduktion von vier Millionen Tonnen an Fertigprodukten dem jährlichen Energieverbrauch einer Stadt mit rund 482.000 Einwohnern.³⁹ Die Hauptenergieverbraucher unter den Produktionsanlagen sind in integrierten Hüttenwerken mit Koksmetallurgie der Hochofen, die Kokerei und das Warmwalzwerk.

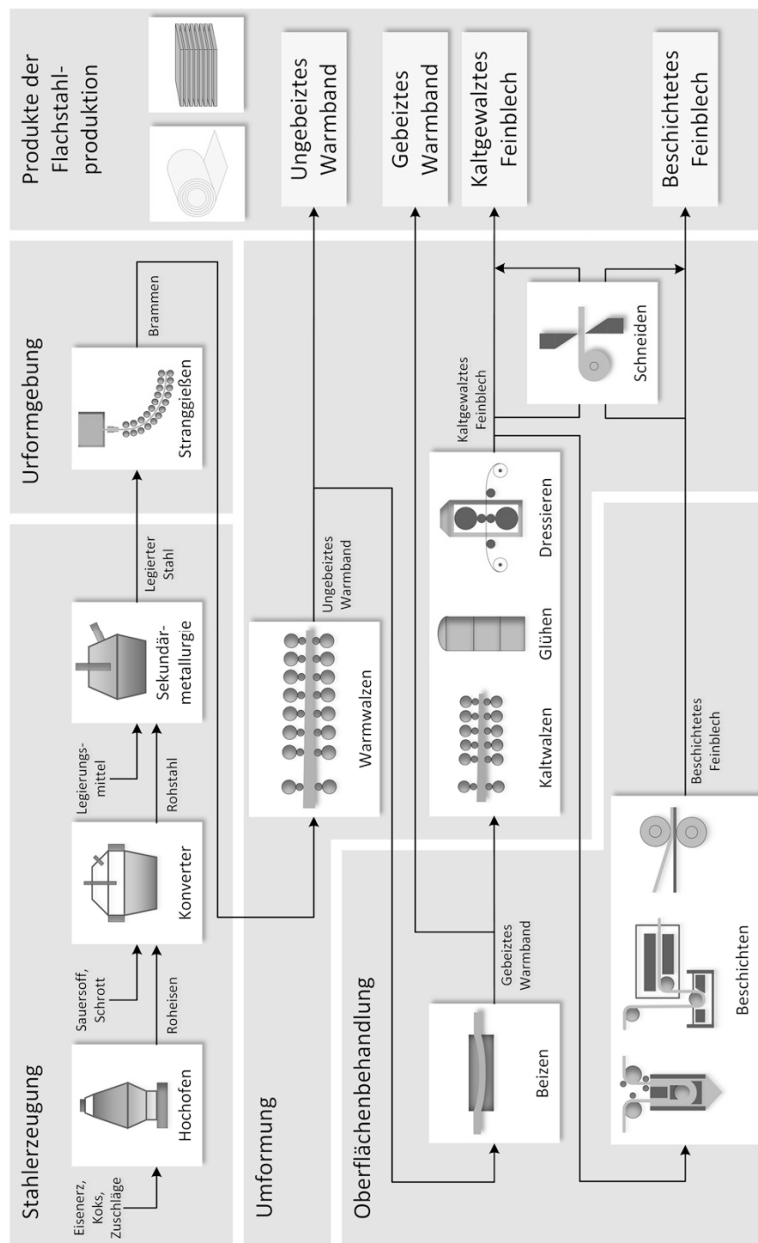
Aufgrund des hohen Energieverbrauchs, der hauptsächlich durch fossile Brennstoffe gedeckt wird, ist die Stahlindustrie ein bedeutender Emittent des Treibhausgases CO₂. So werden pro Tonne Stahlfertigprodukt 1,479 Tonnen CO₂ emittiert.³⁸ Dies entspricht den durchschnittlichen CO₂-Emissionen eines Mittelklasse-Pkw über eine Fahrstrecke von ca. 7.660 km.⁴⁰

³⁷ Aufgrund der Ähnlichkeit der Produktionsprozesse spielt das Warmwalzen auch für vielfältige weitere Produkte eine zentrale Rolle.

³⁸ Stahlfertigprodukte bezeichnen hier warmgewalzte Lang- und Flacherzeugnisse, sowie nahtlose Stahlrohre und Schmiedefertigerzeugnisse. Angaben gelten für 2014. Vgl. Stahlinstitut VDEh und Wirtschaftsvereinigung Stahl (2016), S. 19.

³⁹ Die Berechnung beruht auf dem jährlichen Pro-Kopf-Primärenergieverbrauch in Deutschland im Jahr 2014. Vgl. Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB) (2015), S. 1.3.

⁴⁰ Die Angabe beruht auf den Durchschnittsemissionen eines Fahrzeugs mit Otto-Motor, vgl. co2online (2016).

Abbildung 2-1 Produktionsprozesse der Flachstahlproduktion in integrierten Hüttenwerken⁴¹⁴¹ Eigene Darstellung in Anlehnung an Wichmann (2014), S. 10. Aufgezeigt sind die wichtigsten Prozessrouten.

Die CO₂-Emissionen rücken durch das Emissionshandelssystem der EU in den Fokus der stahlerzeugenden Unternehmen in Europa. In diesem wird die Stahlindustrie als carbon-leakage⁴² gefährdeter Industriezweig eingestuft. Als solche erhält sie kostenlos zugeteilte CO₂-Zertifikate, mit dem Ziel, potenzielle Nachteile gegenüber außereuropäischen Wettbewerbern auszugleichen. Die Zuteilung erfolgt auf Basis ehrgeiziger Richtwerte⁴³, die über die Zeit stetig verringert werden. In der Folge reichen die kostenlos zugeteilten Zertifikate in der aktuellen Handelsperiode nicht zur Bedienung der erwarteten Stahlproduktion.⁴⁴ CO₂-Zertifikate, die darüber hinaus benötigt werden, müssen zugekauft werden. Dazu kommt, dass gleichzeitig mit einem Preisanstieg der derzeit noch günstig gehandelten CO₂-Zertifikate zu rechnen ist. Grund hierfür ist im Wesentlichen die sukzessive Reduktion des in der EU insgesamt verfügbaren CO₂-Zertifikatevolumens. Zusammen mit dem emissionshandelsbedingten Strompreisanstieg drohen der Stahlindustrie Mehrkosten von bis zu einer Milliarde Euro jährlich.⁴⁵

Aus Unternehmenssicht existieren zwei wesentliche Ansätze, um den Verbrauch von Primärenergie-trägern und die CO₂-Emissionen zu reduzieren. Der erste Ansatz ist die Kreislaufführung von Prozessgasen und der zweite Ansatz ist die Verbesserung der Energieeffizienz von Einzelprozessen.

Bei der **Kreislaufführung von Prozessgasen** werden brennbare Gase, die als Kuppelprodukte in den Produktionsprozessen anfallen, wieder innerhalb des Hüttenwerks eingesetzt. In Abbildung 2-2 ist dies exemplarisch für das integrierte Hüttenwerk der Salzgitter Flachstahl GmbH im Jahr 2015 dargestellt. Die Abbildung zeigt, dass 86 % des Brenngaseinsatzes im Hüttenwerk durch Prozessgase abgedeckt werden, wohingegen 14 % durch extern zugekauftes Erdgas bereitgestellt werden. Lieferanten von Prozessgasen sind die Hochöfen, die Kokerei und die Konverter des Stahlwerks. Abnehmer von Prozessgasen in der Produktion sind die Hochöfen, die Kokerei und das Warmwalzwerk. Darüber hinaus anfallende Prozessgase, die nicht direkt in der Produktion verwendet werden, werden im Kraftwerk eingesetzt und dort größtenteils zur Stromerzeugung⁴⁶ genutzt.⁴⁷

⁴² Carbon Leakage bezeichnet die Verlagerung der industriellen Produktion in Länder mit weniger strengen CO₂-Emissionsvorgaben.

⁴³ Die Richtwerte sind produktbezogene Emissionswerte, die sogenannten Benchmarks. Sie entsprechen dem durchschnittlichen Emissionsausstoß der 10 % der effizientesten Anlagen eines Sektors in den Jahren 2007-2008. Vgl. Deutsche Emissionshandelsstelle (DEHSt) (2014), S. 14.

⁴⁴ Zudem wird auch erwartet, dass der vorgehaltene Bestand nicht genutzter CO₂-Zertifikate aus den Vorjahren bis 2017 abgebaut sein wird.

⁴⁵ Vgl. Wirtschaftsvereinigung Stahl (2016), S. 12, Kerkhoff und Theuringer (2016), S. 14.

⁴⁶ Neben der Stromerzeugung können Prozessgase in Kraftwerken auch zur Erzeugung von Prozessdampf für die Produktion oder zur Bereitstellung von Fernwärme genutzt werden.

⁴⁷ Vgl. Stahlinstitut VDEh (2011), S. 157, Remus et al. (2013), S. 19ff, Reichel et al. (2016), S. 46f.

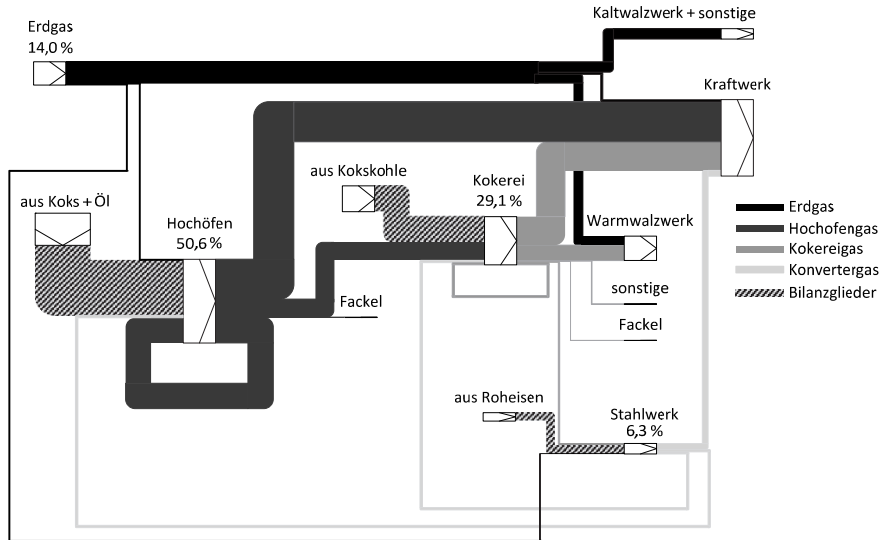


Abbildung 2-2 Entstehung und Verwendung von Prozessgasen in integrierten Hüttenwerken am Beispiel der Salzgitter Flachstahl GmbH⁴⁸

In Hinblick auf die **Verbesserung der Energieeffizienz von Einzelprozessen** ist festzustellen, dass nicht bei jedem Produktionsprozess ein Verbesserungspotenzial vorhanden ist oder sich dieses nicht mithilfe der hier im Mittelpunkt stehenden produktionsplanerischen Maßnahmen heben lässt. So ist der Hochofenprozess als größter Energieverbraucher unter den Produktionsprozessen bereits ausge-reift. Das heißt, die chemisch-physikalischen Vorgänge laufen mit minimalem Energieeinsatz ab.⁴⁹ Demnach ist eine Reduktion des Energieverbrauchs im Hochofenprozess nicht möglich. Des Weiteren lässt sich der Energieverbrauch der Kokerei kaum durch produktionsplanerische Maßnahmen beeinflussen. Da ein weitestgehend homogenes Gut durch wiederholte Durchführung des gleichen Verfahrens erzeugt wird, ist der Verkokungsprozess der Produktionsplanung nicht zugänglich.

Beim Warmwalzen auf klassischen Warmbreitbandstraßen ist hingegen das Potenzial zur Verbesserung der Energieeffizienz durch produktionsplanerische Maßnahmen ersichtlich. Wird das Abkühlen der beim Stranggießen erzeugten Brammen vermieden und werden diese wärmer eingesetzt, lässt sich ein Teil der Energie einsparen, die für die Brammenerwärmung aufgewendet werden muss.

Die Energie für die Brammenerwärmung wird situationsbezogen durch die Verbrennung von Koke-reigas, Erdgas oder einem Gemisch aus beiden bereitgestellt (vgl. Abbildung 2-2). Während Erdgas

⁴⁸ Eigene Darstellung.

⁴⁹ Vgl. Stahlinstitut VDEh und Wirtschaftsvereinigung Stahl (2016), S. 23.

extern zugekauft wird, entsteht das Kokereigas als Kuppelprodukt im integrierten Hüttenwerk.⁵⁰ Daher fallen die monetären und CO₂-bezogenen Effekte der Energieeinsparung in Abhängigkeit vom eingesetzten Brenngas unterschiedlich aus. Diese Arbeit bezieht sich in Beispielrechnungen auf die Fälle, in denen Erdgas oder ein Gemisch aus Erdgas und Kokereigas verwendet wird. In beiden Fällen resultiert eine Energieeinsparung in einem geringeren Verbrauch bzw. Zukauf von Erdgas. Die monetären und CO₂-bezogenen Effekte sind damit eindeutig quantifizierbar.⁵¹

Um das Potenzial des warmen Einsatzes von Brammen grob abzuschätzen, werden die Daten aus Tabelle 2-1 herangezogen. Bei einer durchschnittlichen Einsatztemperatur von 25 °C beträgt der spezifische Energieverbrauch 1,58 GJ/t. Dem gegenüber beträgt der spezifische Energieverbrauch bei einer durchschnittlichen Einsatztemperatur von 400 °C 1,31 GJ/t.⁵² Die Energieeinsparung beim warmen im Vergleich zum kalten Einsatz beträgt somit 0,27 GJ/t. Bezogen auf Erdgas lässt sich durch Multiplikation mit dem Emissionsfaktor (0,056 t CO₂/GJ) die spezifische Reduktion der CO₂-Emissionen je produzierter Tonne Warmband berechnen. Sie beträgt 0,015 t CO₂/t. Ebenso lässt sich die spezifische monetäre Einsparung ermitteln, indem die spezifische Energieeinsparung mit dem Erdgaspreis in Höhe von 9,35 €/GJ und die spezifische CO₂-Reduktion mit dem CO₂-Zertifikatpreis in Höhe von 6,00 €/t CO₂ bewertet wird.⁵³ Die monetäre Einsparung beläuft sich beim Einsatz von Erdgas demnach auf 2,62 € pro Tonne Warmband. Für ein Unternehmen mit einer Warmbreitbandproduktion von vier Millionen Tonnen im Jahr lässt sich somit folgendes Beispiel unter der Annahme rechnen, dass Koksgas und Erdgas jeweils zur Hälfte zur Brammenerwärmung genutzt werden. Können in diesem Fall 5 % der Produktionsmenge warm statt kalt eingesetzt werden, würde dies allein auf Basis des reduzierten Erdgasverbrauchs Einsparungen von rund 260.000 € und 1.500 Tonnen CO₂ pro Jahr bewirken.⁵⁴ Dies zeigt, dass die Steigerung des Warmeinsatzes sowohl aus betriebswirtschaftlicher als auch aus ökologischer Sicht lohnenswert ist.

⁵⁰ Kokereigas entsteht als Kuppelprodukt bei der Verkokung von Kohle.

⁵¹ Lässt sich durch Energieeinsparungen beim Warmwalzen der dortige Einsatz von Kokereigas reduzieren, kann davon mehr im Kraftwerk verbrannt werden. Die einhergehende monetäre Einsparung ergibt sich dann aus dem reduzierten Stromzukauf. Innerhalb der Unternehmensgrenze werden keine CO₂-Emissionen vermieden. Die CO₂-Reduktion, die sich in einer ganzheitlichen Betrachtung ergibt, ist dann von den Energieträgern abhängig, die zur Stromerzeugung genutzt werden.

⁵² Die Werte wurden durch die Fachabteilung des beteiligten Praxispartners ermittelt.

⁵³ Die Werte gelten für das Jahr 2014. Der angegebene CO₂-Zertifikatpreis entspricht dem Mittelwert über die Schlusskurse aller Börsenhandelstage im Jahr 2014. Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2015) und finanzen.net GmbH (2016).

⁵⁴ Die Berechnung dient einer näherungsweisen Kalkulation. Nicht berücksichtigt sind Effekte, die sich aus dem gemischten Einsatz warmer und kalter Brammen ergeben. Das Ergebnis ist abhängig vom zugrunde gelegten Erdgaspreis und CO₂-Zertifikatpreis. Offizielle Statistiken zum Erdgaspreis reichen bis zum Jahr 2014. Seitdem ist der Erdgaspreis gesunken.

Spezifischer Energieverbrauch bei durchschnittlich 25 °C	1,58 GJ/t
Spezifischer Energieverbrauch bei durchschnittlich 400 °C	1,31 GJ/t
Spezifische Energieeinsparung warm versus kalt	0,27 GJ/t
Emissionsfaktor Erdgas	0,056 t CO ₂ /GJ
Spezifische CO ₂ -Reduktion	0,015 t CO ₂ /t
Erdgaspreis	9,35 €/GJ
CO ₂ -Zertifikatpreis	6,00 €/t CO ₂
Spezifische monetäre Einsparung	2,62 €/t

Tabelle 2-1 Potenzialabschätzung Wärmeinsatz

2.3 Prozesscharakteristika des Warmwalzens

In diesem Abschnitt werden die Charakteristika des Warmwalzprozesses betriebswirtschaftlich analysiert, um daraus Erkenntnisse für die Walzprogrammplanung abzuleiten. Das Verständnis eines Produktionsprozesses als Transformationsprozess von Inputs zu Outputs⁵⁵ bildet die Grundlage der Analyse.

2.3.1 Allgemeine Prozesscharakteristika des Warmwalzens

In den Warmwalzprozess gehen vier Inputs ein, die Brammen, das Brenngas für die Brammenerwärmung sowie Strom und Wasser für den Anlagenbetrieb der Warmbreitbandstraße. Output ist im Wesentlichen das gewalzte Warmband. Außerdem fallen Abwasser, Abgas und Dampf an.

Der Transformationsprozess des Warmwalzens besteht aus **bis zu acht Teilprozessen**, die an unterschiedlichen Aggregaten ablaufen. Die Aggregate einer Warmbreitbandstraße sind in Abbildung 2-3 dargestellt. Im ersten Teilprozess werden die **Brammen erwärmt**. Dafür stehen i. d. R. mehrere parallele Wärmöfen zur Verfügung. Im zweiten Teilprozess, der **Entzunderung**, wird die Zunderschicht durch Presswasser entfernt, die sich beim Erwärmen auf der Oberfläche der Brammen bildet. An der **Stauchpresse** kann in einem dritten Teilprozess die Breite der Bramme reduziert werden. Als vierter Teilprozess schließt sich das **Walzen in der Vorstraße** an. Dabei wird die Bramme in einem reversierenden Walzvorgang zu Vorband mit einer Dicke von ca. 25-45 mm gewalzt. Im fünften Teilprozess werden Bandanfang und -ende mit einer **Schopfschere** abgeschnitten. Im sechsten Teilprozess wird das Vorband in der **Fertigstraße** auf Enddicke gewalzt. Diese besteht aus bis zu sieben Walzgerüsten. Die Walzgerüste setzen sich aus übereinander stehenden Arbeitswalzen zusammen, die wiederum durch Stützwalzen größeren Durchmessers abgestützt werden. Der siebte Teilprozess ist die **Bandkühlung**. Dort wird das entstandene Warmbreitband mit Wasser gekühlt. Im abschließenden achten

⁵⁵ Vgl. Dyckhoff und Spengler (2010), S. 13.

Teilprozess wird das **Band gehaspelt**, d.h. zu einem Coil gewickelt. Die als Fließproduktionslinie⁵⁶ angeordneten Aggregate sind durch Rollgänge lose verkettet und werden von den Brammen und den sich ergebenden Zwischenprodukten nacheinander durchlaufen.⁵⁷

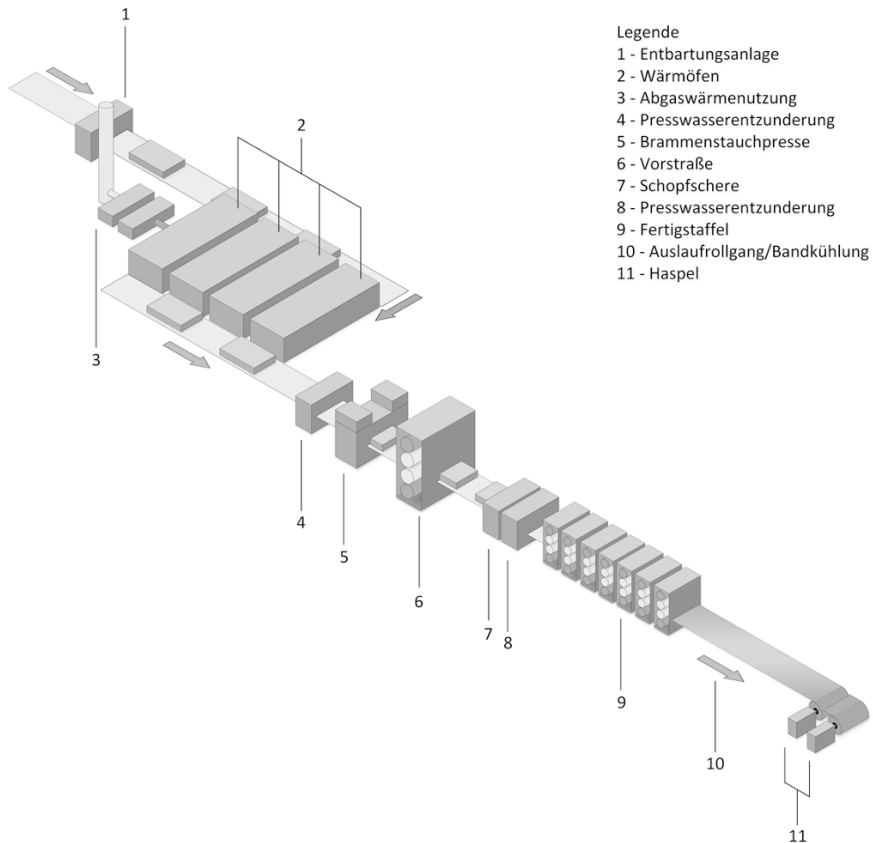


Abbildung 2-3 Darstellung einer Warmbreitbandstraße⁵⁸

Ablauforganisatorisch ist der Warmwalzprozess durch **zwei alternative Fahrweisen** der Warmbreitbandstraße charakterisiert, der ausbringungsorientierten und der energieorientierten Fahrweise. Bei der **ausbringungsorientierten** Fahrweise wird die Produktionsrate maximiert. Diese ist abhängig vom

⁵⁶ In einer Fließproduktionslinie sind die Arbeitssysteme nach dem Objektprinzip angeordnet und der Materialfluss erfolgt einheitlich. Die Arbeitsgänge unterliegen einer zeitlichen Bindung, eine starre Kopplung an ein Transportsystem gibt es hingegen nicht. Vgl. Günther und Tempelmeier (2014), S. 11 und 13f.

⁵⁷ Vgl. Wirtschaftsvereinigung Stahl und Stahlinstitut VDEh (2016d).

⁵⁸ Eigene Darstellung in Anlehnung an Salzgitter Flachstahl GmbH (2007).

Engpass im Gesamtprozess. Der Engpass ergibt sich dynamisch wechselnd an unterschiedlichen Aggregaten der Warmbreitbandstraße. Die Ursache hierfür sind die unterschiedlichen Einsatztemperaturen der Brammen, gütenabhängige Erwärmungsvorschriften und unterschiedliche Walzgeometrien. Sind die Wärmöfen der Engpass, erhöht der Einsatz mehrerer warmer Brammen die Produktionsrate, da der Erwärmungsvorgang beschleunigt werden kann. Bei der **energieorientierten** Fahrweise gilt grundsätzlich das gleiche Prinzip. Jedoch wird beim Einsatz mehrerer warmer Brammen nicht die Ofengeschwindigkeit angehoben, um den Durchsatz zu erhöhen. Stattdessen wird die Energiezufuhr bei gleicher Ofengeschwindigkeit gesenkt. Unabhängig von der konkreten Fahrweise führt die Beobachtung zu einer wichtigen Feststellung: Das Intervall, in dem die Brammen im Prozess, also in die Wärmöfen, eingesetzt werden, ist variabel und hängt dynamisch vom Engpassaggregat ab.

Die Teilprozesse der Brammenerwärmung und des Walzens an der Fertigstraße sind für die energieorientierte Walzprogrammplanung von besonderer Bedeutung. Zum einen ermöglichen Kenntnisse über ersteren die Bewertung von Produktionsplänen hinsichtlich der aufzuwendenden Energie für die Brammenerwärmung. Zum anderen leiten sich aus letzterem wesentliche Restriktionen für den Gesamtprozess ab. Aus diesem Grund werden die beiden Teilprozesse hier detaillierter beschrieben.

2.3.2 Prozesscharakteristika der Brammenerwärmung

Auch Teilprozesse lassen sich wiederum als Transformationsprozess von Inputs zu Outputs beschreiben. In den Teilprozess der Brammenerwärmung, der in den Wärmöfen stattfindet, gehen zum einen Brammen als Input ein. Zum anderen werden Brenngas und Brennluft zugeführt. Output sind die erwärmten Brammen, Abgas und Dampf.

Der erste Input, der hier genauer betrachtet werden soll, sind die **Brammen**. Sie weisen bei ihrem Einsatz in die Wärmöfen unterschiedliche Temperaturen auf. Dies liegt maßgeblich an ihrem unterschiedlichen Brammenalter. Das Brammenalter gibt die Zeit an, die seit der Erzeugung der betrachteten Bramme im Gießprozess vergangen ist. So verlässt eine Bramme den Gießprozess zwar mit ca. 1.000 °C, kühlt dann aber mit der Zeit immer weiter ab. In der Folge sind ältere Brammen beim Einsatz in die Wärmöfen i. d. R. kälter als jüngere. Die Abkühlkurve, die den funktionalen Zusammenhang zwischen dem Alter einer Bramme und ihrer Brammentemperatur darstellt, ist regressiv. Das heißt, der Temperaturverlust ist in den ersten Stunden nach dem Gießen am höchsten. Eine empirisch ermittelte Abkühlkurve ist in Abbildung 2-4 abgebildet. Über das Brammenalter hinaus wird die Brammentemperatur beim Einsatz in die Wärmöfen durch Transport- und Lagerbedingungen beeinflusst. Unterschiede ergeben sich beispielsweise durch unterschiedliche Witterungsbedingungen oder die Lagerposition der Bramme in einem Stapel, vgl. Voigt et al. (1990).

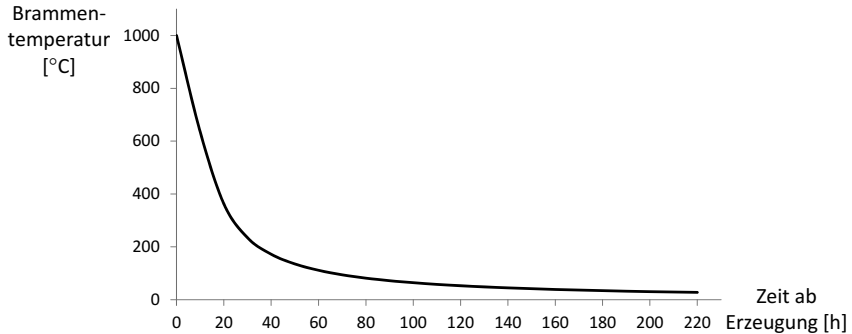


Abbildung 2-4 Regressive Abkühlkurve⁵⁹

Anzumerken ist, dass nicht alle Brammen nach dem Gießen heiß als Input im Warmwalzprozess eingesetzt werden können. Dafür gibt es zwei Ursachen. Zum einen werden bestimmte Güten zur Einstellung des Materialgefüges im Stahl bewusst abgekühlt. Zum anderen werden einige Brammen vor dem Walzen noch in der Brammenadjustage bearbeitet.⁶⁰ In beiden Fällen werden die Brammen erst nach Erreichen eines höheren Brammenalters gewalzt.

Der zweite Input der Brammenerwärmung ist das **Brenngas**. Es führt den Wärmöfen chemisch gebundene Energie zu. Der Energieeinsatz folgt dem Energiebedarf des Transformationsprozesses. Daher wird hierauf im Anschluss an die Erläuterungen zum Transformationsprozess zurückzukommen sein.

Der dritte Input der Brammenerwärmung in den Wärmöfen ist die **Brennluft**. Luft, genauer gesagt Sauerstoff, wird neben dem Brenngas für die Verbrennung benötigt. Vor dem Einleiten der Brennluft wird diese im Rekuperator mithilfe des warmen Abgases vorgewärmt.

Der wesentliche Output, der hier kurz beleuchtet werden soll, sind die **erwärmten Brammen**. Für sie gelten gütenabhängige Erwärmungsvorschriften. Diese Vorschriften spezifizieren die Zieltemperatur und die Gleichmäßigkeit der Temperaturverteilung innerhalb der Bramme, die während des Ofendurchlaufs zu erreichen sind.

⁵⁹ Eigene Darstellung. Tatsächlich lässt sich nur die Oberflächentemperatur der Brammen durch Messungen erfassen. Da die Brammen im beobachteten Fall jedoch bis kurz vor ihrem Einsatz in die Wärmöfen in Stapeln gelagert werden und lediglich die oberste Bramme an der Oberfläche stärker abkühlt, kann gemäß Experteneinschätzung angenommen werden, dass die durchschnittliche Brammentemperatur der gemessenen Oberflächentemperatur einer Bramme entspricht.

⁶⁰ In der Brammenadjustage werden die Kanten bzw. die Oberfläche von Brammen mit bestimmten Güten und bestimmten Kundenanforderungen geflämmt. Außerdem werden Brammen hinsichtlich ihrer Oberfläche inspiziert oder nachträglich geschnitten, z. B. bei einem Gießende.

Der Transformationsprozess an sich, d. h. das Erwärmen der Brammen, erfolgt in Durchlauföfen.⁶¹ Die Brammen liegen darin mit ihren Längsseiten nebeneinander. Auf Gleitrohren, die von innen mit Wasser gekühlt werden, werden die Brammen simultan vom Ofeneingang zum Ofenausgang bewegt. Im Betrieb sind die Öfen immer voll bestückt. Somit ist die Anzahl an Brammen, die gleichzeitig im Ofen ist, abhängig von der Ofenlänge und der Breite der Brammen. Zur Erwärmung der Brammen werden in den Öfen Brenngas und Brennluft zu Ofengas verbrannt. Dazu sind Brenner an der Ofendecke und den Seitenwänden installiert. Das entstehende Ofengas strömt zum Schornstein, der sich am Eingang des Ofens befindet. Dabei überträgt das Gas Strahlungswärme an die Brammen, die sich in entgegengesetzter Richtung zum Ofenausgang bewegen. Das Ofengas verlässt das Ofengefäß als Abgas über den Schornstein. Das heiße Abgas wird weiterhin zur Dampferzeugung genutzt.

Die Öfen sind in mehrere Zonen unterteilt. Die mit Brennern ausgestatteten Zonen werden hinsichtlich Temperatur und Energieeintrag einzeln geregelt. Da immer mehrere Brammen in einer Zone liegen, erfahren diese alle die gleiche Wärmebehandlung. Zunächst wird durch eine Onlineberechnung ermittelt, inwiefern die Erwärmungsvorschriften jeder Bramme hinsichtlich Entnahmetemperatur und gleichmäßiger Temperaturverteilung bei aktuellem Ofenbetrieb erreicht werden. Dementsprechend wird die Zonentemperatur als Sollwert eingestellt. Hierbei orientiert sich die Einstellung des Sollwerts hauptsächlich an der kältesten Bramme in der Zone. Der Energieeintrag wird als Stellgröße so geregelt, dass die tatsächliche Zonentemperatur dem Sollwert entspricht. Durch die Orientierung an der kältesten Bramme und dem Umstand, dass mehrere Brammen in einer Zone liegen, kann es dazu kommen, dass Brammen über ihre Zieltemperatur hinaus erwärmt werden. Sie nehmen dann mehr Energie auf als notwendig. Der Effekt tritt verstärkt auf, wenn die Brammen sehr unterschiedliche Einsatztemperaturen aufweisen.

Rückschlüsse auf den Brenngasbedarf bzw. die durch das Brenngas zugeführte Energie lassen sich nun ziehen, indem der Wärmofen als thermodynamisches System betrachtet wird.⁶² Gemäß dem ersten Satz der Thermodynamik ergibt sich für einen Ofen die Energiebilanz

$$\dot{H}u_{BS} + \dot{H}u_{BL} = \dot{Q}_N + \dot{Q}_V + \dot{H}u_{Abg} \quad (2.1)$$

Demnach ist die mit dem Brennstoff und der vorgewärmten Brennluft zugeführte Energie gleich der Summe aus dem Wärmestrom, der an das Nutzgut abgegeben wird, dem Verlustwärmestrom und der mit dem Abgas abgeführten Energie. $\dot{H}u_{BS}$, $\dot{H}u_{BL}$ und $\dot{H}u_{Abg}$ bezeichnen dabei die Enthalpieströme der im Brennstoff chemisch gebundenen Energie, der vorgewärmten Brennluft und des Abgases beim Verlassen des Ofens. Der an das Nutzgut übertragene Wärmestrom $\dot{Q}_N$ ergibt sich aus dem Massenstrom der Brammen $\dot{m}$ multipliziert mit der Differenz zwischen spezifischer Enthalpie bei Entnahmetemperatur h_{aus} und spezifischer Enthalpie bei Einsatztemperatur h_{ein} , d. h. $\dot{Q}_N = \dot{m} \cdot$

⁶¹ Dies können Stoßöfen oder Hubbalkenöfen sein. Vgl. hierzu und im Folgenden Grote und Feldhusen (2014), S. M23ff.

⁶² Vgl. hierzu und im Folgenden Grote und Feldhusen (2014), S. K5ff sowie Kramer und Mühlbauer (2002), S. 62ff.

$(h_{aus} - h_{ein})$. Es wird zum einen deutlich, dass $\dot{Q}_N$ proportional vom Massenstrom abhängig ist. Zum anderen muss zur Erwärmung der Brammen auf ihre Zieltemperatur umso mehr Energie aufgewendet werden, je kälter sie eingesetzt werden. Der Verlustwärmestrom $\dot{Q}_V$ ist die Summe aller Wärmeströme, die das Ofengefäß z.B. über die Ofenwände und -türen, Kühlwasser oder Dampf verlassen.

Mit Kenntnis der Energiebilanz gelingt eine allgemeine formale Beschreibung der zugeführten Brennstoffenergie. Dazu wird der feuerungstechnische Wirkungsgrad η_f betrachtet. Dieser beschreibt die Ausnutzung der zugeführten Brennstoffenergie unter Berücksichtigung der mit dem Abgas abgeführten Energie⁶³:

$$\eta_f = \frac{\dot{H}u_{BS} + \dot{H}_{BL} - \dot{H}_{Abg}}{\dot{H}u_{BS}} = \frac{\dot{Q}_N + \dot{Q}_V}{\dot{H}u_{BS}} \quad (2.2)$$

Durch Umformen ergibt sich die folgende Berechnungsvorschrift für die zugeführte Brennstoffenergie, die den Energieverbrauch des Ofens angibt:

$$\dot{H}u_{BS} = \frac{\dot{Q}_N + \dot{Q}_V}{\eta_f} = \frac{\dot{m} \cdot (h_{aus} - h_{ein}) + \dot{Q}_V}{\eta_f} \quad (2.3)$$

Anzumerken ist abschließend, dass zahlreiche Wirkzusammenhänge zwischen den Energieinputs und Energieoutputs eines Ofens bestehen. Diese werden maßgeblich von der Temperaturregelung beeinflusst. Sowohl der Verlustwärmestrom als auch der feuerungstechnische Wirkungsgrad ergeben sich demnach als variable Größen. Die formale Beschreibung des Energieverbrauchs in Formel (2.3) stellt eine Grundlage für die Bewertung von Produktionsplänen in Kapitel 4 dar.

2.3.3 Prozesscharakteristika des Walzens an der Fertigstraße

Für den Teilprozess des Walzens an der Fertigstraße sind zwei Inputs relevant, das von der Vorstraße kommende Vorband sowie Strom für den Walzantrieb. Output ist das auf Enddicke gewalzte Warmbreitband.

Der Transformationsprozess besteht in der Druckumformung des Bandes.⁶⁴ Diese findet zwischen den Arbeitswalzen im Walzspalt statt. Der Walzspalt unterliegt unterschiedlichen Veränderungen, die in dem Prozess eine wichtige Rolle spielen.

Änderungen des Walzspaltes ergeben sich beispielsweise durch den Verschleiß der Arbeitswalzen. Durch Reibung und Wärmeübertragung wird die Oberfläche der Arbeitswalzen zunehmend aufgeraut. Nach einer gewissen Laufleistung, d.h. einer gewissen gewalzten Länge, ist daher ein Rüstvor-

⁶³ Damit ist nur die Wärme gemeint, die nicht durch die Brennluftvorwärmung im System gehalten werden kann.

⁶⁴ Vgl. (DIN 8583-2).

gang zum Austausch der Arbeitswalzen notwendig.⁶⁵ Wie eingangs eingeführt werden die zwischen zwei Rüstvorgängen gewalzten Bänder als Walzprogramm bezeichnet. Aufgrund der begrenzten Leistung der Arbeitswalzen werden an einer Warmbreitbandstraße pro Tag mehrere Walzprogramme produziert.⁶⁶

Der Verschleiß der Arbeitswalzen beeinflusst nicht nur die gewalzte Länge eines Walzprogramms, sondern auch dessen Breitenprofil. Das Breitenprofil beschreibt den Verlauf der Walzbreite, der sich über die Aufträge eines Programms hinweg ergibt. Durch die Abnutzung der Arbeitswalzen an den Kontaktflächen mit dem Walzgut bilden sich beim Walzen auf der gleichen Breite zunehmend Kanten im Oberflächenprofil der Arbeitswalzen. Um Oberflächenschäden zu vermeiden, die durch diese Kanten auf nachfolgenden Bändern entstehen können, werden die Bänder innerhalb eines Walzprogramms i. d. R. von breit nach schmal (absteigend) gewalzt. Wenn bereits eine gewisse Länge in einem Breitenbereich gewalzt wurde, müssen entsprechend schmalere Bänder eingesetzt werden.⁶⁷ Die Ausnahme zur absteigenden Bandbreite bilden einige wenige Bänder am Anfang eines Walzprogramms. Sie werden bewusst von schmal nach breit (aufsteigend) gewalzt. Das dient dem Zweck, die noch kalten Arbeitswalzen von der Mitte heraus gleichmäßig zu erwärmen. Ein Walzprogramm besteht somit aus einem kleineren, aufsteigenden Programmteil und aus einem größeren, absteigenden Programmteil. In der Folge hat das Breitenprofil eines Walzprogramms typischerweise die Form eines Sargdeckels. Dies ist in Abbildung 2-5 veranschaulicht.⁶⁸

Der Walzspalt, in dem die Druckumformung stattfindet, unterliegt außerdem Veränderungen in Abhängigkeit von thermischen Einflüssen⁶⁹ und in Abhängigkeit von der aufgewendeten Walzkraft. Die Walzkraft, die u.a. bei festerem Material entsprechend größer sein muss, beeinflusst zum einen das Nachgeben des Walzgerüsts. Zum anderen beeinflusst sie die Durchbiegung und Abplattung der Walzen.⁷⁰ Um den einhergehenden Veränderungen des Walzspaltes entgegenzuwirken, werden die Arbeitswalzen für unterschiedlich festes Material unterschiedlich ballig geschliffen. Klassischerweise führt der Walzenschliff zu einem konkaven, zylindrischen oder konvexen Oberflächenprofil der Arbeitswalzen. Eine Weiterentwicklung stellt die Anwendung von Biege- und Verschiebesystemen dar. So ist beispielsweise in einem CVC-System (engl.: Continuously Variable Crown System) mit S-förmigen Arbeitswalzen deren Balligkeit durch ihre entgegengesetzt horizontale Verschiebung kontinuierlich einstellbar. Somit sind Aufträge unterschiedlicher Festigkeitsklassen in einem Walzprogramm walzbar. Hinsichtlich des Breitenprofils eines Walzprogramms ergibt sich aus dem Einsatz des CVC-Systems eine Besonderheit. So erfordert eine veränderte Festigkeitsklasse die Anpassung der

⁶⁵ Die Arbeitswalzen werden geschliffen und dann wieder im Warmwalzprozess eingesetzt. Da der Durchmesser der Walzen mit jedem Durchgang reduziert wird, müssen sie nach einiger Zeit ersetzt werden.

⁶⁶ Vgl. Degner (2012), S. 136.

⁶⁷ Soll- und Istbreite können geringfügig voneinander abweichen. Daher wird die gewalzte Länge in einem Breitenbereich betrachtet.

⁶⁸ Vgl. Lopez et al. (1998), S. 320, Yadollahpour et al. (2009), S. 1217.

⁶⁹ Durch die Wärmedehnung vergrößert sich mit zunehmender Temperatur der Durchmesser des Walzenballens. Vgl. Wusatowski (1963), S. 422.

⁷⁰ Vgl. Wusatowski (1963), S. 421.

Balligkeit und daher eine horizontale Verschiebung der Walzen im CVC-System. Durch die Verschiebung rücken die durch Verschleiß entstandenen Kanten im Oberflächenprofil der Arbeitswalzen weiter nach innen. In der Folge wird mit einer Veränderung der Festigkeitsklasse eine Breitenreduktion im Walzprogramm nötig, wenn höchste Qualitätsansprüche zu erfüllen sind.⁷¹

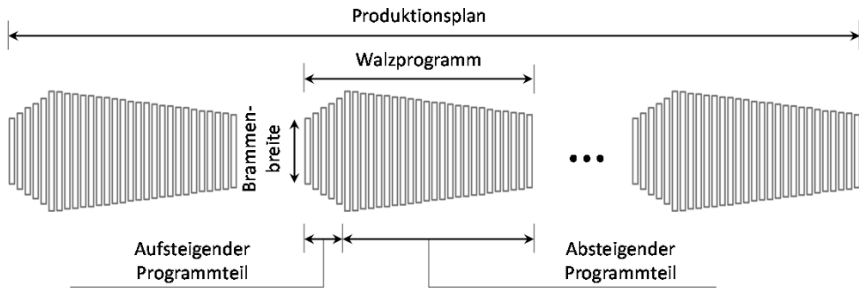


Abbildung 2-5 Breitenprofil von Walzprogrammen⁷²

Zur Einstellung des Walzspalts auf unterschiedliche Walzgutgeometrien und Materialarten existieren diverse hydraulische und elektromechanische Einrichtungen. Dabei gilt es, auch bei ständig wechselnden Einstellungen die Qualität jedes Bandes hinsichtlich Walzdicke, Querschnitt und Planheit sicherzustellen. Um dies zu gewährleisten, werden Änderungen zwischen zwei aufeinander folgenden Bändern bezüglich der Walzdicke, der Festigkeitsklasse und der erforderlichen Walztemperatur nur bedingt zugelassen. Auf Basis der Prozesscharakteristika des Warmwalzens ergeben sich vielfältige Restriktionen für die Produktionsplanung.

2.4 Anforderungen an die energieorientierte Walzprogrammplanung

Das Ziel der Arbeit besteht darin, Entscheidungsunterstützung für die energieorientierte Walzprogrammplanung zu leisten. Dies setzt zum einen die explizite Berücksichtigung des Energieverbrauchs voraus. Zum anderen müssen ablauforganisatorische und technologische Restriktionen beachtet werden, die sich aus den Prozesscharakteristika ergeben. Dementsprechend werden in diesem Abschnitt **acht Anforderungen** an die energieorientierte Walzprogrammplanung abgeleitet, die vier Kategorien zuzuordnen sind: Vier Anforderungen ergeben sich aus dem Planungsgegenstand und der Zielsetzung der Planung. Außerdem werden eine ablauforganisatorische, zwei technologische und eine allgemeine Anforderung identifiziert.

In der ersten Kategorie werden die vier Anforderungen betrachtet, die sich aus dem Planungsgegenstand und der Zielsetzung der Planung ergeben. Der Gegenstand der betrachteten operativen Pla-

⁷¹ Vgl. Stahlinstitut VDEh (2011), S. 95f. Degner (2012), S. 155ff.

⁷² Eigene Darstellung in Anlehnung an Ning und Wang (2006), S. 7391.

nungsaufgabe ist das Bereitstellen eines Walzprogrammplans. Dieser besteht grundsätzlich aus einer festgelegten **Auftragsreihenfolge**. Darüber hinaus ergibt sich aus ihm eine Zuordnung der Produktionsaufträge zu Walzprogrammen. Der Planungshorizont der Praxis umfasst typischerweise einen Tag. Daraus ergibt sich die Anforderung, **mehrere Programme** simultan⁷³ zu planen und deren Reihenfolge festzulegen.

Da die Zielsetzung der Planung unter anderem den **Energieverbrauch** adressiert, ist es erforderlich, diesen verursachungsgerecht zu modellieren. Dies gilt insbesondere für die Zusammenhänge zwischen der Auftragsreihenfolge im Belegungsplan, dem Einsatzzeitpunkt, dem Brammenalter, der Einsatztemperatur und der in Form von Wärme auf das Nutzgut übertragenen Energie. Letztere wird fortan vereinfachend als Nutzgutenergie bezeichnet, wohingegen die Verlustenergie deren Gegenstück bildet. Der beschriebene Zusammenhang ist in Abbildung 2-6 dargestellt.

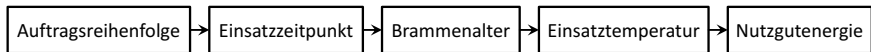


Abbildung 2-6 Zusammenhang zwischen Belegungsplan und Nutzgutenergie

Grundsätzlich sind die Brammen zur Reduktion des Energieverbrauchs möglichst heiß und somit unverzüglich nach dem Gießen einzusetzen. Dies erfordert ein vorausschauendes Planen. Somit ergibt sich die Anforderung, nicht nur Brammen zu verplanen, die bereits im Lager auf ihre Bearbeitung warten, sondern auch solche, die erst im Verlauf des Planungshorizonts mit hohen Temperaturen ankommen. Zum Zeitpunkt der Planung sind diese mitunter noch nicht an den Stranggießanlagen erzeugt, aber im Gießplan terminiert. Daher werden die zugehörigen Produktionsaufträge auch **virtuelle Aufträge** genannt. Es ist darauf zu achten, dass die virtuellen Brammen nicht für das Warmwalzen verplant werden, bevor sie gegossen und zum Warmwalzwerk transportiert worden sind. Dieser Zeitpunkt wird hier als **Freigabezeitpunkt** bezeichnet.

In der zweiten Kategorie ergibt sich eine ablauforganisatorische Anforderung. Sie besteht darin, den **Zeitverlauf** der Produktion modellseitig fortzuschreiben. Die Modellierung des Zeitverlaufs ist erforderlich, um den Einsatzzeitpunkt jedes Auftrags als Basis für die Ermittlung des Energieverbrauchs zu bestimmen. Außerdem kann nur so sichergestellt werden, dass der Freigabezeitpunkt virtueller Brammen berücksichtigt wird.

In der dritten Kategorie werden zwei technologische Anforderungen betrachtet. Genauer gesagt handelt es sich um zwei Gruppen technologischer Anforderungen. Sie ergeben sich aus den Prozesscharakteristika des Walzens an der Fertigstraße (siehe Abschnitt 2.3.3). Die erste Gruppe umfasst

⁷³ Bei einer simultanen Planung wird im Vergleich zur wiederholten Einzelprogrammplanung das sogenannte „cherry picking“ vermieden. Cherry picking bedeutet, dass jeweils die Aufträge für ein betrachtetes Programm ausgewählt werden, die am besten zu verplanen sind. Dies führt i. d. R. zu einem erhöhten Rüstaufwand bzw. einer abnehmenden Qualität der Programme über den Planungshorizont. Vgl. Tang et al. (2000), S. 268.

Anforderungen, die das **Breitenprofil** der Walzprogramme betreffen. Das Breitenprofil folgt der Sargdeckelform. Demnach setzt sich ein Walzprogramm aus auf- und absteigendem Programmteil zusammen. Durch wenige Brammen am Anfang eines Programms sollen die Arbeitswalzen sukzessive von der Mitte her erwärmt werden. In der Folge ist die Anzahl an Aufträgen im aufsteigenden Programmteil begrenzt und die Breitenzunahme von einem Auftrag zum nächsten ist limitiert. Der Programmteil mit absteigender Breite trägt dem Verschleiß der Arbeitswalzen Rechnung. Eine Verringerung der Walzbreite ist ausdrücklich erforderlich, wenn eine spezifische Länge in einem Breitenbereich gewalzt worden ist. Ebenso erfordert eine Änderung der Festigkeitsklasse zur Erfüllung höchster Qualitätsansprüche ein Mindestmaß an Breitenreduktion. Die kumulierte Länge aller in einem Sargdeckel befindlichen Bänder ist begrenzt⁷⁴.

Die zweite Gruppe technologischer Anforderungen adressiert die limitierten **Sprünge** zwischen den Auftragseigenschaften aufeinanderfolgender Bänder. Hier sind Obergrenzen für Sprünge hinsichtlich Dickenzu- und -abnahme sowie Sprünge in der Festigkeitsklasse und der Walztemperatur zu beachten.

In der vierten Kategorie wird eine allgemeine Anforderung an die energieorientierte Walzprogrammplanung betrachtet, die in zwei Unterpunkten konkretisiert wird. Wie viele Aufgaben in der operativen Produktionsplanung ist auch die Walzprogrammplanung ein wiederholt zu lösendes komplexes Planungsproblem, bei dem es nicht möglich ist, alle Handlungsalternativen zu erfassen und zu bewerten. In solchen Entscheidungssituationen ist die Verwendung von Modellen zur Abbildung der Planungsaufgabe essentiell.⁷⁵ Insbesondere die Formalisierung in einem mathematischen Modell ist von Bedeutung. Erst dieses erlaubt den Einsatz computergestützter, mathematischer Verfahren. Ein solches Modell sollte inhaltliche Zusammenhänge möglichst genau abbilden, gleichzeitig muss es aber auch in angemessener Zeit lösbar sein. Zwischen **Genauigkeit** und **Lösbarkeit** besteht häufig ein Interessenkonflikt.⁷⁶

Die Anforderungen an die energieorientierte Walzprogrammplanung sind in Tabelle 2-2 zusammengefasst. Im folgenden Kapitel wird darauf aufbauend untersucht, inwiefern bestehende Planungsansätze die identifizierten Planungsanforderungen erfüllen.

⁷⁴ Die maximale Programmlänge ist eine in der Literatur vielfach anzutreffende Anforderung, z.B. Liu et al. (2015), S. 1821 sowie Tang und Wang (2006), S. 1247.

⁷⁵ Vgl. Schneeweiß (2002), S. 109, Klein und Scholl (2012), S. 31.

⁷⁶ Vgl. Hillier et al. (2002), S. 18.

Kategorie	Anforderung
Planungsgegenstand und -zielsetzung	1. Festlegung einer Auftragsreihenfolge
	2. Simultane Planung mehrerer Walzprogramme
	3. Modellierung des Energieverbrauchs
	4. Berücksichtigung virtueller Aufträge (Freigabezeitpunkt)
Ablauforganisatorische Anforderung	5. Modellierung des Zeitverlaufs
Technologische Anforderungen	6. Breitenprofil: • Auf- und absteigender Programmteil (Sargdeckelform) • Max. Anzahl Aufträge im aufsteigenden Programmteil • Max. Breitensprung im aufsteigenden Programmteil • Max. Länge im gleichen Breitenbereich • Min. Breitensprung bei Änderung der Festigkeitsklasse im absteigenden Programmteil • Max. Programmlänge
	7. Begrenzte Sprünge zwischen aufeinanderfolgenden Aufträgen: • Dickenzu- und -abnahme • Sprung in der Festigkeitsklasse • Walztemperatursprung
Allgemeine Anforderungen	8. Verwendung von Planungsmodellen • Gute Lösbarkeit • Hinreichende Genauigkeit

Tabelle 2-2 Anforderungen an die energieorientierte Walzprogrammplanung

Energieorientierte Walzprogrammplanung in der
stahlerzeugenden Industrie

Konzeption, Modellierung und Lösung

Puttkammer, K.

2017, XXV, 160 S. 15 Abb., Softcover

ISBN: 978-3-658-18497-1