



Diplomarbeit

Energieanalyse gekoppelter Prozesse der energieintensiven Industrie zur betrieblichen Optimierung und Lastflexibilisierung

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades einer
Diplom-Ingenieurin unter der Leitung von

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. René HOFMANN

und

Univ.Ass. Dipl.-Ing. David HUBER

an der TU Wien,

am Institut für Energietechnik und Thermodynamik

von

Gabriela Zabik - 01425812



Wien, November 2021

Unterschrift

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass die vorliegende Arbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen von mir selbstständig angefertigt wurde. Sämtliche verwendeten Textausschnitte, Zitate oder Inhalte anderer Verfasser wurden ausdrücklich als solche gekennzeichnet. Weiter erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch im Ausland in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, November 2021

Gabriela Zabik

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich bei der Erstellung dieser Diplomarbeit unterstützt haben. Vielen herzlichen Dank an Prof. René Hofmann, der diese Arbeit ermöglicht, betreut und begutachtet hat. Weiters geht ein großer Dank an David Huber, der durch seine inhaltliche Unterstützung und hilfreichen Anregungen maßgeblich zu der Erstellung dieser Arbeit beigetragen hat. Vielen Dank für Deine Geduld und Bemühungen! Ich danke ebenfalls der Stahl Judenburg GmbH, insbesondere Herrn Ing. Peter Sammt, der mir ausführliche Informationen zur Verfügung gestellt hat. Ebenfalls Dankeschön an meine Freunde und StudienkollegInnen, ohne ihnen wäre meine Studienzeit nur halb so schön gewesen. Abschließend ein großes Danke an meine Eltern, die mir mein Studium ermöglicht haben und mich über die Dauer meines gesamten Studiums unterstützt haben.

Abstract

This work has been developed within the FFG research project 'industrial Energy OPTimization and fLexibility through Digitalization', in short LEOPOLD, project number 35833857, which develops a digital method for coupling the operational optimization of the energy supply system with the process optimization of the production system for the energetic flexibilization of holistic industrial plants. The aim of this work was to perform an energetic analysis of a real process in the steel processing industry, which should serve as a preparation for a subsequent mathematical optimization of the process. In the course of this analysis, the operating conditions of the plants were illuminated and possible optimization potentials were discussed. Furthermore, by means of a regression analysis, data-driven linear models representing the energy consumption of the individual plants were created and their practical applicability was discussed. It was shown that the accuracy of the models essentially depends on the data situation and that accurate models can be set up with a good data basis.

Kurzfassung

Diese Arbeit ist im Rahmen des FFG-Forschungsprojektes 'industrial Energy Optimization and flexibility through Digitalization', kurz LEOPOLD, Projektnummer 35833857, entstanden, welches eine digitale Methode zur Kopplung der Betriebsoptimierung des Energieversorgungssystems mit der Ablaufoptimierung des Produktionssystems zur energetischen Flexibilisierung gesamtheitlicher industrieller Anlagen entwickelt. Ziel dieser Arbeit war es, eine energetische Analyse eines realen Prozesses im Bereich der stahlverarbeitenden Industrie vorzunehmen, die als Vorbereitung für eine nachfolgende mathematische Optimierung des Prozesses dienen soll. Im Zuge dieser Analyse wurden die Betriebsbedingungen der Anlagen beleuchtet und mögliche Optimierungspotentiale erörtert. Des Weiteren wurden mittels einer Regressionsanalyse datengetriebene lineare Modelle, die den Energieverbrauch der einzelnen Anlagen abbilden, erstellt und deren praktische Anwendbarkeit diskutiert. Man konnte zeigen, dass die Genauigkeit der Modelle im Wesentlichen von der Datenlage abhängt und sich mit einer guten Datengrundlage als Basis genaue Modelle aufstellen lassen.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| 1. Einleitung | 1 |
| 1.1. Motivation | 1 |
| 1.2. Ziel und Umfang der Arbeit | 4 |
| 2. Theoretische Grundlagen | 5 |
| 2.1. Prozessbeschreibung | 5 |
| 2.1.1. Warmwalzen | 5 |
| 2.1.2. Wärmebehandlung Glühen | 11 |
| 2.1.3. Wärmebehandlung Härten und Vergüten | 15 |
| 2.1.4. Mechanische Nachbearbeitung | 17 |
| 2.2. Modellbildung | 19 |
| 2.2.1. Regressionsanalyse | 20 |
| 3. Use Case | 23 |
| 3.1. Warmwalzen | 23 |
| 3.2. Adjustage | 28 |
| 3.3. Wärmebehandlungen | 28 |
| 3.3.1. Konventionelle Wärmebehandlung | 28 |
| 3.3.2. Induktive Wärmebehandlung | 30 |
| 3.4. Mechanische Nachbearbeitung | 30 |
| 3.5. Peripherie | 30 |

| | |
|---|-----------|
| 4. Prozess- und Energieanalyse | 31 |
| 4.1. Energieverbrauch STJ | 31 |
| 4.2. Gasverbraucher | 36 |
| 4.2.1. Hubherdofen | 36 |
| 4.2.2. Durchlaufglühofen | 40 |
| 4.2.3. Beheizung | 45 |
| 4.3. Stromverbraucher | 48 |
| 4.3.1. Induktivanlagen | 48 |
| 4.3.2. Walzstraße | 49 |
| 4.3.3. Blankstahl | 51 |
| 4.4. Validierung der Modelle | 52 |
| 5. Ergebnisse und Diskussion | 53 |
| 5.1. Gasverbrauch | 53 |
| 5.1.1. Hubherdofen | 55 |
| 5.1.2. Durchlaufglühöfen | 56 |
| 5.1.3. Beheizung | 57 |
| 5.2. Stromverbrauch | 59 |
| 5.2.1. Induktivanlagen | 60 |
| 5.2.2. Walzstraße | 62 |
| 5.2.3. Blankstahl | 63 |
| 5.3. Zusammenfassung und Erkenntnisse | 64 |
| 6. Conclusio | 66 |
| Literatur | 68 |
| Abbildungsverzeichnis | 71 |
| Tabellenverzeichnis | 74 |

| | |
|--------------------------------|-----------|
| A. Anhang | 75 |
| A.1. Weitere Modelle | 75 |
| A.1.1. DGO1 | 75 |
| A.1.2. DGO2 | 77 |

Nomenklatur

Lateinische Symbole

| Symbol | Einheit | Beschreibung |
|-----------|---------------------|--|
| e | - | Residuenvektor |
| E_{el} | J | elektrische Energie |
| E_{gas} | J | Energie Gas |
| G | - | charakteristischer Punkt des Fe-C-Diagramms bei 0 % C-Gehalt und 911 °C |
| H_i | MWh/Nm ³ | Heizwert Erdgas |
| m | kg | Masse |
| P | - | charakteristischer Punkt des Fe-C-Diagramms bei 0,022 % C-Gehalt und 723 °C |
| S | - | charakteristischer Punkt des Fe-C-Diagramms bei 0,69 % C-Gehalt und 738 °C |
| t | s | Zeit |
| $t_{8/5}$ | s | Abkühldauer von Stahl von 800 auf 500 °C |
| t_{ab} | s | Abkühldauer |
| t_{an} | s | Erwärmdauer Rand des Werkstückes |
| t_e | s | Erwärmdauer |
| t_d | s | Erwärmdauer Kern des Werkstückes |

wird fortgesetzt

| Symbol | Einheit | Beschreibung |
|--------------|--------------------|-------------------------------|
| t_h | s | Haltedauer |
| T | K | Temperatur |
| T_A | K | Austenitisierungstemperatur |
| T_{An} | K | Anlasstemperatur |
| T_h | K | Haltetemperatur |
| V | Nm ³ | Normvolumen |
| \dot{V} | Nm ³ /h | Normvolumenstrom |
| x | - | Variable des linearen Modells |
| \mathbf{X} | - | Regressormatrix |
| y | - | Variable des linearen Modells |
| \mathbf{y} | - | Ausgangsvektor |

Griechische Symbole

| Symbol | Einheit | Beschreibung |
|--------------------|---------|--------------------------------|
| β_0, β_1 | - | Parameter der linearen Modelle |

Abkürzungen

| Abkürzung | Beschreibung |
|-----------|--------------------------|
| BVT | Beste Verfügbare Technik |
| DGO1 | Durchlaufglühofen 1 |
| DGO2 | Durchlaufglühofen 2 |
| HHO | Hubherdofen |
| Reku | Rekuperator |

wird fortgesetzt

| Abkürzung | Beschreibung |
|-----------|----------------------|
| STJ | Stahl Judenburg GmbH |

Indizes tiefgestellt

| Symbol | Beschreibung |
|--------|---------------------|
| B | Blankstahl |
| Br | Brennstoff |
| Buero | Büroheizung |
| DGO1 | Durchlaufglühofen 1 |
| DGO2 | Durchlaufglühofen 2 |
| Halle | Hallenheizung |
| HHO | Hubherdofen |
| Ind | Induktivanlagen |
| Leer | Leerzeit |
| St | Stahl |
| W | Walzstraße |

1. Einleitung

1.1. Motivation

In den letzten Jahren hat das Thema Energieeffizienz in der Industrie immer mehr an Bedeutung gewonnen. Hier stehen vor allem Ressourcenschonung und Umweltschutz im Vordergrund. Nationale und internationale Bestimmungen, aber auch das Streben nach einer Kostenreduktion wird die Industrie zukünftig zum Handeln bewegen. Die Durchführung energieeffizienter Maßnahmen kann beispielsweise durch Nachrüstung an bestehenden Anlagen oder durch entsprechende Maßnahmen beim Bau von Neuanlagen erfolgen. Die Wirtschaftlichkeit dieser Maßnahmen hängt vor allem von der zeitlichen Betrachtungsweise ab. [1]

Als zweitgrößter Energieverbraucher in den weltweiten Industriesektoren ist die Eisen- und Stahlindustrie in hohem Maße von fossilen Brennstoffen abhängig [2]. Daher spielt hier das Thema Energieeffizienz eine große Bedeutung. Stahl zählt dank seiner hervorragenden Festigkeit sowie Duktilität zu einem der bedeutendsten Werkstoffen und wird vielseitig eingesetzt. Der Großteil des produzierten Stahls wird in der Bauindustrie, der Automobilindustrie sowie dem Maschinenbau eingesetzt. Dank der Wiederverwertbarkeit stellt Stahl in Bezug auf nachhaltige Entwicklung einen Schlüsselwerkstoff dar und ist in unserer modernen Welt nicht wegzudenken. [3]

Die Weltstahlproduktion begann im 21. Jahrhundert wieder stark zu steigen, vor allem in China hat sich die Eisen- und Stahlindustrie rasant entwickelt. Derzeit werden 49,4 % des

1. Einleitung

Stahls in China hergestellt und auch dort weiterverarbeitet. Die Menge des produzierten Stahls wird vermutlich weiter zunehmen, insbesondere in Entwicklungsregionen wie Lateinamerika, Asien, Afrika und dem indischen Subkontinent. In diesen Regionen werden über 60 % des produzierten Stahls für die Schaffung neuer Infrastrukturen verwendet. [4]

Weltweit wird Stahl in zwei Hauptverfahren hergestellt, nämlich im Hochofen und im Elektrostahlwerk. Der Hauptunterschied zwischen den beiden Verfahren liegt in der Art der verwendeten Rohstoffe. Die Rohstoffe für den Hochofenprozess sind vor allem Eisenerz, Kohle und recycelter Stahl. Im Vergleich dazu wird beim Elektrolichtbogen-Verfahren Stahl hauptsächlich aus recyceltem Stahl und Strom hergestellt. Die Herstellung von Stahl im Elektrolichtbogen ist weniger energieintensiv als im Hochofen, wobei Hindernisse wie eine beschränkte Verfügbarkeit von Schrott oder die Nachfrage nach höherwertigen Stahlsorten bestehen. [4]

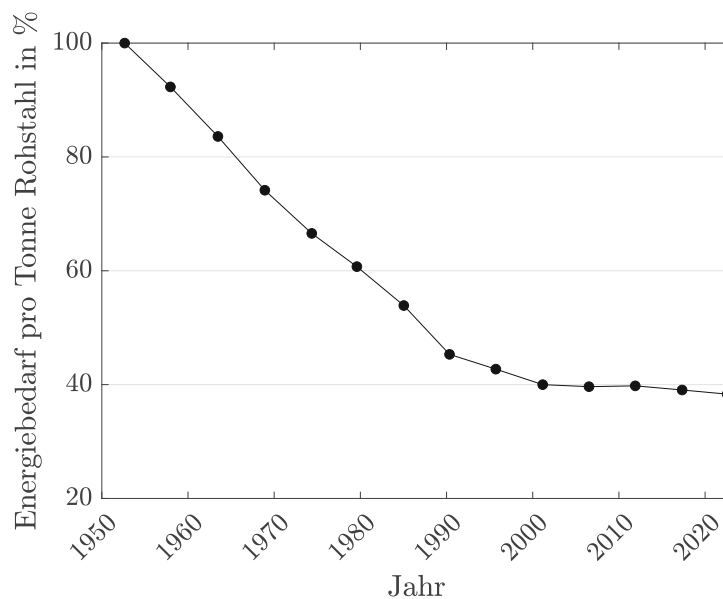


Abbildung 1.1.: *Reduktion des Energiebedarfs pro Tonne Rohstahl 1960 - 2020, nach [5].*

Die Eisen- und Stahlindustrie war schon immer bestrebt, durch Energieeffizienzmaßnahmen den Energieverbrauch zu senken, um so eine Kostenreduktion als auch geringere Emissionen sowie eine höhere Flexibilität zu bewirken. In Abbildung 1.1 sieht man, wie der Energieverbrauch pro Tonne erzeugtem Stahl seit den 1960er Jahren signifikant gesunken ist. Die Einführung von neuen Technologien und die stetige Weiterentwicklung hat hier zu erheblichen Energie- und Materialeinsparungen geführt. Zu den bedeutendsten Maßnahmen

1. Einleitung

zählen die Einführung von Stranggießen und deren kontinuierliche Verbesserung, eine verstärkte Rückgewinnung von Abwärme und Prozessgasen sowie eine effizientere Gestaltung der Hochleistungsöfen. [6]

Obwohl die Stahlindustrie ihren spezifischen Energieverbrauch in den letzten 50 Jahren um 60 % senken konnte, besteht in diesem Bereich immer noch ein großes Energieeinsparungspotenzial. Die Internationale Energieagentur schlussfolgert in [7], dass die Eisen- und Stahlindustrie über das Potenzial verfügt, ihren Energieverbrauch weiter zu senken. Durch die Anwendung der Besten Verfügbaren Technik (BVT) wären Energieeinsparungen von bis zu 20 % zu erreichen. In jedem Stahlwerk gibt es verschiedene Möglichkeiten zur Steigerung der Energieeffizienz, von denen viele kosteneffizient sind. [2]

Energieeffiziente Technologien und Maßnahmen konzentrieren sich auf die Verringerung des Brennstoffverbrauchs und die Verbesserung der Sekundärenergierückgewinnung sowie die Erhöhung des Wirkungsgrads von Industrieöfen. In der Eisen- und Stahlindustrie sind sekundäre Energieressourcen wie zum Beispiel Nebenproduktgase oder Abwärme reichlich vorhanden. Diese Ressourcen können zur Strom- oder Dampferzeugung und als Brennstoff für den Produktionsprozess eingesetzt werden. Die Nutzung von Sekundärenergie ist ein wichtiger Bestandteil der Energieeinsparung in der Eisen- und Stahlindustrie. [2]

Nach jahrzehntelanger Arbeit der Eisen- und Stahlindustrie werden die Möglichkeiten, Energieeinsparungen zu erzielen, jedoch immer herausfordernder. Neben der stetigen Weiterentwicklung der Anlagentechnik wird in der effizienten, optimalen und intelligenten Planung sowie im Zusammenspiel von Energie- und Materialflüssen heute großes Einsparpotential gesehen. Mit der rasanten Entwicklung der globalen Informationstechnologie ist die schnelle Informationsübertragung der Materialflüsse und dem Energieflussmanagement möglich. Durch eine mathematische Optimierung kann der operative Betrieb effizienter und flexibler betrieben werden. Hierfür werden die Betriebsregeln der vorhandenen Anlageninfrastruktur analysiert und diese durch die nachfolgende Optimierung angepasst. Damit lässt sich ohne hohe Investitionen der Energiebedarf reduzieren und der Produktionsprozess flexibler

gestalten. [4]

1.2. Ziel und Umfang der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist es, anhand eines konkreten Use Cases aus der stahlverarbeitenden Industrie eine energietechnische Prozessanalyse durchzuführen, welche im Wesentlichen als Vorbereitung für eine nachfolgende mathematische Betriebsoptimierung dienen soll. Kern der Arbeit ist einerseits die Erstellung linearer Modelle für die Abbildung des Energiebedarfes und andererseits die Entwicklung eines tieferen Prozessverständnisses in Bezug auf die Betriebsbedingungen der Anlagen.

In Kapitel 2 werden die theoretischen Grundlagen des Prozesses erarbeitet sowie ein Einblick in die Modellbildung gegeben. Anschließend wird in Kapitel 3 der betrachtete Use Case vorgestellt. Im nachfolgenden Kapitel 4 wird der Use Case aus energetischer Sicht analysiert. Es werden die Hauptenergieverbraucher identifiziert und mithilfe der linearen Regressionsanalyse Modelle zur Abbildung des Energiebedarfs erstellt. Des Weiteren werden die Betriebsbedingungen der Anlagen analysiert und Optimierungspotentiale erörtert. In Kapitel 5 werden die Ergebnisse der erstellten Modelle vorgestellt und diskutiert. Kapitel 6 schließt die Arbeit mit einem Conclusio ab.

2. Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen ausgewählter Prozesse in der stahlverarbeitenden Industrie erläutert sowie anschließend ein kurzer Überblick über die Modellbildung gegeben.

2.1. Prozessbeschreibung

Konkret wird auf das Warmwalzen, die Wärmebehandlung von Stahl sowie die mechanische Nachbearbeitung eingegangen, da diese Verfahren in dem zu untersuchenden Use Case zur Anwendung kommen. Das Warmwalzen selbst setzt sich auch mehreren Teilprozessen zusammen. Die Wärmebehandlungen beinhalten die Verfahren Glühen und Härten. Abschließend wird kurz auf die Verfahren der mechanischen Nachbearbeitung eingegangen.

2.1.1. Warmwalzen

Das Warmwalzen von Stahl zählt mit einem Energieverbrauch von etwa 1,5 bis 3 Gigajoule pro Tonne Rohstahl zu den großen Energieverbrauchern in der Prozesskette der Eisen- und Stahlerzeugung [2]. 2019 wurden weltweit 420 Millionen Tonnen warmgewalzter Stahlerzeugnisse hergestellt, davon 146 Millionen Tonnen in der Europäischen Union. Etwa 5 % der in der EU produzierten warmgewalzten Stahlerzeugnisse werden in Österreich produziert. [8]

Die Hauptfunktion des Warmwalzwerks ist das Wiedererwärmen von Stahlrohlingen, soge-

2. Theoretische Grundlagen

nannten Knüppeln, oberhalb der Rekristallisationstemperatur und diese durch aufeinanderfolgende Walzgerüste dünner und länger zu walzen. Die Knüppel werden auf etwa 1250 °C in Industrieöfen erhitzt, wobei hauptsächlich Erdgas als primärer Energieträger zur Beheizung eingesetzt wird. Die erwärmten Knüppel werden zunächst in einem Vorwalzgerüst gewalzt, in dem die Dicke in mehreren Stichen reduziert wird. Das Material durchläuft dann weitere Walzgerüste, wodurch es auf die gewünschte Dicke gebracht wird. [9]

Walzprodukte lassen sich unterteilen in Flacherzeugnisse wie Bleche oder Bandstahl und Langerzeugnisse wie Stangen, Profile, Drähte sowie nahtlose Rohre. Die Produktion von Flacherzeugnissen in der Walztechnik macht etwa zwei Drittel aus, etwa ein Drittel entfällt auf die Langerzeugnisse [10]. Der Energiebedarf für die Bearbeitung hängt in den meisten Fällen vom Einsatzgebiet des Endproduktes ab. Manche Produkte müssen nur warmgewalzt werden, während beispielsweise Stahl für die Automobilindustrie höhere Anforderungen an den Werkstoff stellt und oftmals warm- und kaltgewalzt sowie verzinkt oder beschichtet werden muss. Der Ofen zum Erwärmen der Knüppel ist ein wesentlicher Energieverbraucher im Walzprozess. Dieser hat einen großen Einfluss auf den Energieverbrauch und somit auch auf die Kosten und Emissionen des Produktes. Daher ist die Reduzierung des Energieverbrauchs des Ofens das Hauptziel der Energieeinsparung im Walzprozess. [2] Das Warmwalzen setzt sich aus den Teilschritten

- Vorbereitung der Oberfläche,
- Erwärmen des Walzgutes,
- Entzundern,
- Walzen und
- Adjustage

zusammen, welche im Folgenden erläutert werden.

Vorbereitung der Oberfläche

Form und Gestalt des Stahleinsatzes variiert je nach Prozessroute sowie herzustellendem Produkt. Für die Erzeugung von Flacherzeugnissen werden Brammen aus Stahl eingesetzt. Diese sind halbfertige, gegossene Produkte, deren Querschnitte 400 bis 2500 mm breit und 40 bis 500 mm hoch sind. Für die Produktion von Langerzeugnissen werden Knüppel eingesetzt. Diese sind ebenfalls halbfertige, gegossene Produkte, haben jedoch einen quadratischen Querschnitt von 50 x 50 mm bis 120 x 120 mm. [10]

Knüppel weisen bestimmte Oberflächenfehler wie Risse oder Falten auf. Diese sollten vor dem Erwärmen beseitigt werden, um eine höhere Oberflächenqualität des Walzgutes zu erreichen. Einerseits kann dies mittels Flämmen geschehen. Dabei wird die Oberfläche mittels einer Gas-Sauerstoff-Flamme abgeschmolzen. Dabei oxidiert die Oberfläche des Stahls und bildet eine Zunderschicht aus. Im Anschluss wird die Zunderschicht mittels eines Hochdruckwasserstrahls entfernt. Andererseits kann man mittels Schleifen das Reduzieren von Oberflächenfehlern erreichen. Diese Art der Oberflächenvorbereitung kommt vor allem bei rostfreiem Stahl zur Anwendung. Vor dem Eintrag in den Ofen müssen in manchen Fällen die Brammen und Knüppel außerdem auf eine bestimmte Länge zugeschnitten werden. [10]

Erwärmen des Walzgutes

Nach der Oberflächenvorbereitung müssen die Walzknüppel auf eine Walztemperatur von 1150 bis 1300 °C erwärmt werden. Dabei ist es wichtig, eine homogene Wärmeverteilung im Knüppelquerschnitt selbst zu erreichen. Zum Erwärmen der Walzknüppel kommen verschiedene Arten von Industrieöfen zum Einsatz. Je nach Einsatzmaterial und Prozess erfolgt das Erwärmen in Stoßöfen, Drehherdöfen oder Hubbalken- bzw. Hubherdöfen. Sie alle stellen Arten von Industrieöfen zum kontinuierlichen Erwärmen von Stahlknüppeln dar. Öfen, die diskontinuierlich arbeiten, finden heute kaum mehr Verwendung. [10]

Hubbalken- und Hubherdöfen zeichnen sich durch eine hohe Durchsatzmenge und Flexibilität

2. Theoretische Grundlagen

aus und finden daher oft Verwendung in der Stahlindustrie. Sie unterscheiden sich vor allem im Transportsystem von den anderen Industrieöfen [11]. Die Beheizung der Öfen erfolgt mit zahlreichen Decken- und Seitenbrennern, die einen homogenen Wärmeübergang über die Länge und Breite des Ofens ermöglichen. Dabei kommen die Flammen mit den Knüppeln nicht in Berührung, um eine Überhitzung zu vermeiden. Hubbalken- und Hubherdöfen verfügen über verschiedene Temperaturzonen, die eine angepasste Betriebsweise in Abhängigkeit der Ofenleistung ermöglichen. Die wesentliche Aufgabe dieses Ofens ist es, das Warmwalzwerk mit homogen erwärmten Knüppeln und Brammen zu versorgen. Je nach Werkstoff und weiterer Verarbeitung ist die Temperatur der Werkstücke maßgebend. Beispielsweise können zu kalte Werkstücke aufgrund der temperaturbedingten Reduktion der Festigkeit nicht hinreichend umgeformt werden. Da die kontinuierliche Messung des Temperaturfeldes der Knüppel nur schwer möglich ist, sind manche Öfen mit Online-Ofenrechnermodellen ausgestattet. Deren grundlegende Aufgabe ist die Modellierung des instationären Temperaturfeldes. Die Simulation des Temperaturfeldes der Knüppel basiert auf der Netto-Strahlungsmethode sowie der Finiten-Volumen-Methode mit entsprechendem Strahlungsmodell. Die charakteristischen Temperaturen sind in der Regel die Oberflächentemperatur sowie die Temperatur in der Knüppelmitte. Abbildung 2.1 zeigt den Querschnitt eines modernen Hubbalkenofens mit dem typischen rechteckigen Querschnitt. [12]

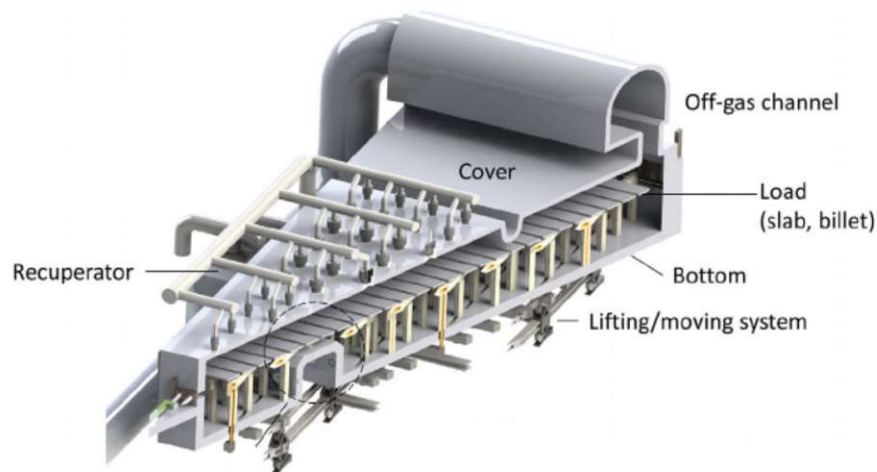


Abbildung 2.1.: *Querschnitt eines Hubbalkenofens [12].*

Industrieöfen weisen erhebliche Energieverluste durch zu hohe Abgastemperaturen auf. Bei

2. Theoretische Grundlagen

Betriebstemperaturen von 1300 °C bleiben mit konventioneller Technik etwa 70 % der eingesetzten Wärmeenergie ungenutzt. Insbesondere hier spielen Effizienzmaßnahmen eine große Rolle. Um die Wärmeenergie des Abgases zu nutzen, werden Rekuperatoren zur Vorwärmung der Verbrennungsluft eingesetzt. Dabei kann in einem Wärmetauscher die Verbrennungsluft von dem etwa 800 °C heißen Abgas auf eine Temperatur von 550 bis 600 °C erwärmt werden. Das geht mit einer Energieersparnis von etwa 30 % einher. [13]

Entzundern

Beim Vorgang des Erwärmens reagiert Stahl in der heißen Ofenatmosphäre mit dem Abgas zu Eisenoxid (FeO), Magnetit (Fe₃O₄) und Hematit (Fe₂O₄). Diese Reaktionsprodukte an der Oberfläche der Stahlknüppel werden Zunder genannt und haben einen großen Einfluss auf die Oberflächenqualität des Stahls. Um das Einpressen des Zunders durch die Walzen zu vermeiden, muss die Eisenoxidschicht von den Knüppeln entfernt werden. Dies erfolgt in der Regel mittels eines Wasserstrahls bei einem Druck von 120 bis 250 bar. Eine ausgeprägte Zunderschicht geht außerdem mit nicht unbedeutenden Materialverlusten einher und ist deshalb schon beim Erwärmen durch angepasste Betriebsbedingungen möglichst zu minimieren. [10], [11]

Walzen

Bei warmgewalzten Stangen und Stäben handelt es sich um Erzeugnisse mit relativ kleinem Querschnitt, die in gewickelter oder gerader Form hergestellt werden. Für den Walzvorgang werden profilierte Walzen verwendet, die dem Stahl die gewünschte Endform geben. Diese werden elektrisch angetrieben. Stabstahlwalzwerke sind kontinuierlich arbeitende Walzwerke mit Vor-, Zwischen- und Fertigwalzstrecken. Jede Walzstrecke besteht aus mehreren Walzgerüsten. Bei der Vorwalzstrecke kommt es zur ersten Dickenabnahme der Knüppel. Danach durchläuft das Walzgut die Walzgerüste der Zwischen- und Fertigwalzstrecke, die abwechselnd in horizontaler und vertikaler Richtung angeordnet sind. Dadurch erhält das Produkt

2. Theoretische Grundlagen

den gewünschten Querschnitt. Bei diesem Vorgang entsteht durch die hohen Druckkräfte Wärme, die die Knüppel auf Walztemperatur hält. Andererseits müssen die Walzen gekühlt werden, um die Walzen zu schützen [10]. Abbildung 2.2 zeigt die profilierten Walzen und die Formgebung für Stabstahl. [14]

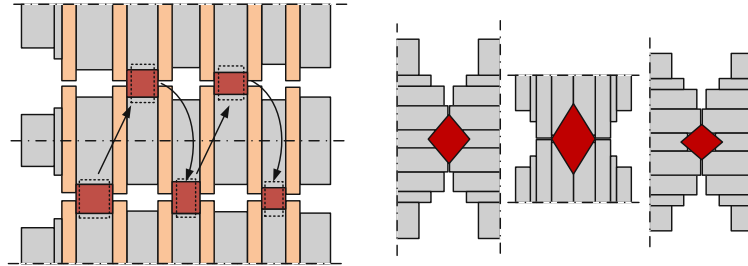


Abbildung 2.2.: Profilierte Walzen für Stabstahl, nach [14].

Als Transportmittel für das Walzgut werden in der Regel Rollgänge verwendet, die entlang der gesamten Walzstraße als Transportmittel für das Walzgut eingesetzt werden. Die Rollgänge bestehen aus einzelnen metallischen Rollen mit Einzel- oder Gruppenantrieb mittels Elektromotor und ermöglicht dem Walzgut das Fortbewegen zwischen den einzelnen Walzgerüsten. Vor dem Abkühlen wird das Walzgut mittels Sägen in lange Stäbe geschnitten und dann zum Kühlbett befördert. Das Abkühlen erfolgt meist mit Wasser oder Luft. [10]

Adjustage

Nach dem Warmwalzen verformt sich der Stahl beim Abkühlen aufgrund von Eigenspannungen und genügt im kalten Zustand oft nicht den geforderten Toleranzen. Daher werden die Produkte vor der weiteren Verarbeitung in Richtmaschinen bearbeitet. In der Richtmaschine beseitigt der gezielte Druck mehrerer Richtrollen die inneren Spannungen in den Walzstäben, wodurch die gewünschten Formtoleranzen des Produktes erreicht werden. [15]

Durch verschiedene Trennverfahren werden die Produkte auf die erforderlichen Endmaße zugeschnitten. Verschiedene Trennverfahren sind mechanisches Schneiden, Plasmaschneiden oder Laserschneiden. [16]

2.1.2. Wärmebehandlung Glühen

Stahl wird wärmebehandelt, um durch Gefügeänderungen die Verarbeitungs- oder Gebrauchseigenschaften des Werkstoffes zu verbessern. Durch die starke Verformung des Stahls beim Walzen kommt es zu einer Erhöhung Härte sowie Festigkeit. Durch das Glühen sollen Spannungen im Material wieder verringert werden. Das Glühen von Stahl erfolgt in Industrieöfen, die in der Regel gasbefeuert sind. Der Stahl wird dabei auf bis zu 800 °C erwärmt. Man unterscheidet zwischen

- Normalglühen,
- Weichglühen,
- Spannungsarmglühen und
- Rekristallisationsglühen.

Im Wesentlichen bestehen alle Wärmebehandlungen aus den Schritten: Erwärmen, Halten und langsames Abkühlen. [17]

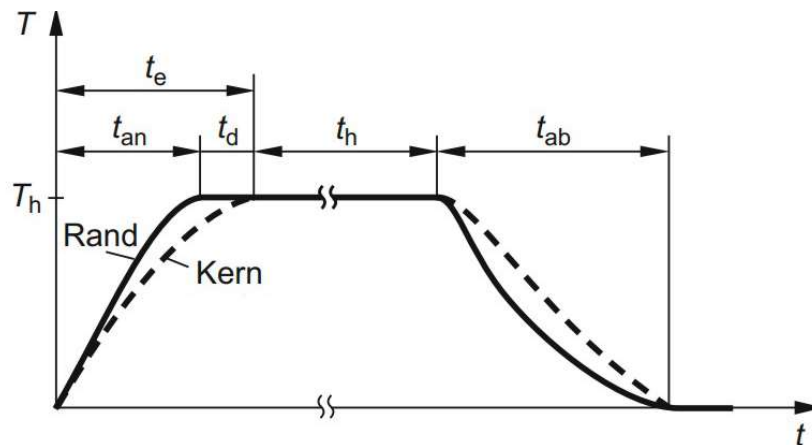


Abbildung 2.3.: Schematischer Temperaturverlauf beim Glühen. T_h ...Haltetemperatur, t_e ...Erwärmdauer, t_{an} ...Erwärmdauer Rand, t_h ...Haltedauer, t_{ab} ...Abkühldauer [17].

Abbildung 2.3 zeigt den schematischen Temperaturverlauf beim Glühen für den Kern sowie Rand des Werkstückes. Die Erwärmdauer t_e gibt die Zeit an, bis die Haltemperatur im gesamten Werkstück erreicht ist. Anschließend wird das Werkstück für die Haltedauer t_h

2. Theoretische Grundlagen

auf T_h gehalten. Die Abkühldauer wird durch t_{ab} angegeben. Die Abkühlgeschwindigkeit darf nicht zu hoch gewählt werden, da sich sonst zwischen der Werkstückoberfläche und dem Innerem des Werkstückes eine zu hohe Temperaturdifferenz ergibt. Dies würde wiederum zu unerwünschten Spannungen führen. [17]

Normalglühen

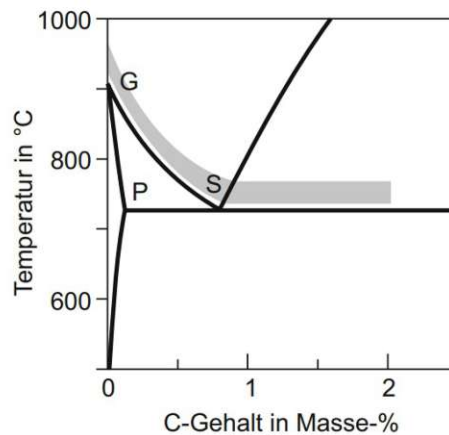


Abbildung 2.4.: *Temperaturbereich für das Normalglühen in Abhängigkeit des C-Gehaltes [17].*

Das Normalglühen wird angewandt, um durch Vorbehandlungen wie Umformen, Gießen oder Fügen aufgeprägte Zustandsänderungen wieder zu beseitigen. Man erwärmt den Stahl auf etwa 30 bis 50 °C oberhalb der A_{c3} -Temperatur und führt den Stahl so vom kubisch-raumzentrierten Ferrit in den kubisch-flächenzentrierten Austenit über. Beim Abkühlen an der Atmosphäre stellt sich ein feines, gleichmäßiges Gefüge aus Perlit und Ferrit ein. Der graue Bereich in Abbildung 2.4 zeigt den Bereich der Halte Temperaturen beim Normalglühen in Abhängigkeit des Kohlenstoffgehaltes für Stähle. [17]

Weichglühen

Weichglühen wird angewandt, um die Härte des Werkstoffes zu vermindern und die Zerspanbarkeit und Kaltumformbarkeit zu verbessern. In Abbildung 2.5 werden die Halte tempera-

2. Theoretische Grundlagen

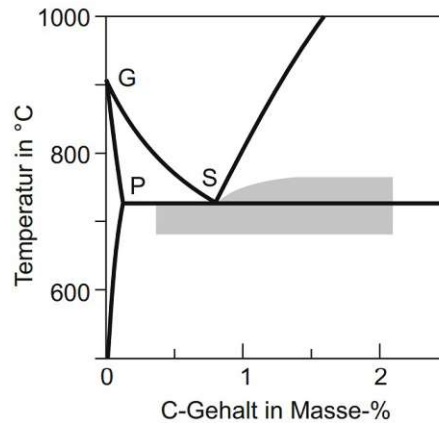


Abbildung 2.5.: Temperaturbereich für das Weichglühen in Abhängigkeit des C-Gehaltes [17].

turen in Abhängigkeit des Kohlenstoffgehalts durch die graue Zone markiert. Der Stahl wird nahe der A_1 -Temperatur hinreichend lange geglüht und dann auf Raumtemperatur abgekühlt. Dabei wird der lamellare Zementit des Perlits unter Abbau der Grenzflächenenergie in eine kugelförmige Form übergeführt, wodurch sich die Härte des Werkstoffes verringert. [17]

Rekristallisationsglühen

Rekristallisationsglühen hat das Ziel, die vor allem durch Kaltverformung entstandene Verfestigung weitgehend abzubauen. Durch das Rekristallisationsglühen kann sich der ursprüngliche Gefügestand wieder einstellen. Es kommt jedoch zu keinen Phasenumwandlungen, wie das beim Normalglühen und Weichglühen der Fall ist. Die Haltetemperaturen liegen üblicherweise zwischen 500 und 700 °C, siehe Abbildung 2.6. Sie wird hauptsächlich nach beziehungsweise zwischen einzelnen Umformstufen angewandt. Bei geringen Kohlenstoffgehalten führen Rekristallisationsglühungen zu Grobkorbbildung. [17]

2. Theoretische Grundlagen

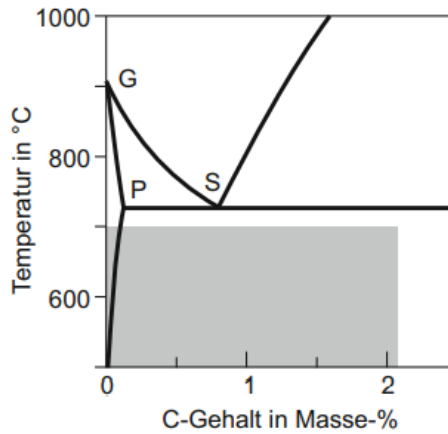


Abbildung 2.6.: *Temperaturbereich für das Rekrystallisationsglühen in Abhängigkeit des C-Gehaltes [17].*

Spannungsarmglühen

Das Spannungsarmglühen verringert die durch Kaltumformung entstandenen inneren Spannungen, ohne jedoch Gefüge- und Phasenänderungen zu verursachen. Wie in Abbildung 2.7 ersichtlich, liegen die Haltetemperaturen oberhalb beziehungsweise im Bereich der Rekrystallisationstemperaturen, üblicherweise zwischen 550 bis 670 °C. Spannungsarmglühungen haben eine kleine Erwärm- sowie Abkühlgeschwindigkeit. [17]

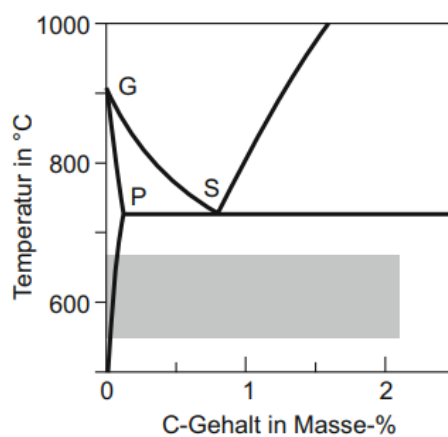


Abbildung 2.7.: *Temperaturbereich für das Spannungsarmglühen in Abhängigkeit des C-Gehaltes [17].*

2.1.3. Wärmebehandlung Härten und Vergüten

Härten

Möglichkeiten von Härten von Stahl sind das Umwandlungshärten, das Ausscheidungshärten sowie die Kaltverfestigung. Das wichtigste Verfahren ist das Umwandlungshärten und wird in diesem Unterkapitel näher erläutert. Wenn hier von Härten gesprochen wird, ist ausschließlich das Umwandlungshärten gemeint. [18]

Ziel des Härten ist es durch Martensitbildung im Werkstoff eine erhebliche Härtesteigerung zu erreichen. Der Stahl wird auf die Härtetemperatur wenig oberhalb A_{c3} -Temperatur erwärmt und anschließend schnell abgekühlt. Die kritische Abkühlgeschwindigkeit ist durch die $t_{8/5}$ -Zeit gegeben, das ist jene Zeit, die beim Abkühlen von 800 auf 500 °C vergeht. Wird die kritische Abkühlgeschwindigkeit unterschritten, so tritt keine Martensitbildung und somit keine Härtung auf. Die Abkühlgeschwindigkeit darf wegen Verzug- und Rissgefahr jedoch auch nicht zu hoch gewählt werden. Als Abkühlmittel werden Luft, Wasser, Druckgas oder Öle verwendet.

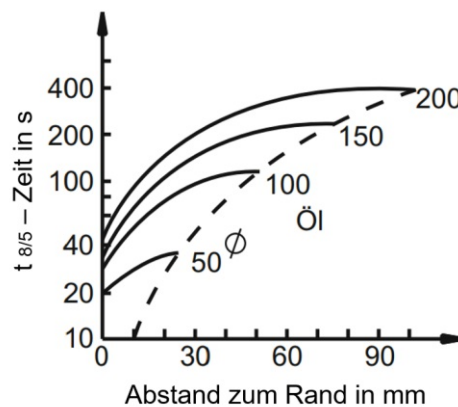


Abbildung 2.8.: $t_{8/5}$ -Zeit bei der Abkühlung mit Öl in Abhängigkeit vom Querschnittsdurchmesser [19].

Einen wichtigen Einfluss haben die Abmessungen des Werkstückes. Aus Abbildung 2.8 kann man ableiten, dass die Differenz der $t_{8/5}$ -Zeit zwischen Rand und Kern des Werkstückes mit zunehmenden Durchmesser zunimmt. Ab einem gewissen Querschnitt kann folglich die

kritische Abkühlgeschwindigkeit im Kern des Werkstückes nicht mehr erreicht werden. Somit kann keine vollständige Durchhärtung des Werkstückes erfolgen. Auch der Legierungsgehalt hat einen Einfluss auf die Durchhärtbarkeit, diese steigt mit dem Legierungsgehalt. [17], [19]

Anlassen

Durch das Anlassen wird die Zähigkeit von gehärteten Werkstücken verbessert. Da sich beim Anlassen Härte und Zähigkeit gegenläufig verändern, muss die Anlasstemperatur entsprechend des Anwendungsfalles gewählt werden. Grundsätzlich wird zwischen vier sogenannten Anlassstufen unterschieden, die durch einen Temperaturbereich begrenzt sind und bei denen folgende Umwandlungsprozesse ablaufen:

- 1. Anlassstufe ($80 < T_{An} < 200 \text{ °C}$):
Entstehung von ϵ -Carbid aus Martensit \rightarrow geringe Härtesenkung
- 2. Anlassstufe ($200 < T_{An} < 320 \text{ °C}$):
Zerfall des Restaustenits
- 3. Anlassstufe ($320 < T_{An} < 520 \text{ °C}$):
Gleichgewichtsgefüge zwischen Ferrit und Zementit stellt sich ein \rightarrow starke Härtesenkung
- 4. Anlassstufe ($450 < T_{An} < 550 \text{ °C}$):
Entstehung feinverteilter Sonder- und Mischcarbide \rightarrow führt zu einem Wiederanstieg der Härte (Sekundärhärte)

Für Werkstücke, die eine hohe Härte aufweisen sollen, wird dementsprechend eine niedrige Anlasstemperatur gewählt und für Werkstücke, die tendenziell zäher sein sollen, eine hohe. [17], [19]

Vergüten

Beim Vergüten werden die oben genannten Behandlungen Härten und Anlassen zu einer Behandlung zusammengefasst. Es wird also zuerst gehärtet und anschließend angelassen [19]. Abbildung 2.9 zeigt den schematischen Temperaturverlauf beim Vergüten. Hier sind auch gut die unterschiedlichen Abkühlgeschwindigkeiten beim Härten beziehungsweise Anlassen zu erkennen. [19]

Das Härten beziehungsweise Vergüten kann entweder in gasbefeuchten Industrieöfen erfolgen oder in strombetriebenen Induktivanlagen. Letztere haben in den letzten Jahrzehnten immer mehr an Bedeutung gewonnen. Durch die sehr schnellen Aufheizgeschwindigkeiten kommt es zu wesentlich kürzeren Wärmebehandlungszyklen, die wiederum zu erheblichen Kosteneinsparungen führen. Allerdings bestehen Unterschiede in den mechanischen Eigenschaften von konventionell beziehungsweise induktiv vergüteten Stählen. So weisen konventionell vergütete Stähle eine geringfügig höhere Härte sowie eine höhere Streckgrenze auf. [20]

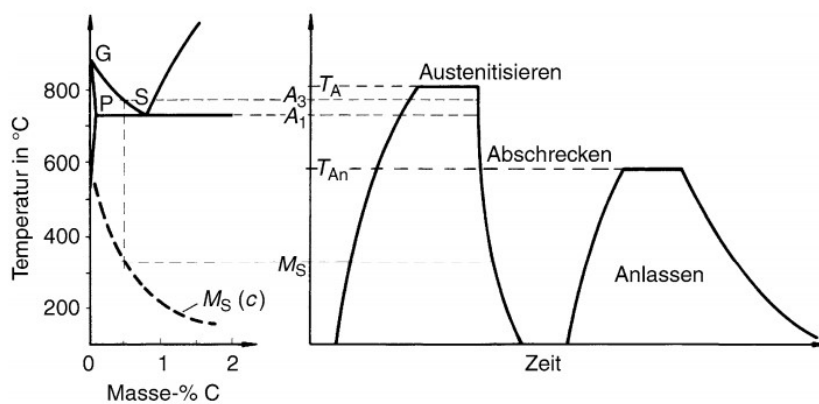


Abbildung 2.9.: Temperaturverlauf beim Vergüten von Stahl.

T_A ...Austenitisierungstemperatur, T_{An} ...Anlasstemperatur [19].

2.1.4. Mechanische Nachbearbeitung

Stahlwerkstücke können nach den Wärmebehandlungen mechanisch nachbearbeitet werden. Typische mechanischen Nachbehandlungen sind das Schälen, Drehen, Fräsen, Polieren und

2. Theoretische Grundlagen

Sägen. Für das Endprodukt Blankstahl wird der Stabstahl mittels Schälmaschinen geschält. Das Ergebnis ist eine rissfreie, hellblanke Oberfläche. Im Unterschied zum Drehen, wird beim Schälen das festsitzende Werkstück von einem umlaufenden Messerkopf umlaufen, während sich beim Drehen das Werkstück dreht und von einem festsitzenden Werkzeug bearbeitet wird. Für eine verbesserte Oberflächenqualität kann das Werkstück zusätzlich geschliffen werden, um entsprechende Rauheitswerte und Formtoleranzen zu erfüllen. Für das Ablängen auf die gewünschte Länge stehen in Stahlbetrieben Sägelinien zu Verfügung.

2.2. Modellbildung

Technischen Prozesse lassen sich mit Hilfe von mathematischen Modellen beschreiben. Derartige Modelle spielen in vielen Wissensgebieten eine wichtige Rolle und die Anwendungen sind vielfältig. Im ersten Schritt sollen Modelle das reale Verhalten eines Prozesses wiedergeben. In weiterer Folge können sie zur Vorhersage oder Prädiktion des Verhaltens eines realen Systems eingesetzt werden. Eine weitere Anwendung von Modellen findet man in der Simulation oder Optimierung technischer Systeme, um diese wirtschaftlich und ökologisch optimal zu betreiben. Grundsätzlich wird unterschieden zwischen physikalischen und datengetriebenen Modellen, sowie einer Zwischenform dieser beiden. [21]

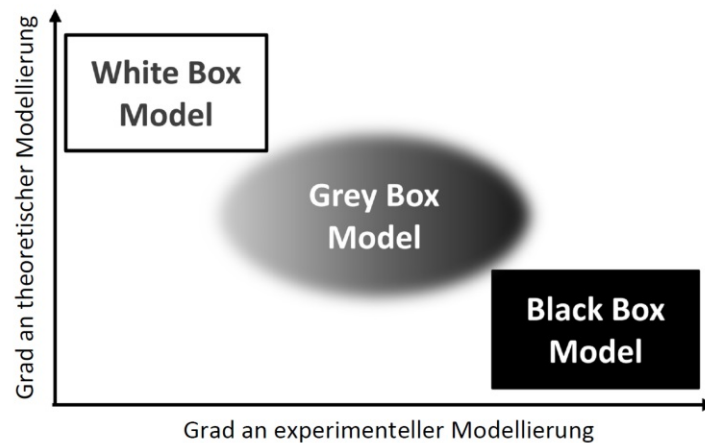


Abbildung 2.10.: Modellvarianten [22].

Werden die Modelle aus physikalischen Grundgesetzen hergeleitet, dann spricht man von *White-Box-Modeling*. White-Box-Modelle liefern oft ein tieferes Verständnis der Zusammenhänge eines Systems. Bei komplexen Systemen werden diese theoretischen Modelle jedoch sehr umfangreich, sodass sie für die praktische Anwendung wie zum Beispiel Simulationen in Echtzeit mitunter nicht mehr geeignet sind. [21]

Andererseits kann man ein mathematisches Modell anhand von Messungen der Eingangs- und Ausgangsgrößen eines realen Systems bestimmen. Hier spricht man vom *Black-Box-Modeling*. Die Parameter von Black-Box-Modellen sind oftmals vergleichsweise einfach zu bestimmen, weshalb sie für die praktische Anwendung oft bevorzugt werden. Nachteile sind,

dass die Modellparameter keine physikalische Bedeutung haben und eine Datengrundlage vorhanden sein muss. [21]

Als Zwischenform dieser beiden Modelle ist das *Grey-Box-Modeling* zu nennen. Diese liegen einem theoretischem Modell zugrunde mit einigen unbekanntem physikalischen Parametern, die anhand der Auswertung aus experimentell ermittelten Daten angepasst werden. In Abbildung 2.10 sind die drei Varianten der Modellbildung in einem Diagramm in Abhängigkeit vom Grad an theoretischer sowie experimenteller Modellierung veranschaulicht. [21]

Weiters können mathematische Modelle von linearer oder nichtlinearer Form sein. Lineare Modelle haben den Vorteil, dass die Instrumente der linearen Algebra angewandt werden können. Außerdem lassen sich viele Zusammenhänge in der Natur durch lineare Modelle beschreiben. Die in dieser Arbeit erstellten Modelle sollen die Grundlage für eine nachfolgende mathematische Optimierung bilden. Bei der mathematischen Optimierung sollen lineare Modelle zum Einsatz kommen, weshalb in dieser Arbeit die Modellierung ausschließlich linear erfolgt. [21]

2.2.1. Regressionsanalyse

Die Anpassung der Modellparameter eines linearen Modells an die Messdaten kann durch eine Regressionsanalyse erfolgen. Durch diese versucht man einen stochastischen Zusammenhang zwischen zwei oder mehreren Variablen zu finden. Die lineare Regression schätzt einerseits die Parameter dieses deterministischen Modells, als auch das Streuungsmaß. Ein linearer Zusammenhang zweier Variablen x und y wird durch die einfache Beziehung

$$y = \beta_0 + \beta_1 x \quad (2.1)$$

beschrieben. Als Parameter einer Geradengleichung treten hier β_0 und β_1 auf.

Eine klassische Methode zur Schätzung der Parameter ist die Least Square Optimierung, bei welcher der Residuenvektor minimiert wird. Die Zusammenhänge zwischen Eingängen und

2. Theoretische Grundlagen

Ausgängen können durch

$$\mathbf{y} = \mathbf{X} \hat{\boldsymbol{\beta}} + \mathbf{e} \quad (2.2)$$

dargestellt werden. Der Ausgangvektor wird durch \mathbf{y} und die Regressormatrix mit den Eingängen durch \mathbf{X} dargestellt. Der Residuenvektor \mathbf{e} und beschreibt den Fehler. Man wählt als Optimierungskriterium J die quadratische Norm nach Gleichung 2.3

$$J = \mathbf{e}^T \mathbf{e} = (\mathbf{y} - \mathbf{X} \hat{\boldsymbol{\beta}})^T (\mathbf{y} - \mathbf{X} \hat{\boldsymbol{\beta}}). \quad (2.3)$$

Weitere Umformungen der Gleichung 2.3 erlauben die Darstellung nach Gleichung 2.4

$$J = \mathbf{y}^T \mathbf{y} - 2 \hat{\boldsymbol{\beta}}^T \mathbf{X}^T \mathbf{y} + \hat{\boldsymbol{\beta}}^T \mathbf{X}^T \mathbf{X} \hat{\boldsymbol{\beta}}. \quad (2.4)$$

Das Minimum von J über $\hat{\boldsymbol{\beta}}$ erhält man durch Nullsetzen der ersten Ableitung der Gleichung 2.4 und ergibt sich zu:

$$\frac{\partial J}{\partial \hat{\boldsymbol{\beta}}} = -2 \mathbf{X}^T \mathbf{y} + 2 \mathbf{X}^T \mathbf{X} \hat{\boldsymbol{\beta}} = 0. \quad (2.5)$$

Die Lösung für die Parameter $\hat{\boldsymbol{\beta}}$ lautet

$$\hat{\boldsymbol{\beta}} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{y}. \quad (2.6)$$

Es können auch nichtlineare Funktionen in den Regressoren auftreten. Solange das Modell linear in den Parametern ist, können mit der oben angeführten Methode optimale Parameter berechnet werden. Treten auf der rechten Seite der Gleichung nichtlineare Funktionen auf, kann man diese durch eine geeignete Transformation in eine lineare Form überführen. So kann beispielsweise eine Exponentialfunktion

$$y = \alpha_0 \exp(\beta x) \quad (2.7)$$

2. Theoretische Grundlagen

durch die Transformation von y

$$y' = \ln(y) \quad (2.8)$$

in die lineare Form

$$y' = \ln(\alpha_0) + \beta x \quad (2.9)$$

übergeführt werden. [23]

3. Use Case

Als Use Case dient die Stahl Judenburg GmbH, ein Unternehmen aus der energieintensiven Industrie, welches im Bereich der Stahlverarbeitung tätig ist. In der Stahl Judenburg (STJ) werden angelieferte Stahlknüppel warmgewalzt und wärmebehandelt sowie mechanisch bearbeitet. Es werden vor allem Vergütungsstähle mit einem Legierungsanteil von bis zu 5 % aus Hochöfen eingesetzt. Primär wird Rundstahl hergestellt (etwa 90 %), daneben auch zu einem geringeren Anteil Flachstahl sowie Profilstahl (etwa 10 %). Das Hauptprodukt der STJ ist geschälter Stabstahl für die Automobilindustrie.

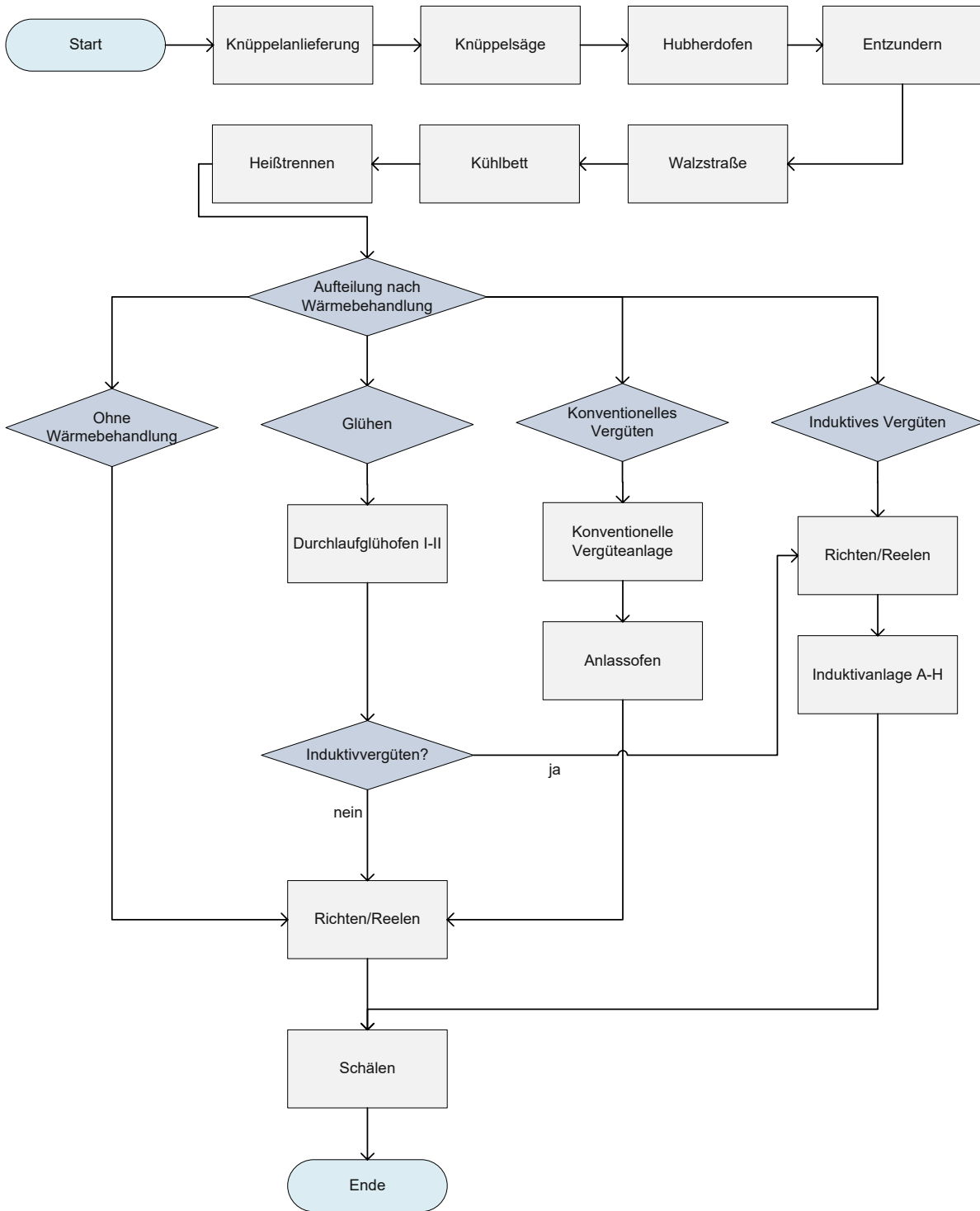
In diesem Kapitel soll ein Überblick über alle relevanten Prozesse des Unternehmens gegeben werden. Grundsätzlich durchlaufen nicht alle Produkte die gleichen Prozessschritte. Abbildung 3.1 zeigt ein schematisches Fließbild mit den möglichen Verfahrensabläufen.

3.1. Warmwalzen

Die Walzstraße setzt sich aus folgenden Komponenten zusammen:

- Knüppelsäge
- Hubherdofen
- Walzgerüsten
- Rechenkühlbett
- Heißtrennschleifmaschine.

3. Use Case



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
 The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Abbildung 3.1.: Vereinfachtes Fließbild der relevanten Prozesse und Wärmebehandlungsverfahren der STJ.

3. Use Case

Nach dem Ablängen mit der Knüppelsäge werden die Knüppel im Hubherdofen auf Walztemperatur gebracht. Anschließend durchlaufen diese mehrere Walzgerüste und werden anschließend auf einem Rechenkühlbett abgekühlt und zugeschnitten. In Abbildung 3.2 sind der Hubherdofen und die Walzgerüste dargestellt.

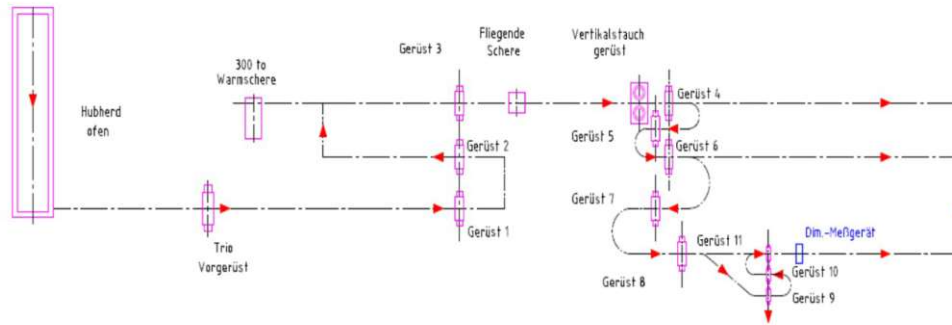


Abbildung 3.2.: Schematische Darstellung eines Teils der Walzstraße: Hubherdofen, Walzgerüste.

Knüppelsäge

Die angelieferten Knüppel haben eine Länge von 8 bis 12 m und müssen aufgrund der begrenzten Ofenbreite vor dem Eintrag auf eine Länge von 4 m zugeschnitten werden.

Hubherdofen

Die Knüppel werden mit einem Hubherdofen auf eine Walztemperatur von etwa 1200 °C erwärmt. Dieser hat vier Temperaturzonen, die mit 24 Hochgeschwindigkeitsbrennern und 9 Deckenbrennern ausgestattet sind. Bei einer Ofenlichte von 28600 mm und einer Ofenbreite von 5100 mm können 35 t/h erwärmt werden. Die Knüppel werden mit Umgebungstemperatur in den Hubherdofen eingetragen und durchlaufen vier Temperaturzonen. Die Verweilzeit der Knüppel im Hubherdofen liegt zwischen 110 bis 120 Minuten. Am Ofenaustrag liegt die Knüppeltemperatur in Abhängigkeit von Werkstoff und Dimension zwischen 1090 °C und 1170 °C. Der Hubherdofen ist mit Schamott ausgekleidet und kann mit einem Temperatur-

3. Use Case

gradienten von 100 K/h aufgeheizt werden. Durch einen Rohrbündel-Rekuperator kann die Verbrennungsluft auf maximal 500 °C vorgewärmt werden. Zum Schutz des Rekuperators wird bei zu hoher Temperatur Kaltluft eingeblasen, um so Materialschäden zu verhindern. Nach dem Rekuperator ist ein weiterer Wärmetauscher eingebaut, der Wasser auf bis zu 90 °C erwärmt. Das Warmwasser wird betriebsintern für Heizzwecke genutzt.

Der Hubherdofen ist mit einem Prozessrechner ausgestattet, der fortlaufend die Knüppeltemperatur an definierten Punkten berechnet. Die Temperaturen im Ofen sowie der Luft- und Gasverbrauch werden ebenso durch den Prozessrechner geregelt. Der kontinuierlich arbeitende Prozessrechner misst unter anderem: Temperaturen, Luftzahlen, Luft- und Gasverbrauch. Abbildung 3.3 zeigt ein Fließbild mit ein- und ausgehenden Stoffströmen für den Hubherdofen und Rekuperator.

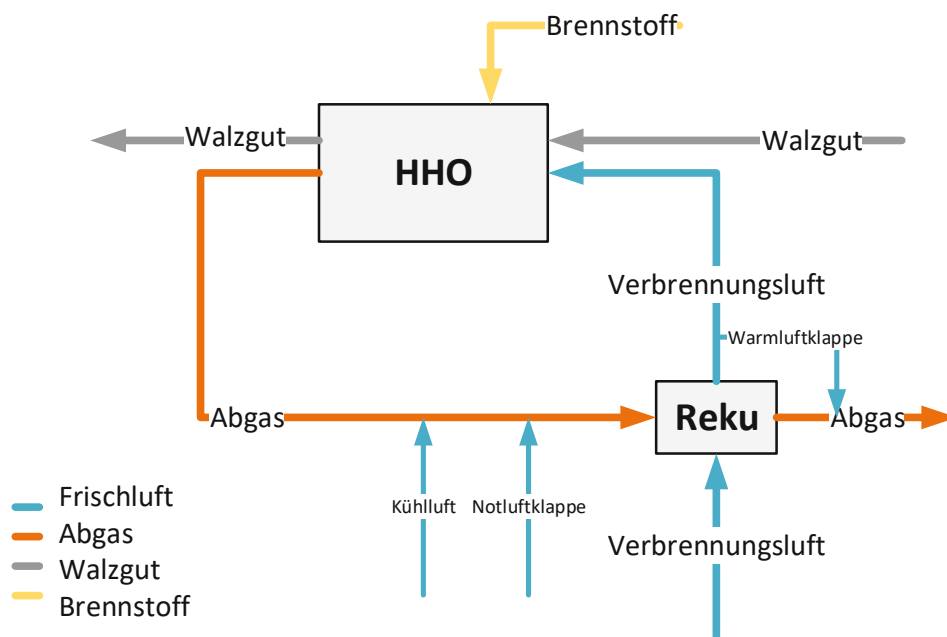


Abbildung 3.3.: *Fließbild mit ein- und ausgehenden Stoffströmen für Hubherdofen und Rekuperator.*

Die Betriebszeiten der Walzstraße sind im Allgemeinen von der Auslastung abhängig. Die Minimalauslastung beträgt eine Schicht von Montag bis Freitag (05:00 Uhr bis 13:00 Uhr). Die Betriebszeiten im Regelfall können aus Tabelle 3.1 entnommen werden.

Tabelle 3.1.: *Betriebszeiten der Walzstraße im Regelfall.*

| Tag | Anzahl Schichten | Zeit von | Zeit bis | Dauer |
|------------|------------------|-----------|-----------|-------|
| Montag | 1 | 05:00 Uhr | 13:00 Uhr | 8 h |
| Dienstag | 1 | 05:00 Uhr | 13:00 Uhr | 8 h |
| Mittwoch | 1 | 05:00 Uhr | 13:00 Uhr | 8 h |
| Donnerstag | 2 | 05:00 Uhr | 21:00 Uhr | 16 h |
| Freitag | 2 | 05:00 Uhr | 21:00 Uhr | 16 h |

In Leerzeiten, außerhalb der allgemeinen Betriebszeiten aus Tabelle 1, wird der Hubherdofen auf eine benutzerdefinierte Temperatur heruntergefahren. Von Montag bis Freitag wird zwischen dem Walzbetrieb auf 850 °C und am Wochenende auf 500 °C geregelt.

Walzgerüste

Die heißen Knüppel werden nach dem Austrag aus dem Ofen durch die Walzgerüste geschickt.

Die Walzstraße setzt sich aus den folgenden 13 Walzgerüsten zusammen:

- 1 x Trio-Vorgerüst
- 3 x Trio-Gerüste (Vorstraße)
- 6 x Duo-Gerüste (Zwischenstraße)
- 3 x Duo-Gerüste (Fertigstaffel).

Die Walzen werden elektrisch angetrieben und mit Wasser gekühlt. Der Stromverbrauch wird in monatlichen Intervallen aufgezeichnet.

Rechenkühlbett

Nach dem Durchlaufen der Walzen wird das Walzprodukt auf einem Rechenkühlbett abgekühlt. Dieses ist 35 m lang und 5 m breit. Die Knüppel werden von etwa 900 °C auf 400-500 °C durch natürliche Konvektion abgekühlt. Mit der anfallenden Strahlungswärme wird im Winter die Walzhalle beheizt.

3.2. Adjustage

Für die Adjustage stehen folgende Anlagen zur Verfügung:

- 4 Anlagen für Rundstahladjustage
- 2 Anlagen für Flach- und Profilstahladjustage.

In den Anlagen werden die Walzprodukte gerichtet, gereelt sowie gesägt.

3.3. Wärmebehandlungen

3.3.1. Konventionelle Wärmebehandlung

Wird der Stahl nach dem Durchlaufen der Walzstraße wärmebehandelt, so erfolgt dies entweder konventionell oder induktiv, wie in Abbildung 3.1 ersichtlich. Zu den konventionellen Wärmebehandlungen zählen das Glühen im Durchlaufglühofen beziehungsweise das konventionelle Vergüten in der konventionellen Vergüteanlage und dem Anlassofen. Die induktive Wärmebehandlung erfolgt in Induktivanlagen.

Durchlaufglühöfen

Durch die starke Verformung des Stahls beim Walzen kommt es zu einer Erhöhung der Härte sowie der Festigkeit. Durch das Glühen sollen Spannungen im Material wieder verringert werden, um so eine bessere Weiterverarbeitung des Materials zu ermöglichen. Die Wärmebehandlung geschieht in einem Durchlaufglühofen. In der STJ gibt es zwei Durchlaufglühöfen mit je neun Temperaturzonen. Für jeden Werkstoff ist ein definiertes Glühprogramm vorgesehen. Die Verweilzeit im Ofen liegt je nach Glühprogramm zwischen 7 und 18 Stunden bei Temperaturen von 680 bis 750 °C. Die Durchlaufglühöfen sind von Montag 06:00 Uhr bis Samstag 06:00 Uhr in Betrieb. Der Gasverbrauch wird vor und nach jedem Glühprogramm

abgelesen. Außerdem werden die Monatswerte für den Gasverbrauch erfasst. Weiters werden die Temperaturkurven in den Zonen aufgezeichnet.

Konventionelle Vergüeanlage

Durch das Vergüten soll neben einer hohen Festigkeit auch eine hohe Zähigkeit der Knüppel erzielt werden. In der konventionellen Vergüeanlage wird Stabstahl, der aufgrund der Form, der Dimension oder der Festigkeitseigenschaften nicht für das Induktivvergüten geeignet ist, vergütet. Es handelt sich um einen 2-Kammer-Pendelofen. In der ersten Kammer wird das Material vorgewärmt und in der zweiten Kammer austenitisiert. Anschließend wird das Material in einer Emulsion abgeschreckt. Der Ofen ist mit zwei Härtebecken ausgestattet. Er ist erdgasbefeuert und mit 24 Brennern ausgestattet. Die maximale Temperatur, die erreicht werden kann, beträgt 1000 °C. Stabstahl mit einem Durchmesser größer 56 mm und Flachstahl wird ausschließlich in der konventionellen Vergüeanlage vergütet. Bei einer Ofenlänge von 17,6 m und einer nutzbaren Breite von 1,3 m können bis zu 6 m lange Stäbe vergütet werden. Die Auslastung des Ofens ist im Vergleich zu den anderen Anlagen gering. Es werden 3 bis 5 Schichten in der Woche gefahren. Zusätzlich zu den erfassten Monatswerten, wird der Gasverbrauch am Anfang und am Ende jeder Schicht erfasst.

Anlassofen

Der Anlassofen ist parallel mit der konventionellen Vergüeanlage in Betrieb. Hier wird der Stahl nach dem Härtevorgang angelassen oder gegläht. Der erdgasbefeuerte Herdwagenofen ist mit zwölf Brennern ausgestattet, wobei eine maximale Temperatur von 750 °C erreicht werden kann. Die nutzbaren Ofenabmessungen betragen 8 x 2 x 1 m (L x B x H). Die Temperaturkurven während des Anlassvorganges werden mitaufgezeichnet. Der Gasverbrauch wird monatlich, sowie vor und nach jeder Schicht erfasst.

3.3.2. Induktive Wärmebehandlung

Die Induktivanlagen stellen neben der konventionellen Vergüteeanlage die zweite Möglichkeit dar, Werkstücke zu vergüten. Die Erwärmung der Knüppel erfolgt elektrisch mit Strom, wobei die vergüteten Produkte eine hohe Qualität erreichen. Ein großer Anteil der Walzprodukte wird induktiv vergütet. Die induktiven Vergüteeanlagen sind eine der Schlüsselkomponenten STJ und befinden sich daher fast rund um die Uhr im Betrieb. Der Stromverbrauch wird monatlich erfasst.

3.4. Mechanische Nachbearbeitung

Ein Teil der Werkstücke wird mechanisch nachbearbeitet. Die entsprechenden Anlagen sind im Blankstahlbetrieb der STJ angesiedelt. Verfahren, die zur Anwendung kommen sind:

- Schälen
- Schleifen
- Polieren
- Ablängen
- Fräsen.

3.5. Peripherie

Die Beheizung des Beriebes erfolgt mit Erdgas. Die Hallen für Balkstahlbetrieb und den Versand sind thermostatgeführt. Die Walzhalle hat keine eigene Beheizung, wird aber im Winter zum Großteil durch die Abwärme der heißen Knüppel beheizt. Bei einem Produktionsstillstand werden zur Anlagensicherheit und zur Frostfreihaltung mobile Gasstrahler eingesetzt.

4. Prozess- und Energieanalyse

In diesem Kapitel werden die einzelnen Prozesse in Hinblick auf den Betrieb sowie aus energietechnischer Sicht betrachtet. Ziel der Analyse ist es, die wesentlichen Energieverbraucher zu identifizieren, diese näher zu analysieren und mögliche Optimierungspotentiale der Anlagen zu ermitteln. Außerdem erfolgt die Erhebung vorhandener Daten und daraus abgeleitet werden lineare Modelle erstellt, die den Energieverbrauch abbilden.

4.1. Energieverbrauch STJ

Im ersten Schritt sollen die wesentlichen Energieverbraucher bestimmt werden. Der Energieverbrauch der Stahl Judenburg wird zu etwa 60 % durch Gas und 40 % durch Strom gedeckt. Tabelle 4.1 gibt einen Überblick aller Anlagen der STJ und deren Einteilung nach den Energieträgern Gas und Strom.

Tabelle 4.1.: *Einteilung der Anlagen nach Energieträgern.*

| Energieträger | Gas | Strom |
|---------------|-------------------|---------------------|
| Anlage | Hubherdofen | Induktivanlagen |
| | Durchlaufglühöfen | Walzstraße |
| | Hallenheizung | Blankstahlbetrieb |
| | Vergüteanlage | Druckluftversorgung |
| | Anlassofen | Hilfsbetriebe |
| | Aichelinofen | Kolbenstangenhalle |
| | Büroheizung | |

In Abbildung 4.1 sind die monatlichen Verbräuche der gasbetriebenen Anlagen und Berei-

4. Prozess- und Energieanalyse

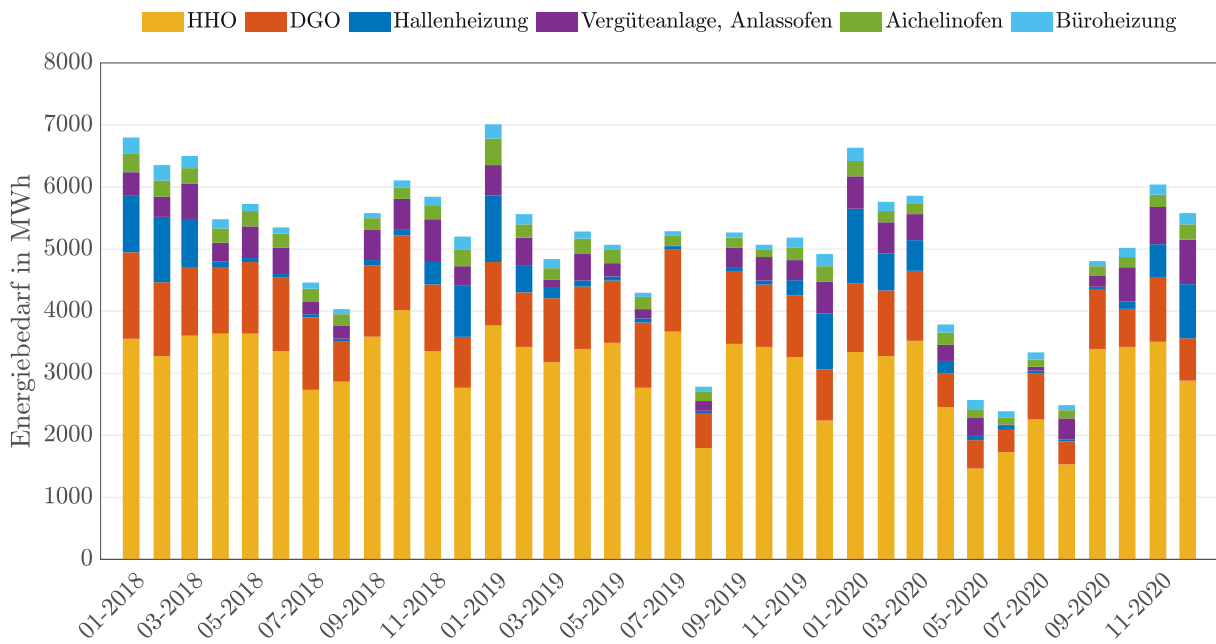


Abbildung 4.1.: Gasverbrauch der STJ von Jänner 2018 bis Dezember 2020.

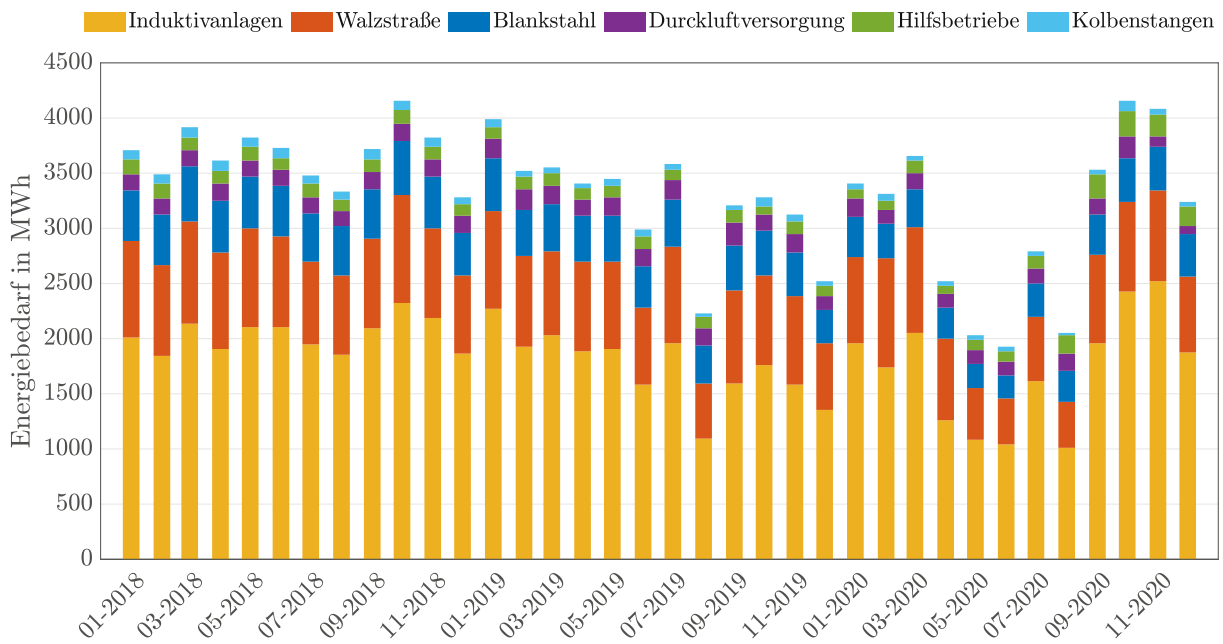


Abbildung 4.2.: Stromverbrauch der STJ von Jänner 2018 bis Dezember 2020.

chen vom Jänner 2018 bis Dezember 2020 dargestellt. Ein Einbruch aufgrund der Covid-19 Pandemie im Zeitraum April 2020 bis August 2020 lässt sich erkennen, als auch deutliche saisonale Unterschiede, die auf die Beheizung der Hallen und Büros in den Wintermona-

4. Prozess- und Energieanalyse

ten zurückzuführen ist. Weitaus der größte Energieverbraucher für Gas ist der Hubherdofen zum Erwärmen der Stahlknüpel. Weitere wichtige Verbraucher sind die Durchlaufglühöfen sowie die Hallenheizung, die in den Wintermonaten einen nicht unwesentlichen Anteil am Energieverbrauch einnimmt.

In Abbildung 4.2 sind die monatlichen Verbräuche der strombetriebenen Anlagen für den Zeitraum 2018 bis 2020 dargestellt. Auch hier ist ein deutlicher Einbruch bedingt durch die Covid-19 Pandemie ersichtlich. Aufgrund eines zweiwöchigen Stillstandes bedingt durch eine Revision des Hubherdofens im August und Dezember jeden Jahres sind die Energieverbräuche in diesen Monaten tendenziell etwas niedriger. Den eindeutig größten Verbraucher stellen die Induktivanlagen dar. Über die Hälfte des Strombedarfes entstehen durch diese. Weitere wichtige Verbraucher sind die Walzstraße sowie der Blankstahlbetrieb.

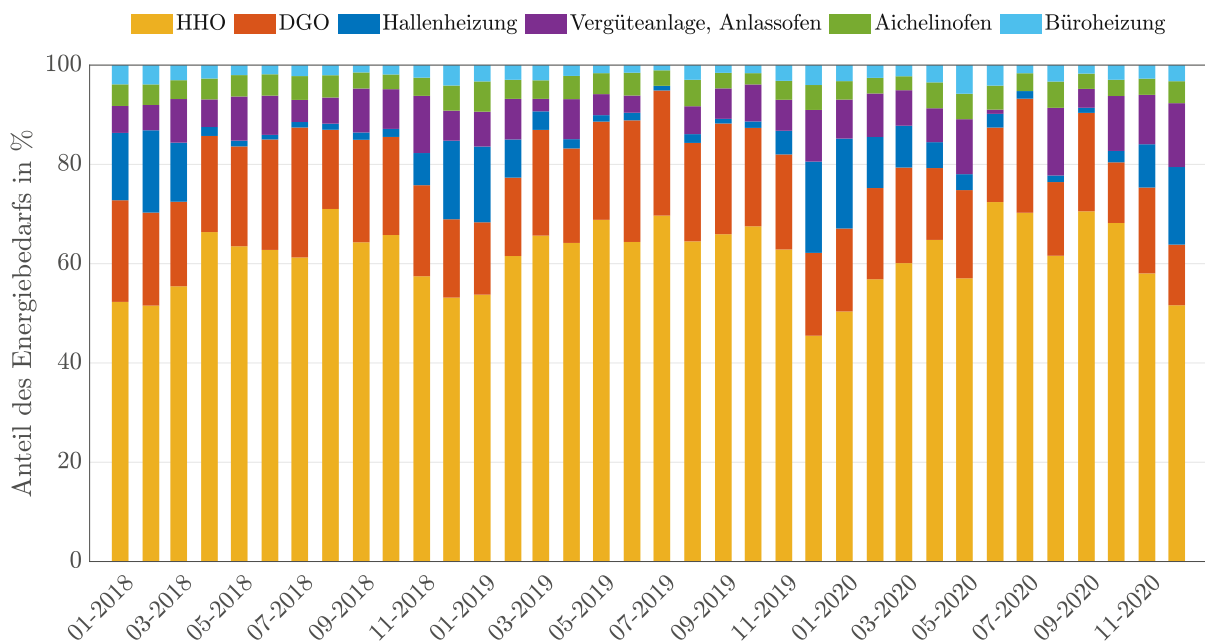


Abbildung 4.3.: Normierter Gasverbrauch der STJ von Jänner 2018 bis Dezember 2020.

Die Abbildungen 4.3 und 4.4 zeigen die normierten Energiebedarfe für den gleichen Zeitraum. Zu erkennen ist eine über das Jahr nahezu konstante Verteilung der Anteile der einzelnen Anlagen am Energiebedarf für die strombetriebenen Anlagen. Betrachtet man die gasbetriebenen Anlagen, so lassen sich deutliche saisonale Unterschiede feststellen, die im

4. Prozess- und Energieanalyse

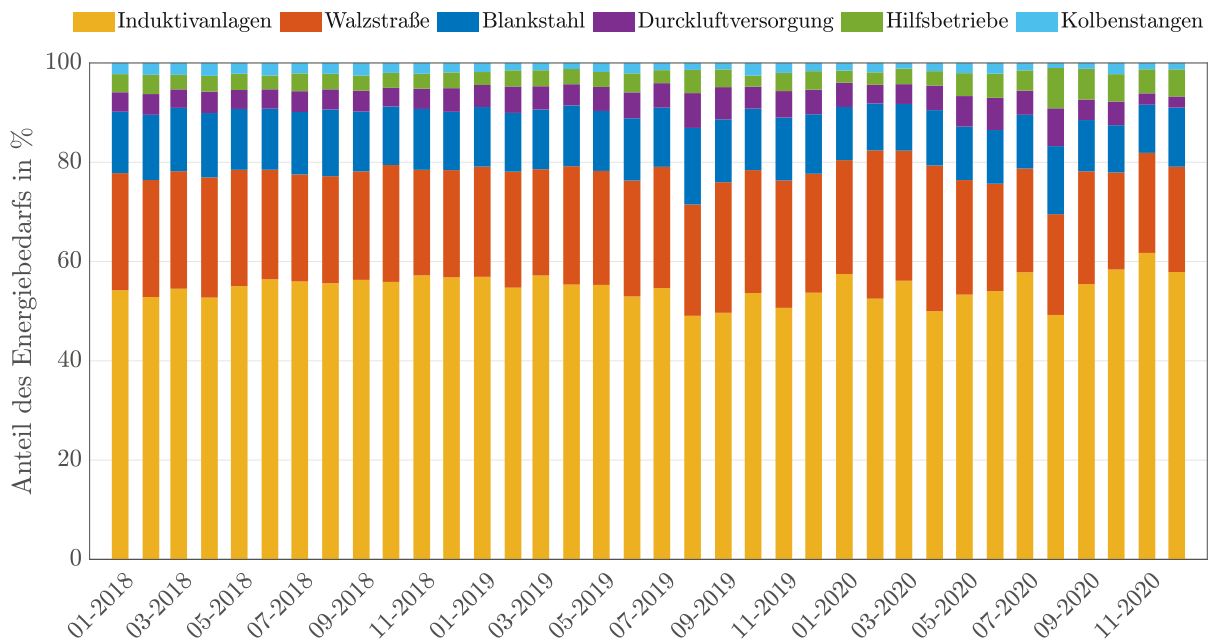


Abbildung 4.4.: Normierter Stromverbrauch der STJ von Jänner 2018 bis Dezember 2020.

Wesentlichen auf die Beheizung des Betriebes in den Wintermonaten zurückzuführen sind.

Um eine bessere Veranschaulichung der Anteile der einzelnen Verbraucher am Gesamtenergieverbrauch zu erreichen, wurde ein Sankey-Diagramm mit den einzelnen Energieflüssen erstellt. Dieses ist in Abbildung 4.5 ersichtlich. Ziel ist es die Hauptverbraucher des Prozesses zu bestimmen. Identifiziert wurden folgende sechs Anlagen beziehungsweise Bereiche, die im Mittel zusammen 89,4 % des gesamten Energieverbrauches verursachen:

- Hubherdofen (36,8 %)
- Induktivanlagen (21,8 %)
- Durchlaufglühöfen (11,3 %)
- Walzstraße (9,3 %)
- Hallen- und Bürobeheizung (5,6 %)
- Blankstahlbetrieb (4,7 %).

4. Prozess- und Energieanalyse

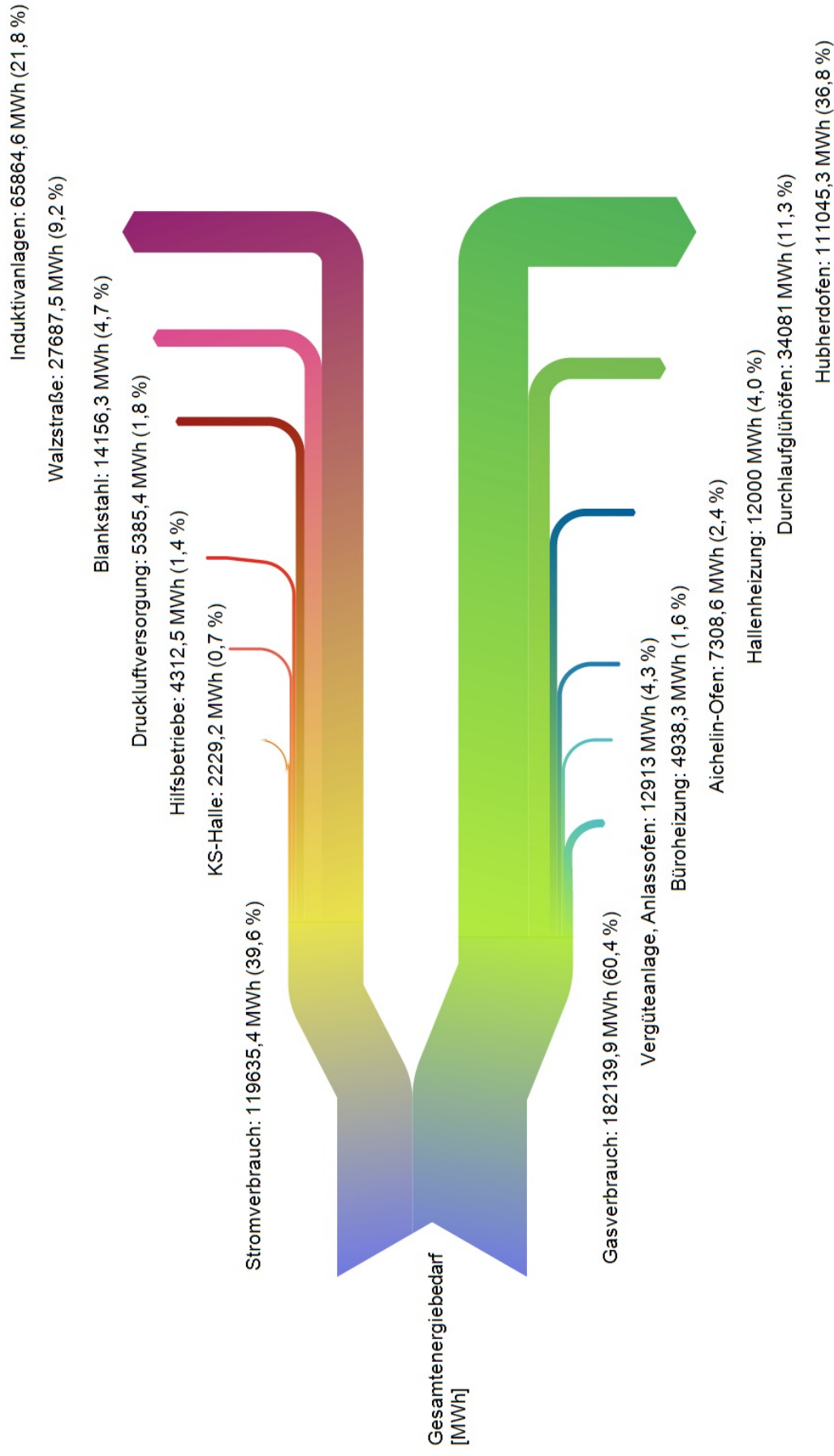


Abbildung 4.5.: Sankey-Diagramm der Energieflüsse in der STJ für den Zeitraum Jänner 2018 bis Dezember 2020.

4.2. Gasverbraucher

4.2.1. Hubherdofen

Der Hubherdofen ist der größte Energieverbraucher unter allen Anlagen und wird als erstes betrachtet. Wie bereits in Kapitel 3 erwähnt, hat der Hubherdofen grundsätzlich fixe Walzzeiten, in denen er auf Walztemperatur aufgeheizt wird. Die Abbildung 4.6 zeigt repräsentativ den Temperaturverlauf einer Woche für die vier Temperaturzonen des Ofens. An dieser Abbildung lassen sich die Betriebszeiten gut erkennen (Bereich „Erwärmen“). In Leerzeiten, wird der Ofen unter der Woche auf 850 °C und am Wochenende auf 500 °C geregelt. Beim Abkühlen auf 500 °C am Wochenende ist die überwiegende Mehrheit der Brenner nicht im Betrieb. Bevor der Ofen zu Beginn der Woche wieder den Betrieb startet, wird er erneut auf 1200 °C aufgeheizt. Hier kann man auch den maximalen Aufheizgradienten von 100 K/h erkennen.

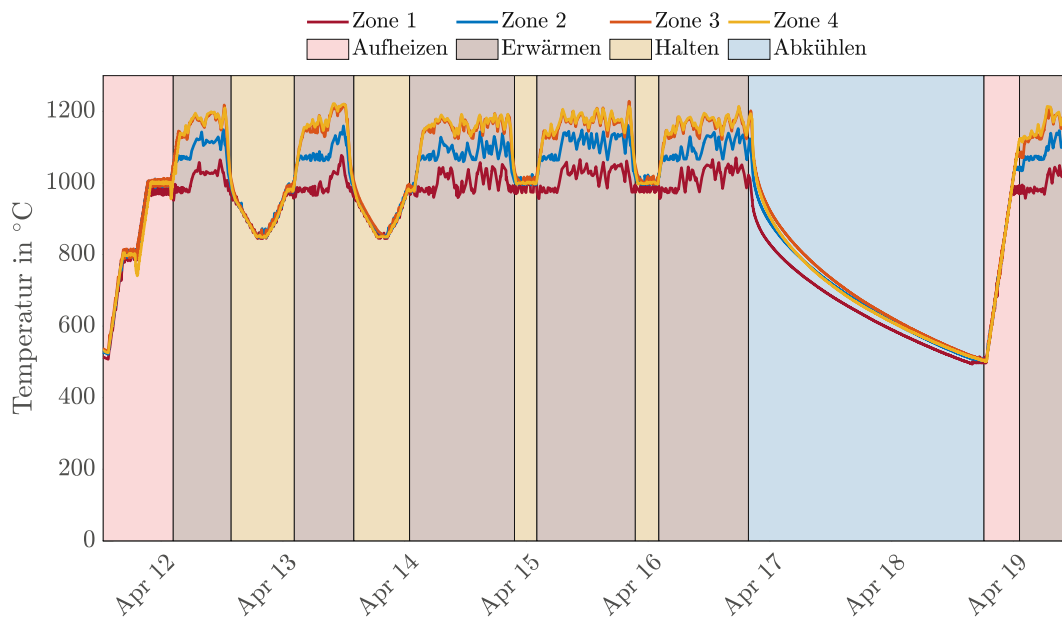


Abbildung 4.6.: Temperaturverlauf für den HHO für KW18 des Jahres 2021.

Tabelle 4.2.: *Aufgezeichnete Daten des Hubherofens.*

| Messwert | Einheit |
|---------------------------------------|--------------------|
| Gasverbrauch | Nm ³ /h |
| Luftverbrauch | Nm ³ /h |
| Temperatur Abgas vor Reku | °C |
| Temperatur Abgas nach Reku | °C |
| Temperatur Verbrennungsluft nach Reku | °C |
| Temperatur in Zone 1,2,3,4 | °C |
| Luftzahl | - |

Für die Modellierung des Energiebedarfes wurde der Betrieb in die vier Phasen

- Erwärmen des Stahls,
- Aufheizen des Ofens,
- Abkühlen und
- Halten der Temperatur zwischen den Walzschichten

aufgeteilt, für welche jeweils ein Teilmodell erstellt wurde. Die vier Phasen sind in Abbildung 4.6 farblich hinterlegt.

Etwa 85 % der Energie wird im Zuge der Knüppelerwärmung eingesetzt und stellt somit den wichtigsten Teil des Modells dar. Wie bereits erwähnt, werden durch den Prozessrechner des Hubherdofens sämtliche Temperaturen, sowie momentaner Luft und Gasverbrauch aufgezeichnet, welche in Tabelle 4.2 ersichtlich sind. Aus den vorliegenden Daten wurde im ersten Schritt der genaue Gasverbrauch für die Zeiträume des Erwärmens berechnet. Der absolute Gasverbrauch entspricht dem Integral über die Messwerte für den momentanen Gasverbrauch und wurde numerisch mit Hilfe der Trapezregel

$$V_{\text{Br}} = (t_2 - t_1) \frac{\dot{V}_{\text{Br}}(t_2) + \dot{V}_{\text{Br}}(t_1)}{2} \quad (4.1)$$

berechnet. V_{Br} gibt den absoluten Gasverbrauch in Nm³ zwischen den Zeitpunkten t_1 und t_2 wieder. \dot{V}_{Br} steht für den momentanen Gasverbrauch in Nm³/h. Die erhaltenen Werte wurden mit manuell notierten Gaszählerständen verglichen und validiert. Aus den vorlie-

4. Prozess- und Energieanalyse

genden Daten konnte eine lineare Abhängigkeit zwischen der Durchsatzmenge an Stahl und dem Gasverbrauch festgestellt werden. Durch eine lineare Regression wurden die Parameter $\beta_{0 \text{ HHO}_1} = -710,88$ und $\beta_{1 \text{ HHO}_1} = 0,0373$ des linearen Modells ermittelt, siehe Abbildung 4.7. Das Teilmodell ergibt sich dann nach Gleichung 4.2 zu

$$V_{\text{Br, HHO}_1}(m_{\text{St}}) = \beta_{0 \text{ HHO}_1} \text{Nm}^3 + \beta_{1 \text{ HHO}_1} \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} m_{\text{St}}, \quad \text{für } 2 \cdot 10^5 \text{ kg} < m_{\text{St}} < 5 \cdot 10^5 \text{ kg} \quad (4.2)$$

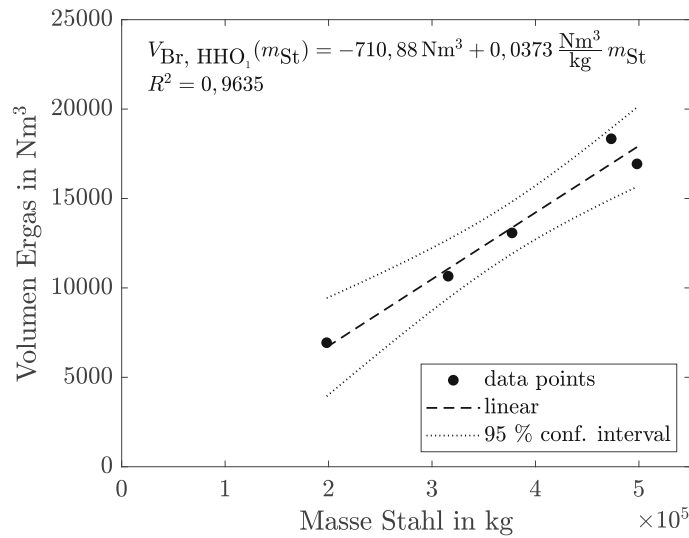


Abbildung 4.7.: Regressionsgerade für das Modell Erwärmen des Stahls.

Das nächste Teilmodell wurde für die Aufheizgerade erstellt. Diesmal wurde der Gasverbrauch in Abhängigkeit von der Temperatur beschrieben. Für das lineare Modell wurden die Parameter $\beta_{0 \text{ HHO}_2} = -74,252$ und $\beta_{1 \text{ HHO}_2} = 0,0093$ ermittelt. Die zugehörige Regressionsgerade ist in Abbildung 4.8 ersichtlich. Man beachte, dass das Modell nur Gültigkeit für eine Aufheizgeschwindigkeit von 100 K/h hat. Das Modell zur Abbildung des Energieverbrauches zwischen den Temperaturen T_1 und T_2 ergibt sich zu

$$V_{\text{Br, HHO}_2}(T_1, T_2) = \frac{(\beta_{0 \text{ HHO}_2} \frac{\text{Nm}^3}{\text{°C}} + \beta_{1 \text{ HHO}_2} \frac{\text{Nm}^3}{\text{°C}^2} T_1) + (\beta_{0 \text{ HHO}_2} \frac{\text{Nm}^3}{\text{°C}} + \beta_{1 \text{ HHO}_2} \frac{\text{Nm}^3}{\text{°C}^2} T_2)}{2} (T_2 - T_1), \quad (4.3)$$

für $580 \text{ °C} < T_1, T_2 < 980 \text{ °C}$

4. Prozess- und Energieanalyse

Im Anschluss an die fünf Walzschichten kann man in Abbildung 4.6 eine Abkühlkurve

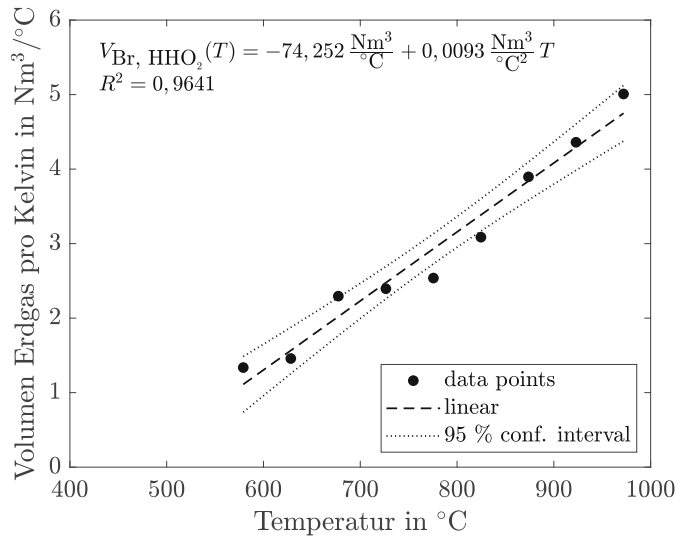


Abbildung 4.8.: Regressionsgerade für das Modell Aufheizen.

erkennen (etwa Apr 17 bis Apr 19). Der Ofen wird auf 500 °C heruntergekühlt. In dieser Zeit sind die Gasbrenner zum Großteil ausgeschaltet und der Gasverbrauch vernachlässigbar klein und kann somit gleich null gesetzt werden. Dies ergibt:

$$V_{Br, HHO_3} = 0 \quad (4.4)$$

Betrachtet man die ganze Woche, so bleibt noch ein kleiner Anteil an Energie zu modellieren, der zwischen den Walzschichten verbraucht wird. In Abbildung 4.6 sieht man, dass am 13. und am 14. April zwischen den Walzschichten abgekühlt und anschließend aufgeheizt wird. Hier konnte jedoch kein Zusammenhang zwischen Gasverbrauch und Temperatur festgestellt werden, weshalb auch diese Bereiche zum Teilmodell „Halten“ dazugezählt werden. Des Gasverbrauch für jene Zeiträume wurde berechnet und geht wie folgt als Konstante $\beta_0_{HHO_4} = 4720,69$ in das Modell ein:

$$V_{Br, HHO_4} = \beta_0_{HHO_4} Nm^3 \quad (4.5)$$

Zusammenfassend kann der Energieverbrauch durch Addition der Teilmodelle

$$V_{Br, HHO} = V_{Br, HHO_1}(m_{St}) + V_{Br, HHO_2}(T_1, T_2) + V_{Br, HHO_3} + V_{Br, HHO_4} \quad (4.6)$$

ermittelt werden.

Optimierungspotential

Prinzipiell wird der Hubherdofen durch den eingebauten Prozessrechner geregelt. Bei der Fahrweise des Ofens könnte man die Temperatur zwischen den Walzschichten weiter abkühlen lassen, derzeit werden sie mit einem Temperaturgradienten von 32 K/h aufgeheizt. Dies wäre eine Möglichkeit, den Energieverbrauch geringfügig zu senken. Im Allgemeinen ist der Ofen gut geregelt und bietet nur wenige Verbesserungsmöglichkeiten zur energieeffizienteren Fahrweise.

Abgesehen von der Fahrweise des Ofens wäre es energietechnisch sinnvoll, die entstehende Abwärme zu nutzen. Das heiße Abgas hat trotz Verbrennungsluftvorwärmung, welche jedoch durch eine Temperatur von 500 °C begrenzt ist, immer noch ein hohes Temperaturniveau besitzt. Zum Teil wird diese Abwärme zur Beheizung sämtlicher Büroräumlichkeiten genutzt. Weitere Möglichkeiten, die Abwärme zu nutzen, wäre die Vorwärmung der Knüppel mit dem Abgas oder die Integration der Abwärme in bestehende Fernwärmenetze.

4.2.2. Durchlaufglühofen

Die zwei Durchlaufglühöfen, die nachfolgend als DGO1 und DGO2 bezeichnet werden, sind der zweitgrößte Energieverbraucher für Gas in der Stahl Judenburg GmbH. Sie sind von Montag bis Samstag in Betrieb. Wie bereits erwähnt, gibt es für die Wärmebehandlung in den Durchlaufglühöfen über 100 definierte Glühprogramme, mit denen sich Werkstoffeigenschaften einstellen lassen. Kundenanforderungen bestimmen welches Glühprogramm zum Einsatz kommt. Für jedes Glühprogramm ist eine fixe Vorschubgeschwindigkeit sowie Temperatur für jede der neun Temperaturzonen definiert. Der Massenstrom an Stahl, der durchgeschickt wird, ist nahezu immer konstant und ist durch den maximalen Massenstrom der jeweiligen Anlage gegeben.

4. Prozess- und Energieanalyse

Innerhalb einer Woche werden meistens zwei bis vier Chargen im Durchlaufglühofen wärmebehandelt. Jede dieser Charge durchläuft ein bestimmtes Glühprogramm. Nachdem das letzte Werkstück der erste Charge dem Ofen zugeführt wurde, kann der Ofen mit der zweiten Charge beschickt werden. Dabei ist jedoch zu beachten, dass zwischen den beiden Chargen ein gewisser Leerraum besteht, damit sich die Temperaturen des neuen Glühprogrammes in den einzelnen Zonen einstellen können.

Bei der Planung der ablaufenden Glühprogramme innerhalb einer Woche ist außerdem darauf zu achten, dass mit jenem Glühprogramm gestartet wird, welches die größte Vorschubgeschwindigkeit hat. Nachdem sich beim Wechsel der Glühprogramme zwei Chargen gleichzeitig im Ofen befinden, kann die nachfolgende Charge keine höhere Vorschubgeschwindigkeit aufweisen, da diese sonst die vorhergehende Charge einholen würde. DGO1 hat zwei Geschwindigkeitszonen, dadurch muss beim Wechsel der Glühprogramme mit unterschiedlicher Vorschubgeschwindigkeit der halbe Ofen leergefahren werden. DGO2 hat neun Geschwindigkeitszonen. Hier werden beim Wechsel der Glühprogramme zwei Geschwindigkeits- beziehungsweise Temperaturzonen freigelassen.

Zur Modellierung des Energieverbrauches für die beiden Durchlaufglühöfen wurde überprüft, ob es Zusammenhänge zwischen Stahlsorte, Durchsatzmenge, Glühprogramm und Gasverbrauch gibt. Es konnte festgestellt werden, dass die Stahlsorte im Wesentlichen keinen Einfluss auf den spezifischen Gasverbrauch hat und ausschließlich vom Massenstrom und dem entsprechenden Glühprogramm bestimmt ist. Aufgrund der ähnlichen chemischen Zusammensetzung der Stähle haben Unterschiede in den Stahlsorten keinen Einfluss.

Im folgenden Schritt wurden jene Glühprogramme für jeweils beide Durchlaufglühöfen identifiziert, die zur Anwendung kommen. Tabellen 4.3 und 4.4 zeigen die Anteile der jeweiligen Glühprogramme, die im Zeitraum Jänner 2018 bis Dezember 2020 gefahren wurden. Modelliert wurden die in den Tabellen angeführten Glühprogramme. Als Datengrundlage standen Energieverbräuche für jeden Glühvorgang zu Verfügung. Nun wurde für jedes Glühprogramm i beziehungsweise j ein Modell in Abhängigkeit von der Durchsatzmenge erstellt und ergibt

4. Prozess- und Energieanalyse

für DGO1 Gleichung 4.7 mit den Parametern $\beta_{0 \text{ DGO1},i}$ und $\beta_{1 \text{ DGO1},i}$

$$V_{\text{Br, DGO1},i}(m_{\text{St}}) = \beta_{0 \text{ DGO1},i} \text{Nm}^3 + \beta_{1 \text{ DGO1},i} \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} m_{\text{St}}, \quad \text{für } 4,5 \cdot 10^3 \text{ kg} < m_{\text{St}} < 2,5 \cdot 10^5 \text{ kg} \quad (4.7)$$

und für DGO2 Gleichung 4.8 mit den Parametern $\beta_{0 \text{ DGO2},j}$ und $\beta_{1 \text{ DGO2},j}$

$$V_{\text{Br, DGO2},j}(m_{\text{St}}) = \beta_{0 \text{ DGO2},j} \text{Nm}^3 + \beta_{1 \text{ DGO2},j} \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} m_{\text{St}}, \quad \text{für } 4,5 \cdot 10^3 \text{ kg} < m_{\text{St}} < 5 \cdot 10^5 \text{ kg}. \quad (4.8)$$

In den Abbildungen 4.9 und 4.10 sind beispielhaft Regressionsgeraden für jeweils ein Glühprogramm für DGO1 und DGO2 dargestellt. Die Regressionsgeraden der restlichen Modelle sind im Anhang zu finden. Die Parameter der linearen Regressionsmodelle können den Tabellen 4.3 und 4.4 entnommen werden.

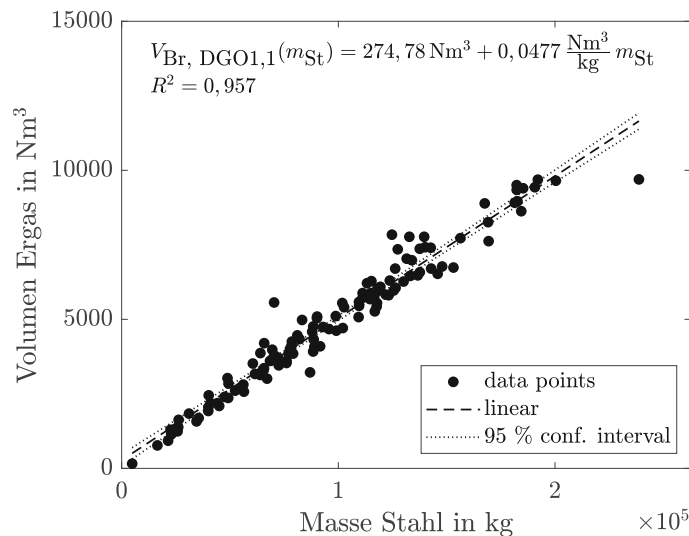


Abbildung 4.9.: *Regressionsgerade für das V947-Glügen im DGO1.*

Wie schon aus den obigen Anführungen erkennbar ist der Ofen nicht durchgehend beladen. Zwischen zwei Glühprogrammen gibt es eine bestimmte Leerzeit, damit die Temperaturen in den einzelnen Zonen angepasst werden können. Die Leerzeit variiert und ist abhängig von den Vorschubgeschwindigkeiten des vor- und nachlaufenden Glühprogramms. Somit ergeben sich in den Leerzeiten unterschiedliche Gasverbräuche und werden in Abhängigkeit von der

4. Prozess- und Energieanalyse

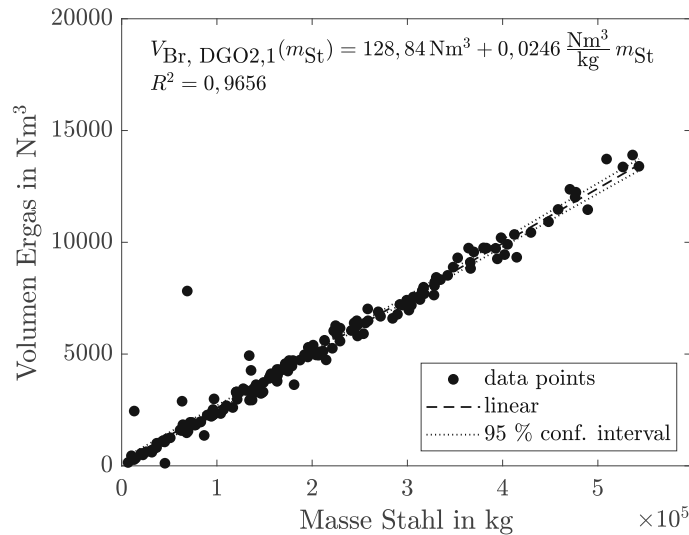


Abbildung 4.10.: Regressionsgerade für das E-Glügen im DGO2.

Leerzeit Δt durch das Modell

$$V_{Br, DGO1,Leer}(\Delta t) = \beta_0 \text{ DGO1,Leer Nm}^3 + \beta_1 \text{ DGO1,Leer} \frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} \Delta t, \text{ für } 0 \text{ h} \leq \Delta t \leq 75 \text{ h} \quad (4.9)$$

mit den Parametern $\beta_0 \text{ DGO1,Leer} = 186,6$ und $\beta_1 \text{ DGO1,Leer} = 43,09$ für DGO1 und durch das Modell

$$V_{Br, DGO2,Leer}(\Delta t) = \beta_0 \text{ DGO2,Leer Nm}^3 + \beta_1 \text{ DGO2,Leer} \frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} \Delta t, \text{ für } 0 \text{ h} \leq \Delta t \leq 70 \text{ h} \quad (4.10)$$

mit den Parametern $\beta_0 \text{ DGO2,Leer} = 1493$ und $\beta_1 \text{ DGO2,Leer} = 16,464$ für DGO2 beschrieben.

In Summe ergibt sich für den Gasverbrauch für DGO1 nach den Gleichungen 4.7 und 4.9

$$V_{Br, DGO1} = \sum_i V_{Br, DGO1,i}(m_{St}) + V_{Br, DGO1,Leer}(\Delta t) \quad (4.11)$$

sowie für DGO2 nach den Gleichungen 4.8 und 4.10

$$V_{Br, DGO2} = \sum_j V_{Br, DGO2,j}(m_{St}) + V_{Br, DGO2,Leer}(\Delta t). \quad (4.12)$$

Tabelle 4.3.: *Glühprogramme und Parameter der linearen Modelle für DGO1.*

| i | Glühprogramm | Anteil in % | $\beta_{0 \text{ DGO1},i}$ | $\beta_{1 \text{ DGO1},i}$ |
|---|--------------|-------------|----------------------------|----------------------------|
| 1 | V947 | 56, 66 | 274, 78 | 0, 0477 |
| 2 | E | 26, 77 | -89, 20 | 0, 0280 |
| 3 | E-2 | 10, 03 | 43, 68 | 0, 0265 |
| 4 | V320-GKZ | 2, 23 | 19, 13 | 0, 0543 |
| 5 | GKZ | 1, 37 | 120, 85 | 0, 0398 |
| 6 | K-742 | 0, 99 | 118, 27 | 0, 0199 |
| 7 | A-470 | 0, 99 | 148, 58 | 0, 0412 |
| - | andere | 0, 98 | - | - |

Tabelle 4.4.: *Glühprogramme und Parameter der linearen Modelle für DGO2.*

| j | Glühprogramm | Anteil in % | $\beta_{0 \text{ DGO2},j}$ | $\beta_{1 \text{ DGO2},j}$ |
|---|--------------|-------------|----------------------------|----------------------------|
| 1 | E | 54, 35 | 128, 84 | 0, 0246 |
| 2 | E-2 | 35, 15 | 204, 05 | 0, 0243 |
| 3 | ZB | 7, 21 | 65, 11 | 0, 0292 |
| 4 | V947 | 1, 07 | 312, 93 | 0, 0350 |
| 5 | V320-GKZ | 0, 12 | -102, 31 | 0, 0569 |
| - | andere | 2, 10 | - | - |

Optimierungspotential

Aus energietechnischer Sicht macht es Sinn, die Glühprogramme nach aufsteigender Temperatur anzuordnen. Erfahrungsgemäß dauert das Abkühlen eines Ofens länger als das Aufheizen. Somit ergeben sich durch unnötige Abkühlungen längere Leerzeiten. Es ist jedoch die Randbedingung zu beachten, dass die Glühprogramme nicht wahllos aneinander gereiht werden können, da innerhalb einer Woche immer mit dem Glühprogramm mit der schnellsten Vorschubgeschwindigkeit gestartet werden muss. Nachdem die Durchlaufglühöfen auf einem relativ hohen Temperaturniveau arbeiten, wäre außerdem eine Abwärmenutzung anzudenken.

4.2.3. Beheizung

Die Beheizung des Werkes wird in die Hallen- und Büroheizung unterteilt. Die Hallen- beziehungsweise die Büroheizung sind mit jeweils 4 und 1,6 % am Gesamtenergieverbrauch relativ kleine Verbraucher. In Abbildung 4.11 ist der Gasverbrauch sowie die durchschnittliche Außentemperatur über den Zeitraum vom Jänner 2018 bis Dezember 2020 aufgetragen. Die Temperaturwerte stammen aus Quelle [24]. Hier ist ersichtlich, dass der Gasverbrauch mit absinkender Außentemperatur zunimmt. Zur Modellierung des Energiebedarfes wurde

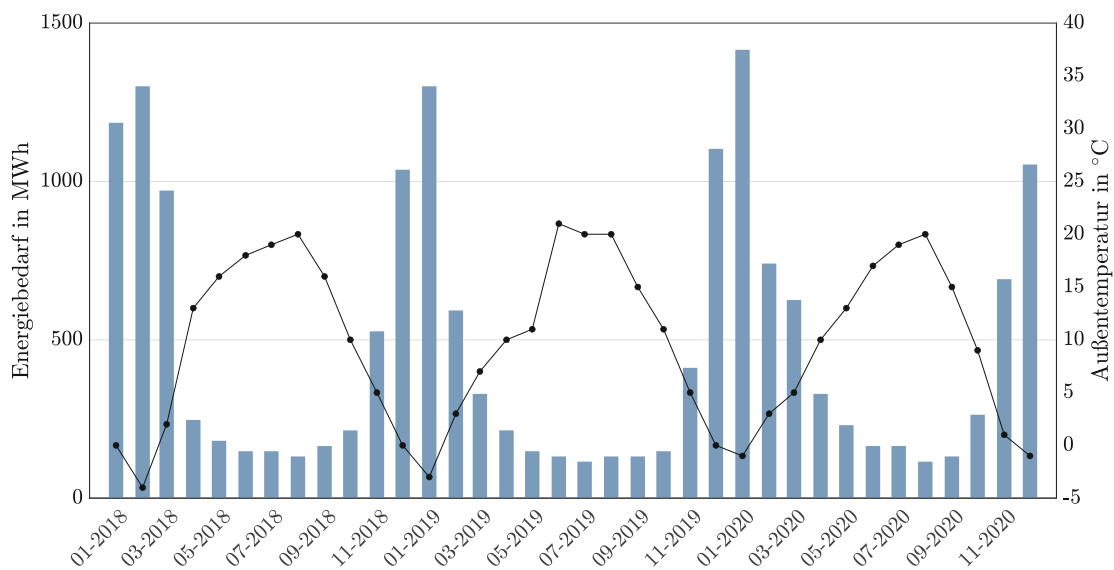


Abbildung 4.11.: Gasverbrauch und Außentemperatur aufgetragen über den Zeitraum Jänner 2018 bis Dezember 2020.

somit aus den vorliegenden Daten ein Zusammenhang zwischen Gasverbrauch und Außentemperatur aufgestellt. Es stehen hierfür lediglich Monatswerte zur Verfügung. Die monatlichen Gasverbräuche wurden über die durchschnittlichen Monatstemperaturen aufgetragen, wie in den Abbildungen 4.12 und 4.13 ersichtlich. Aus Abbildung 4.12 erkennt man, dass hier kein linearer Zusammenhang vorliegt, sondern die Datenpunkte besser durch eine Exponentialfunktion approximiert wären. Um den Energiebedarf trotzdem durch lineare Modelle abbilden zu können, wird die Funktion aufgeteilt und es ergibt sich in Abhängigkeit von der

Außentemperatur das Modell

$$V_{\text{Br, Halle}}(T) = \begin{cases} \beta_{0 \text{ Halle},1} \text{ Nm}^3 + \beta_{1 \text{ Halle},1} \frac{\text{Nm}^3}{\text{°C}} T, & \text{für } -5 \text{ °C} \leq T < 9 \text{ °C} \\ \beta_{0 \text{ Halle},2} \text{ Nm}^3 + \beta_{1 \text{ Halle},2} \frac{\text{Nm}^3}{\text{°C}} T, & \text{für } 9 \text{ °C} \leq T \leq 22 \text{ °C} \end{cases} \quad (4.13)$$

mit den zugehörigen Parametern $\beta_{0 \text{ Halle},1} = 823,89$, $\beta_{1 \text{ Halle},1} = -74,586$, $\beta_{0 \text{ Halle},2} = 134,79$ und $\beta_{1 \text{ Halle},2} = -4,324$.

Der Energieverbrauch der Bürobeheizung zeigt im Unterschied zur Hallenbeheizung einen linearen Zusammenhang, wie in Abbildung 4.13 ersichtlich und wird durch den Zusammenhang

$$V_{\text{Br, Buero}}(T) = \beta_{0 \text{ Buero}} \text{ Nm}^3 + \beta_{1 \text{ Buero}} \frac{\text{Nm}^3}{\text{°C}} T, \quad \text{für } -5 \text{ °C} \leq T \leq 22 \text{ °C} \quad (4.14)$$

mit den Parametern $\beta_{0 \text{ Buero}} = 195,71$ und $\beta_{1 \text{ Buero}} = -6,108$ beschrieben.

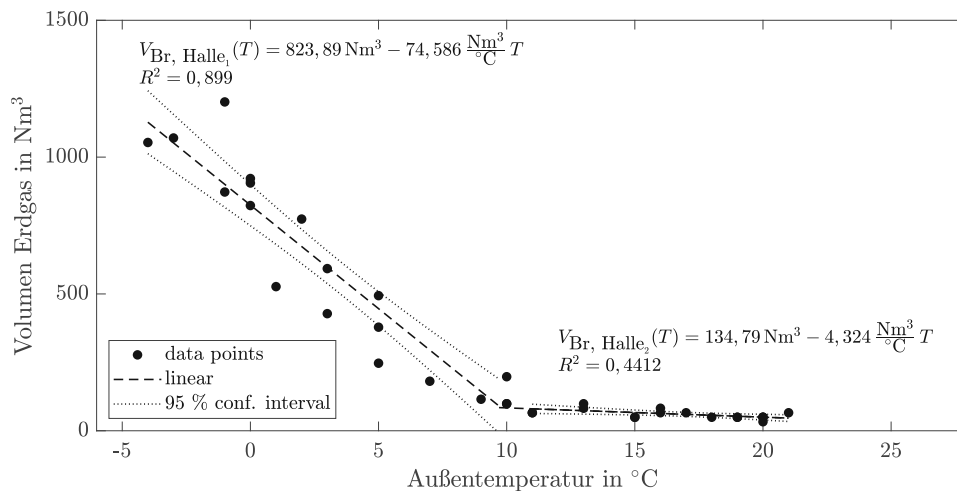


Abbildung 4.12.: Regressionsgerade für das Modell Hallenheizung.

Schon anhand der Abbildungen 4.12 und 4.13 kann man erkennen, dass das Bestimmtheitsmaß recht hoch ist. Da jedoch die Beheizung ein relativ kleiner Energieverbraucher, muss die Genauigkeit nicht so hoch sein.

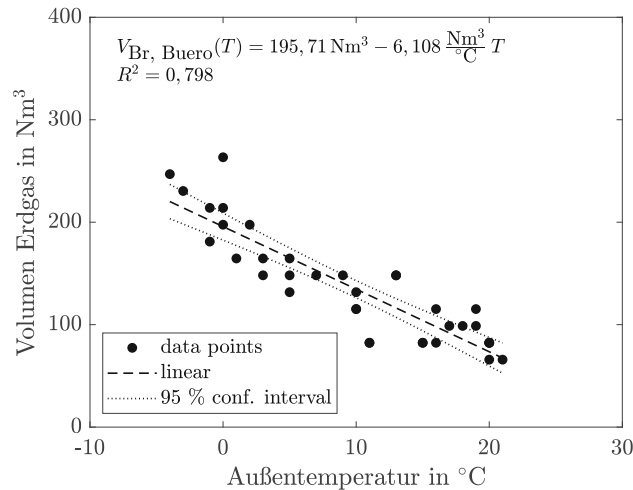


Abbildung 4.13.: *Regressionsgerade für das Modell Büroheizung.*

Optimierungspotential

Ein Teil des Energiebedarfs für die Büroheizung wird durch ein internes Wärmenetzwerk gedeckt, das Wärmeenergie aus der Abwärme des Hubherdofens bezieht. Die Nutzung der Abwärme ist jedoch nur zu Betriebszeiten des Hubherdofens möglich. Nachdem für die Beheizung von Büroräumlichkeiten ein relativ geringes Temperaturniveau notwendig ist, könnte ein weiterer Teil der Wärmeenergie durch Abwärmequellen im Werk bereitgestellt werden. Beispielsweise die Abwärme der Durchlaufglühöfen könnte genutzt werden. Hier wäre auch der Vorteil, dass diese die ganze Arbeitswoche in Betrieb sind und somit kontinuierlich Wärmeenergie bereitstellen könnten.

Bezüglich der Hallen besteht das Problem, dass diese nicht isoliert sind und ein großer Teil der Wärmeenergie an die Umgebung abgegeben wird. Durch eine Isolierung der Außenwände wäre eine Energieersparnis zu erreichen.

4.3. Stromverbraucher

4.3.1. Induktivanlagen

Die Induktivanlagen sind fast durchgehend in Betrieb und werden vom Material teilweise zweimal durchlaufen, einmal zur Härtung des Werkstückes über den gesamten Durchmesser und einmal zur Oberflächenhärtung, weshalb die Auslastung sehr hoch ist. Beim Induktivhärten werden die Werkstücke durch eine Spule geschickt, und dabei mittels Strom erhitzt, um die notwendige Härtung zu erreichen. Nachdem Werkstücke mit unterschiedlichen Durchmessern behandelt werden, kommen auch Spulen mit unterschiedlichen Durchmessern zum Einsatz. Je größer der Abstand zwischen Spule und Werkstück, desto höher sind die Verluste. Es ist darauf zu achten, dass der Abstand von Durchmesser des Werkstückes zum Durchmesser der Spule möglichst klein ist, damit die Verluste gering bleiben. Allerdings darf der Abstand nicht zu gering ist, da es vorkommen kann, dass Stäbe gekrümmt sind oder es zu Härteverzug kommt und es somit zu Störfällen bei der Anlage kommt. Bei Spulenwechsel kommt es zu Stillstandszeiten. In Abhängigkeit von der Anlage ergeben sich Rüstzeiten von etwa 60 bis 90 Minuten. Die Spulen werden manuell gewechselt.

Der spezifische Energieverbrauch ergibt sich aus Kombination des Werkstückdurchmessers, des Spulendurchmessers sowie des Temperaturniveaus, welches zum Einstellen vorgegebener Eigenschaften notwendig ist. Nachdem keine Datengrundlage, um diese Zusammenhänge abbilden zu können vorhanden war, konnte dies nicht berücksichtigt werden. Somit wurde der Energieverbrauch in einem ersten Modell in Abhängigkeit von der Durchsatzmenge mit den Parametern $\beta_{0 \text{ Ind}} = 319,98$ und $\beta_{1 \text{ Ind}} = 2,096 \cdot 10^{-4}$ erstellt und ergibt sich zu

$$E_{\text{el,Ind}}(m_{\text{St}}) = \beta_{0 \text{ Ind}} \text{ MWh} + \beta_{1 \text{ Ind}} \frac{\text{MWh}}{\text{kg}} m_{\text{St}}, \quad \text{für } 3,3 \cdot 10^6 \text{ kg} \leq m_{\text{St}} \leq 9,3 \cdot 10^6 \text{ kg}. \quad (4.15)$$

Die zugehörige Regressionsgeradem ist in Abbildung 4.14 ersichtlich.

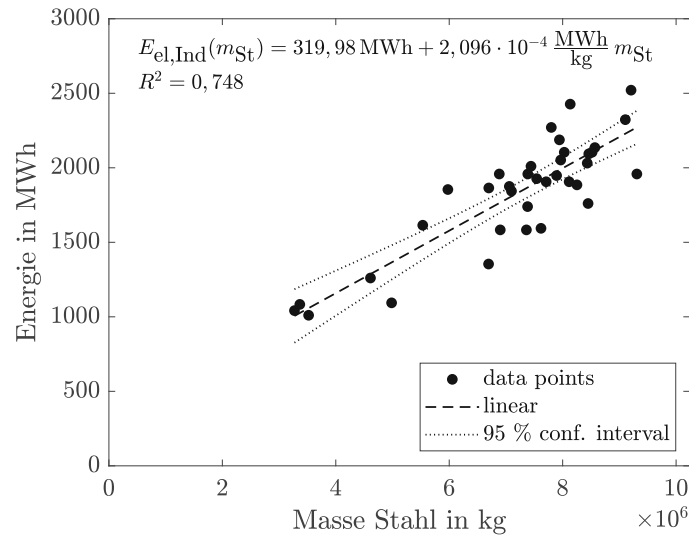


Abbildung 4.14.: Regressionsgerade für das Modell Induktivanlagen.

Optimierungspotential

Der Luftspalt, der sich zwischen Spule und Material ergibt, verursacht einen Energieverlust, der durch zusätzliche elektrische Leistung ausgeglichen werden muss. Durch eine optimale Zuordnung von Spule zu Werkstück könnte eine Energieersparnis erreicht werden. Jedoch kann dies zu einem häufigeren Spulenwechsel und folglich zu Stillstandszeiten führen. Hier ist abzuwägen, ob sich der Mehraufwand durch Umrüstungen lohnt.

4.3.2. Walzstraße

Die Walzstraße ist zu gleichen Zeiten wie der Hubherdofen in Betrieb. Beim Walzen wird mit den kleinsten Durchmesser gestartet und mit dem größten geendet. In Abbildung 4.15 sieht man zu welchen Anteilen die jeweiligen Durchmesser gewalzt worden sind. Die meisten Werkstücke weisen einen Durchmesser von 20 bis 40 mm auf. Es ist davon auszugehen, dass unterschiedlich große Querschnitte einen unterschiedlich hohen spezifischen Energieverbrauch verursachen, da sie auch eine unterschiedliche Anzahl an Stichen benötigen. Nachdem die Datenlage bezüglich des Energieverbrauches der Walzstraße unzureichend war, konnte dieses Spezifikum nicht berücksichtigt werden. Das Modell mit den Parametern $\beta_{0W} = 238,67$

und $\beta_{1W} = 8,268 \cdot 10^{-5}$ wurde auf Grundlage von monatlichen Durchsatzmengen aufgestellt und ergibt sich zu

$$E_{el,W}(m_{St}) = \beta_{0W} \text{ MWh} + \beta_{1W} \frac{\text{MWh}}{\text{kg}} m_{St}, \text{ für } 2,3 \cdot 10^6 \text{ kg} \leq m_{St} \leq 8,5 \cdot 10^6 \text{ kg}. \quad (4.16)$$

Die Regressionsgerade in in Abbildung 4.16 ersichtlich.

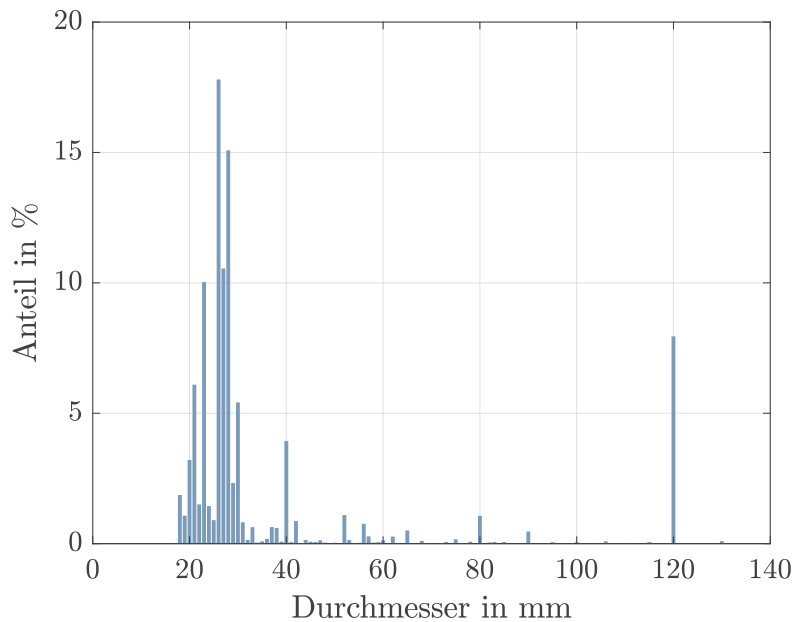


Abbildung 4.15.: Verteilung der zu walzenden Durchmesser.

Optimierungspotential

Aus Energiesicht ist bei der Walzstraße wenig Optimierungspotential vorhanden. Lediglich wäre an eine Abwärmerückgewinnung der beim Walzvorgang entstehenden Wärme anzudenken. Derzeit werden die Walzen durch Wasser, welches einen Kühlwasserkreislauf durchläuft, gekühlt, wobei sich das Wasser erwärmt. Die Wärmeenergie des Kühlwassers bleibt jedoch ungenutzt und wird an die Umgebung abgegeben.

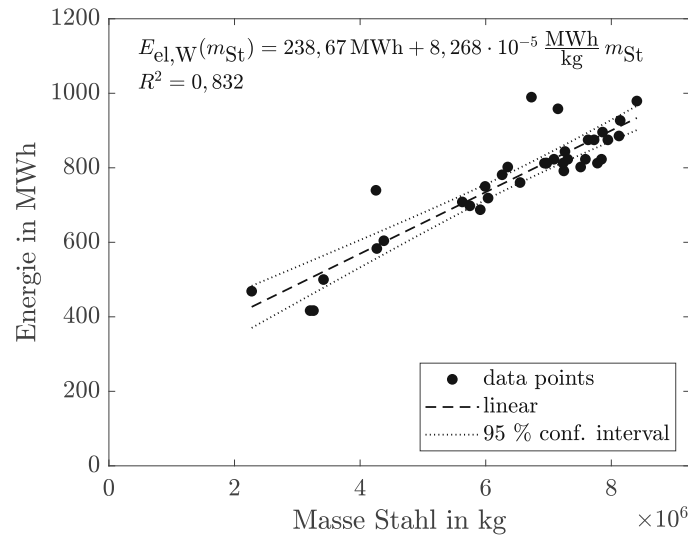


Abbildung 4.16.: Regressionsgerade für das Modell Walzstraße.

4.3.3. Blankstahl

Der Blankstahlbetrieb setzt sich aus verschiedenen Prozessen zusammen, die Schälén, Schleifen, Polieren beinhalten. Nachdem keine spezifischen Daten aufgeteilt auf die einzelnen Anlagen zur Verfügung standen, konnte nur ein vereinfachtes Modell erstellt werden, welches den Energiebedarf abbilden kann. Laut der Produktionsleitung entsteht der Großteil des Energiebedarfs des Blankstahlbetriebes durch die Schällinien. Das Modell wurde somit in Abhängigkeit von der Durchsatzmenge der Schällinien mit den Parametern $\beta_{0\text{ B}} = 89,218$ und $\beta_{1\text{ B}} = 6,058 \cdot 10^{-5}$ erstellt und ergibt sich zu:

$$E_{el,B}(m_{St}) = \beta_{0\text{ B}} \text{ MWh} + \beta_{1\text{ B}} \frac{\text{MWh}}{\text{kg}} m_{St}, \quad \text{für } 2 \cdot 10^6 \text{ kg} \leq m_{St} \leq 6,7 \cdot 10^6 \text{ kg}. \quad (4.17)$$

Optimierungspotential

Nachdem sich der Blankstahlbetrieb ansich aus sehr vielen verschiedenen kleinen Verbrauchern zusammensetzt, müsste für eine angedachte Optimierung jede einzelne Anlage einzeln näher analysiert und betrachtet werden. Aus den vorliegenden Informationen lässt sich kein

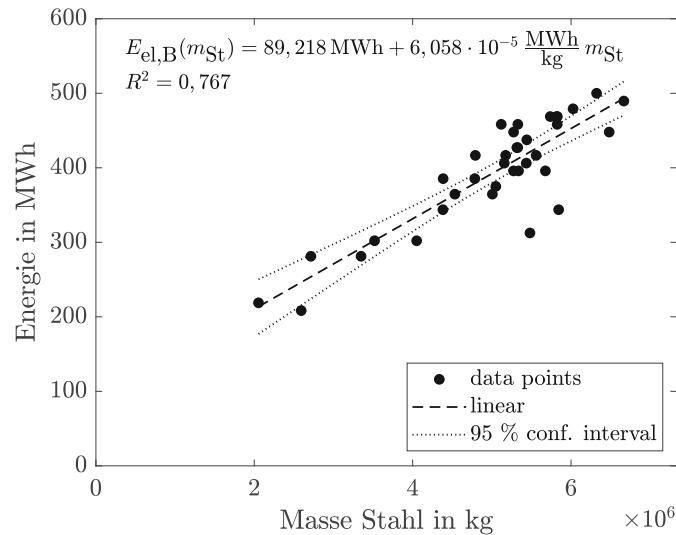


Abbildung 4.17.: Regressionsgerade für das Modell Blankstahl.

Optimierungspotential abschätzen. Des Weiteren handelt es sich bei dem Blankstahlbetrieb mit einem Anteil von 4,7 % um einen relativ kleinen Energieverbraucher, weshalb der Fokus besser auf andere Bereiche gelegt wird.

4.4. Validierung der Modelle

Für die Validierung der erstellten Modelle wurden die Ergebnisse mit den vorhandenen Daten als Eingangsgröße berechnet. Größen für die Eingangsgrößen sind Massenströme, Temperaturen sowie Zeitspannen. Anschließend erfolgt ein Vergleich der Ergebnisse mit den realen Daten für den Energiebedarf der STJ. Für die gasbetriebenen Anlagen wurde das Volumen des Erdgases weiters mit dem Heizwert $H_i = 10,02 \text{ MWh/Nm}^3$ multipliziert, um so auf die Einheit MWh zu kommen:

$$E_{\text{gas}} = V_{\text{Br}} H_i. \quad (4.18)$$

5. Ergebnisse und Diskussion

In diesem Kapitel werden die erstellten Modelle validiert und die Ergebnisse diskutiert. Ziel war es, die monatlichen Energieverbräuche für den Zeitraum Jänner 2018 bis Dezember 2020 möglichst genau nachzubilden. Es werden die Gesamtmodelle für den Gasverbrauch und Stromverbrauch analysiert als auch die einzelnen Anlagen separat. Dabei werden mögliche Fehlerquellen und Verbesserungspotentiale angeführt.

5.1. Gasverbrauch

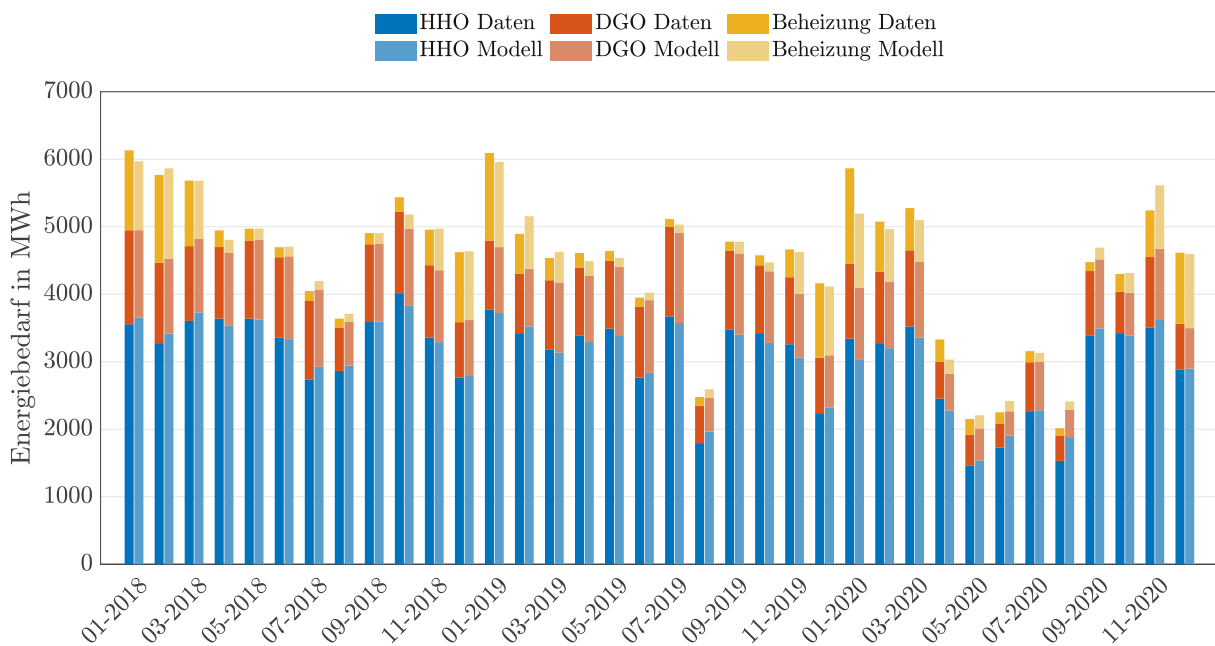


Abbildung 5.1.: Gegenüberstellung Daten und Modell für den Gasverbrauch.

5. Ergebnisse und Diskussion

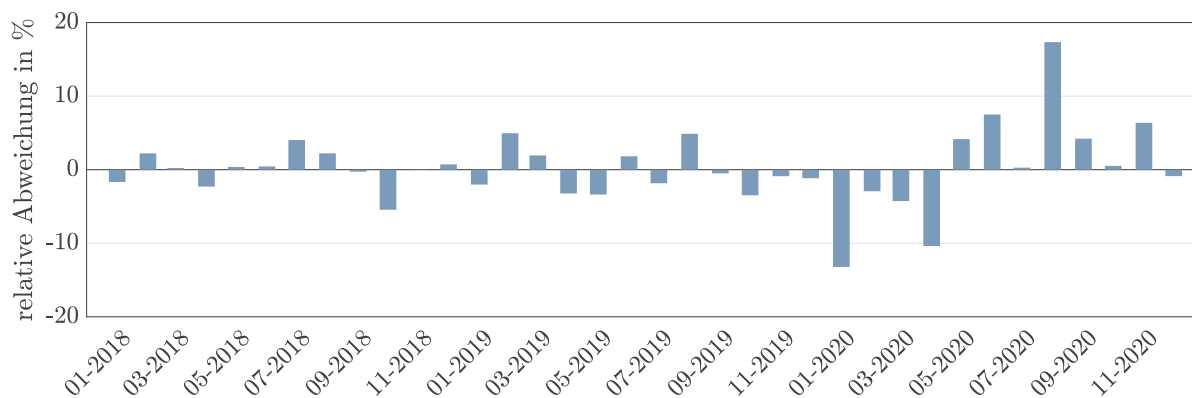


Abbildung 5.2.: Gasverbrauch: relative Abweichung des Modells von den Daten.

In der Abbildung 5.1 sind die Energieverbräuche der drei modellierten Anlagen für gasbetriebenen Anlagen ersichtlich. Linksseitig sind die Datenwerte zu sehen und rechts die errechneten Werte aus den Modellen. In Abbildung 5.2 kann man weiters die relative Abweichung des Modells in Bezug auf die Daten erkennen. Circa 90 Prozent der relativen Abweichungen liegen zwischen $\pm 5\%$. Im Zeitraum Jänner 2018 bis Dezember 2019 liefern die Modelle gute Ergebnisse. Zwischen Jänner 2020 und November 2020 kommt es teilweise zu starken Ausreißern, die nahezu 20 % erreichen. Es ist anzumerken, dass diese Art der Darstellung zum Teil nicht die wahren Abweichungen zeigt, da sich positive und negative Abweichungen der einzelnen Anlagen wieder aufheben können. Aus diesem Grund wird nachfolgend auf die einzelnen Anlagen eingegangen.

5.1.1. Hubherdofen

Abbildung 5.3 zeigt den Vergleich zwischen den Daten und errechneten Werten. In Abbildung 5.4 sieht man weiters die relative Abweichung in Prozent des Modells in Bezug auf die Daten. Mit dem Modell lassen sich die Energieverbräuche für der Hubherdofen relativ gut abbilden. Circa 90 % der Werte haben eine Abweichung kleiner 6,4 %. Es ist anzumerken, dass das Modell basierend auf Messdaten von einer Woche erstellt und für jeweils 36 Monate ausgewertet wurde. Nachdem mit den vorliegenden Daten schon eine recht gute Abbildung des Energieverbrauches erreicht werden konnte, ist zu erwarten, dass unter Berücksichtigung von Daten über einen längeren Zeitraum die Genauigkeit weiter zunehmen würde.

Um das Verhalten des Ofens ganzheitlich abbilden zu können, wäre es außerdem interessant zu wissen, wie sich der Gasverbrauch bei unterschiedlichen Aufheizgeschwindigkeiten verhält.

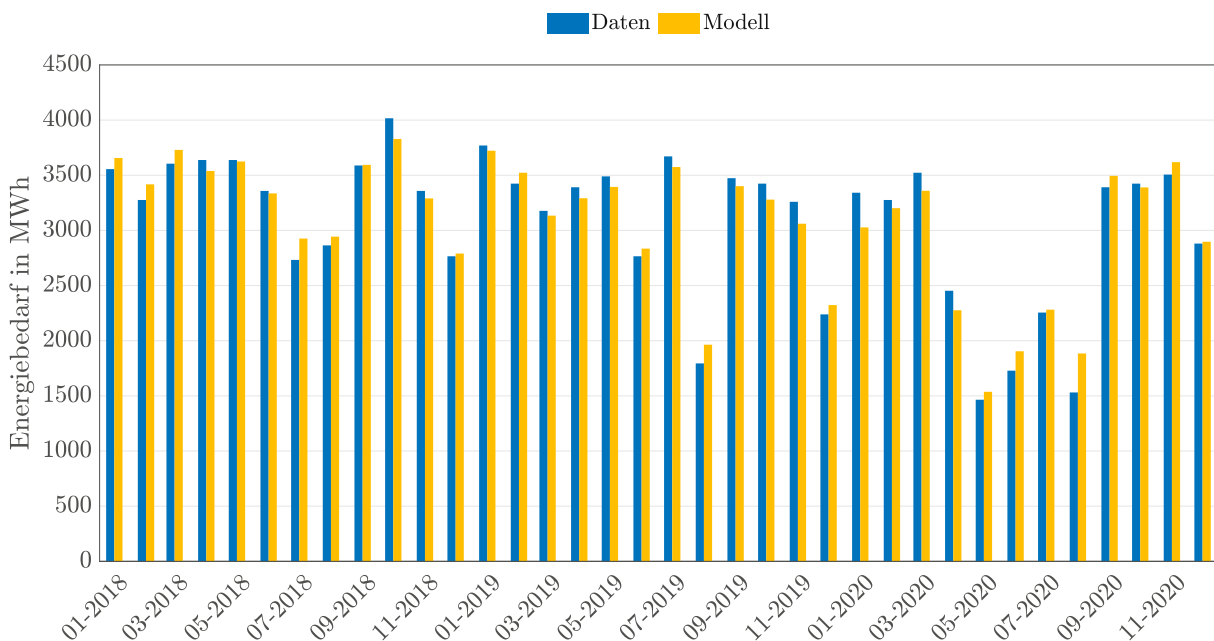


Abbildung 5.3.: Gegenüberstellung Daten und Modell für den Hubherdofen.

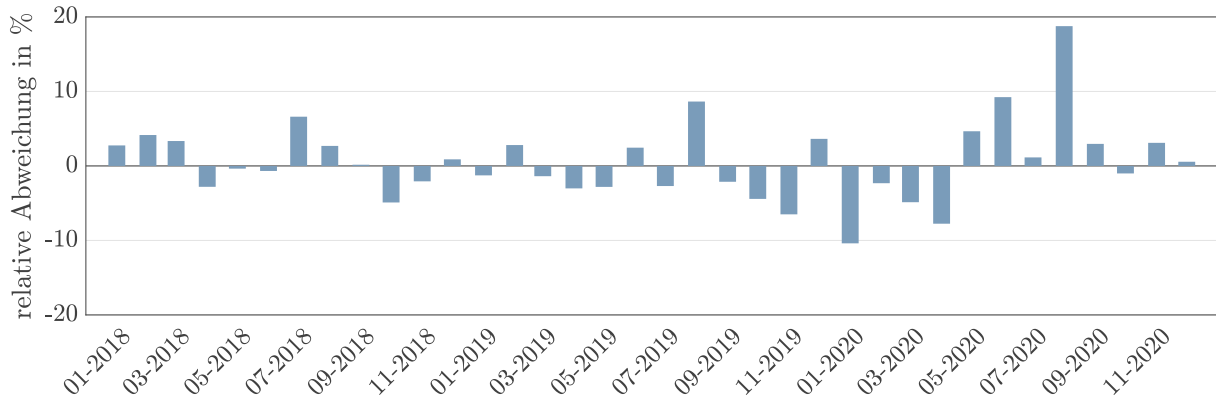


Abbildung 5.4.: Hubherdofen: relative Abweichung des Modells in Bezug auf die Daten.

5.1.2. Durchlaufglühöfen

Abbildung 5.5 zeigt die Gegenüberstellung der Daten und des Modells sowie die relative Abweichung des Modells in Bezug auf die Daten. Das Ergebnis ist durchaus zufriedenstellend. Etwa 90 % der Abweichungen liegen zwischen $\pm 4\%$. Mithilfe der Modelle für die einzelnen Glühprogramme sowie dem Modell, welches den Gasverbrauch zwischen den Glühprogrammen berechnet, lässt sich eine gute Abbildung des Energiebedarfes erzielen.

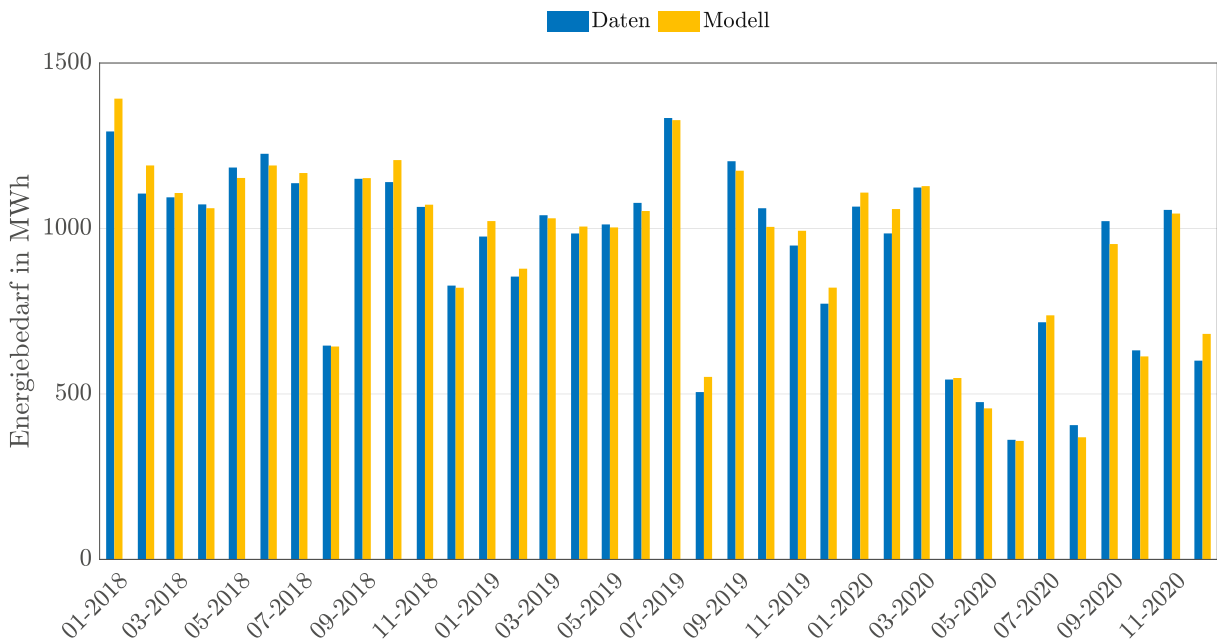


Abbildung 5.5.: Gegenüberstellung Daten und Modell für DGO1 und DGO2.

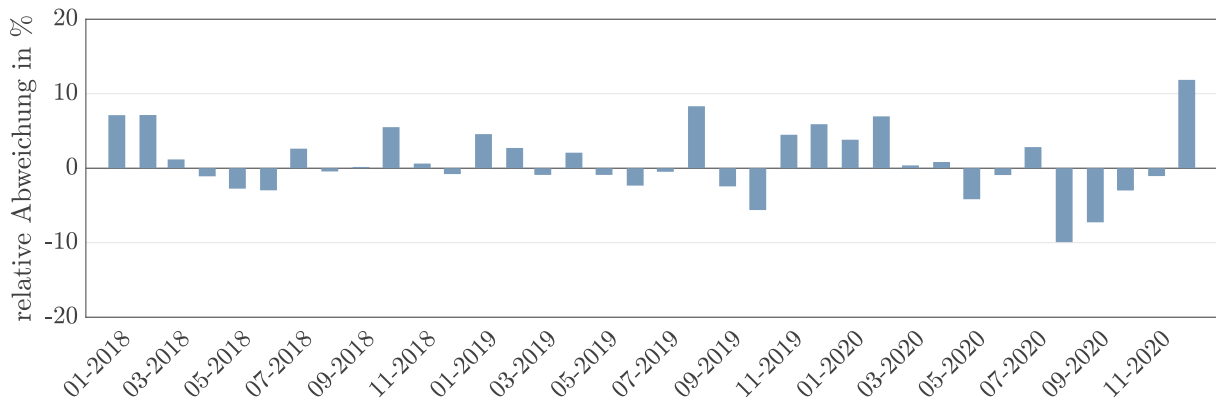


Abbildung 5.6.: Durchlaufglühöfen: relative Abweichung des Modells in Bezug auf die Daten.

5.1.3. Beheizung

Abbildung 5.7 zeigt den Vergleich der Daten mit den erhaltenen Werten des Modells. Die relativen Abweichungen sind ziemlich groß, wie man der Abbildung 5.8 entnehmen kann. Circa 90 % der Abweichungen liegen zwischen $\pm 27\%$. Auch wenn die relativen Abweichungen hoch ausfallen, sind die absoluten Differenzen vor allem in den Sommermonaten, wo der Gasverbrauch sehr gering sind, von nicht großer Bedeutung. Ein Faktor für die Ungenauigkeit des Modells ist die nur grobe Datenlage. Ein Teil der Beheizung erfolgt außerdem durch einen Wasserspeicher, der vom Hubherdofen beladen wird. Hier ist auch unbekannt, wie groß der Anteil ist.

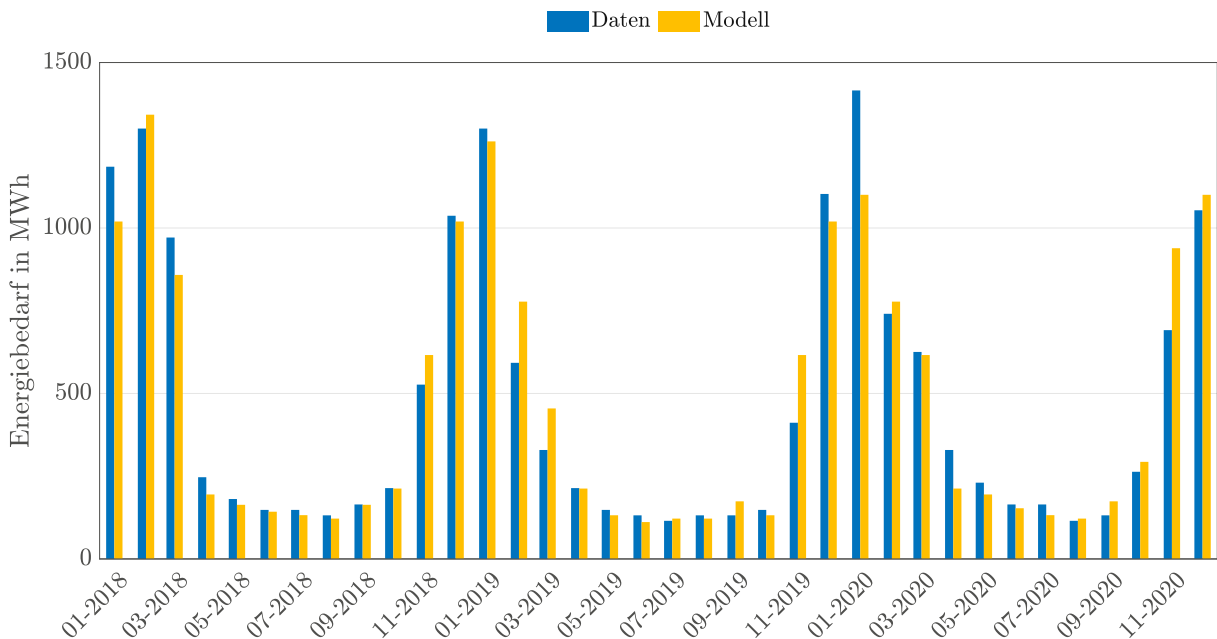


Abbildung 5.7.: Gegenüberstellung Daten und Modell für die Beheizung.

5. Ergebnisse und Diskussion

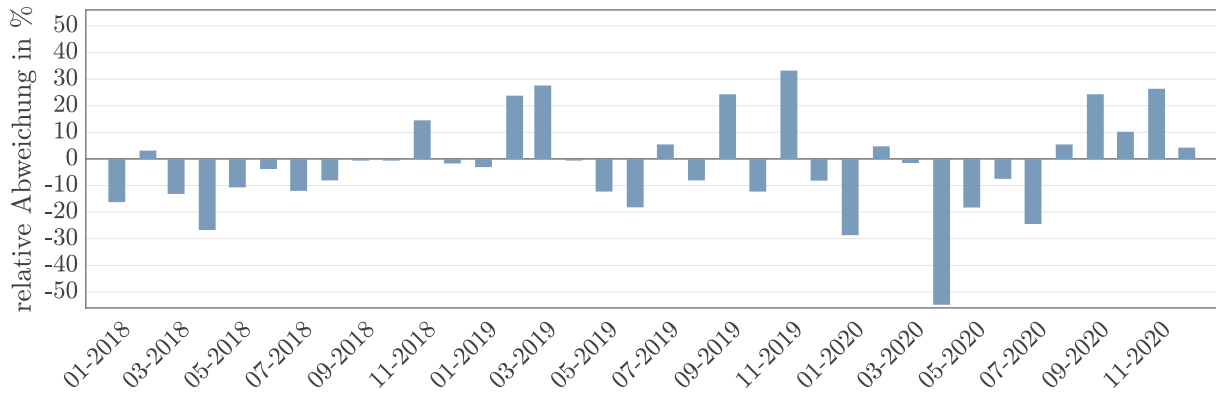


Abbildung 5.8.: *Beheizung: relative Abweichung des Modells in Bezug auf die Daten.*

5.2. Stromverbrauch

In Abbildung 5.9 ist analog zum Gasverbrauch der Energieverbrauch für die modellierten strombetriebenen Anlagen dargestellt. Abbildung 5.10 sind die relativen Abweichungen ersichtlich. Etwa 90 % der relativen Abweichungen liegen zwischen $\pm 10\%$. Insgesamt können die Modelle den Energieverbrauch in Groben Zügen abbilden, jedoch geben sie keine zufriedenstellendes Ergebnis. Dies kann man auf die sehr beschränkte Datengrundlage zurückführen. Auch hier gilt, dass Abbildung 5.10 nicht das vollständige Bild abgibt, da sich positive und negative Abweichungen aufheben können. Im Anschluss werden die einzelnen Anlagen separat diskutiert.

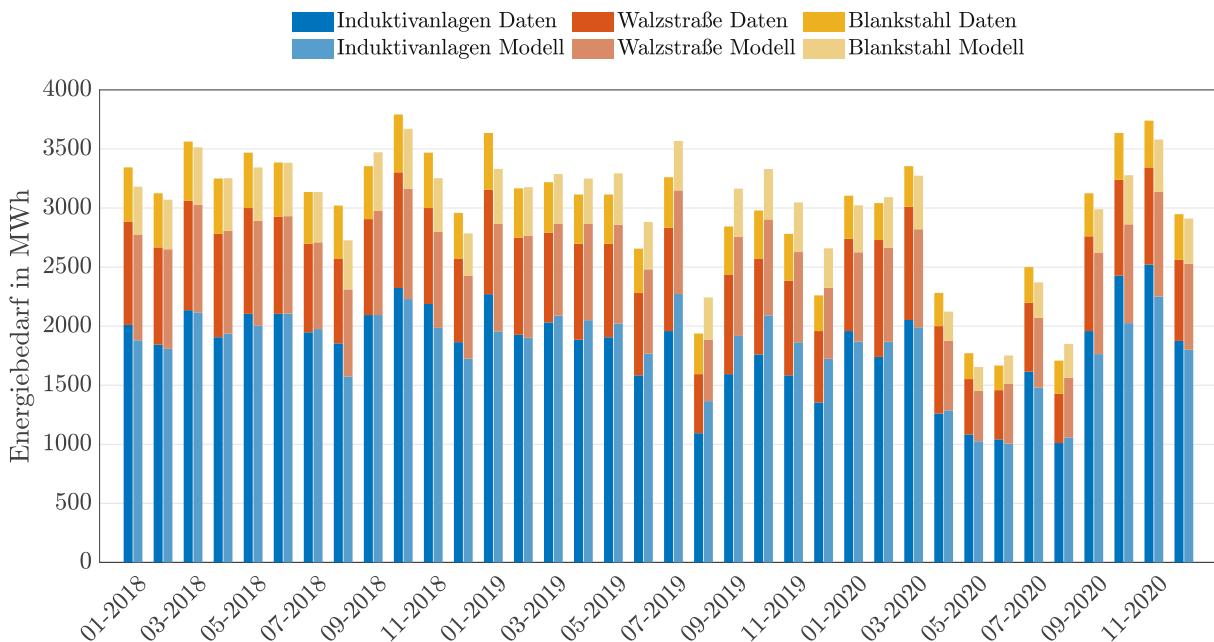


Abbildung 5.9.: Gegenüberstellung Daten und Modell für den Stromverbrauch.

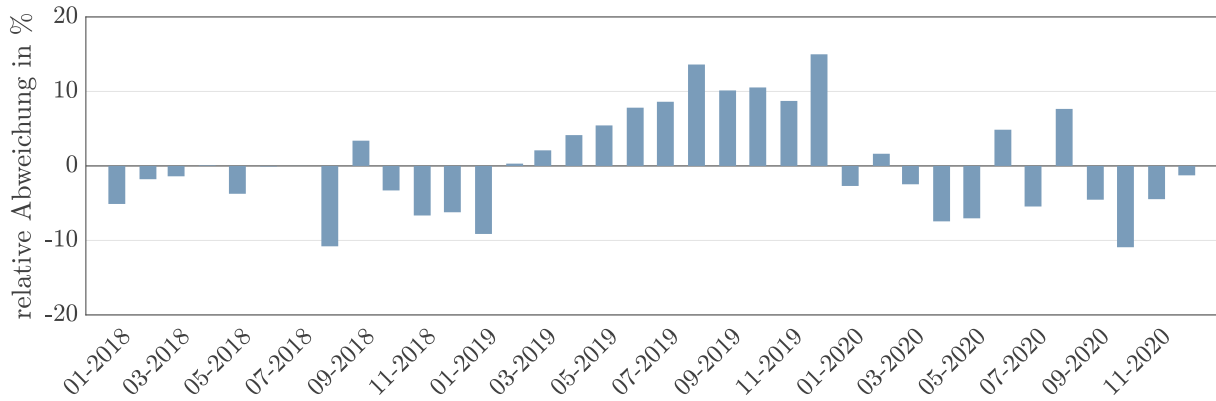


Abbildung 5.10.: *Stromverbrauch: relative Abweichung des Modells in Bezug auf die Daten.*

5.2.1. Induktivanlagen

Die Abbildungen 5.11 und 5.12 zeigen die Gegenüberstellung der Daten und der errechneten Werte aus dem Modell sowie die relative Abweichung des Modells. Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass kein zufriedenstellendes Ergebnis erreicht wurde. Circa 90 % der Abweichungen liegen im Bereich zwischen $\pm 15,7\%$. Aus diesem Ergebnis kann man darauf schließen, dass es bezüglich des Energieverbrauches große werkstückspezifische Unterschiede gibt. Größen, die hier einen Einfluss haben könnten sind der Durchmesser des Werkstückes, der Abstand zwischen Werkstück und Spule sowie das Härteprogramm. Durch genaue Messungen könnte man überprüfen, ob diese Zusammenhänge bestehen und diese beschreiben. Ein weiterer Ansatz wäre es ein physikalisches Modell zu entwickeln. Zu einer Validierung wären aber auch hier genaue Messungen erforderlich.

5. Ergebnisse und Diskussion

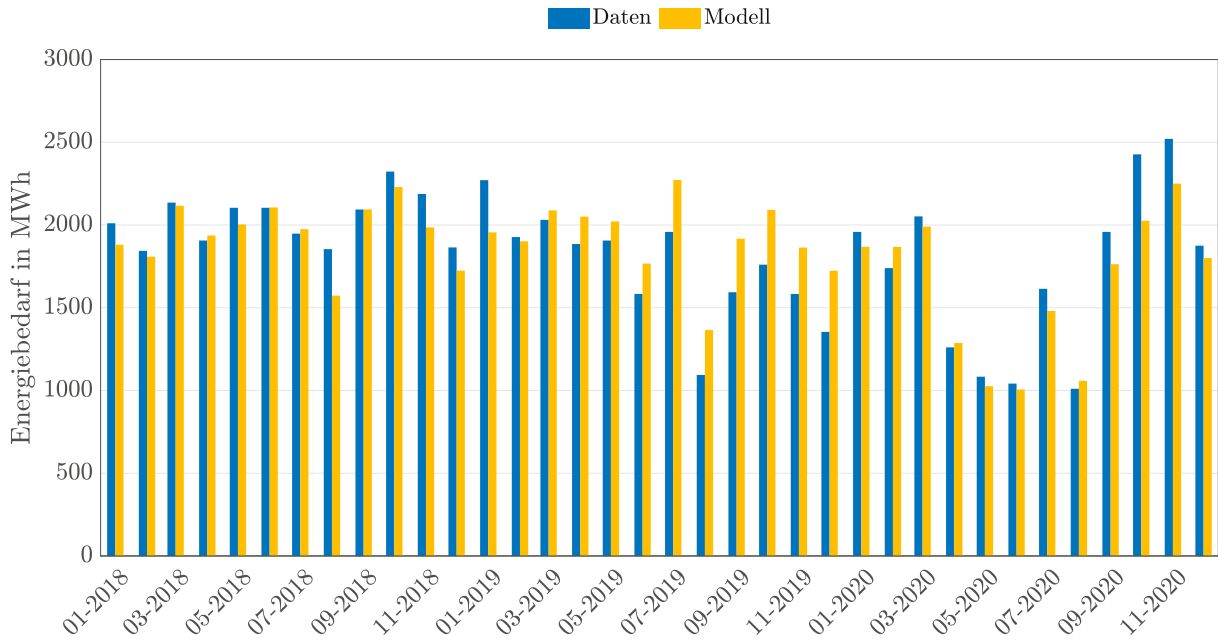


Abbildung 5.11.: Gegenüberstellung Daten und Modell für die Induktivanlagen.

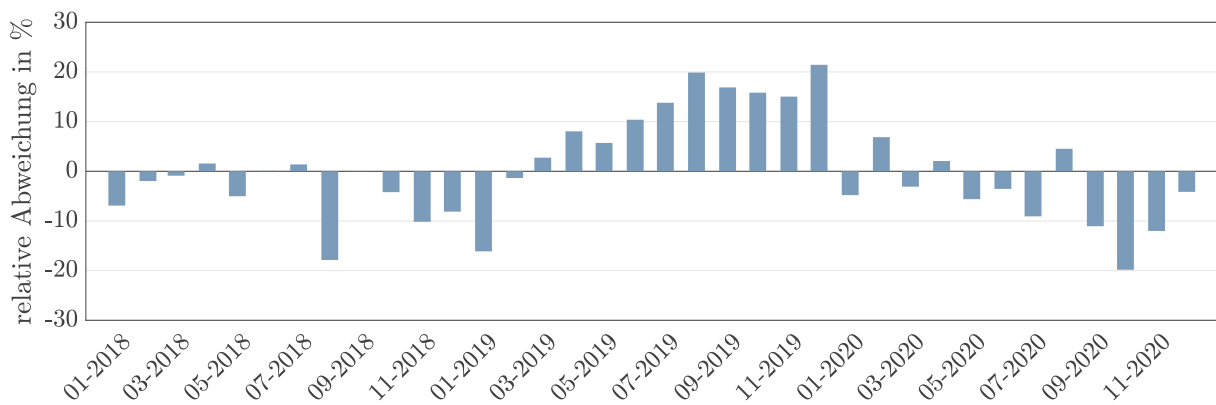


Abbildung 5.12.: Induktivanlagen: relative Abweichung des Modells in Bezug auf die Daten.

5.2.2. Walzstraße

Die Abbildungen 5.13 und 5.14 zeigen die Gegenüberstellung der Daten und der errechneten Werte sowie die relative Abweichung. Nachdem für die Walzstraße nur Monatswerte zu Verfügung gestellt wurden, kann der Energieverbrauch nur bedingt gut dargestellt werden. In dem Zeitraum Jänner 2018 bis Jänner 2020 liefert das Modell gute Ergebnisse. Starke Ausreißer sind im Zeitraum Februar 2020 bis Mai 2020 zu erkennen. Etwa 90 % der Abweichungen liegen zwischen $\pm 7,1\%$. Es ist davon auszugehen, dass der Energieverbrauch im Wesentlichen von dem Durchmesser des zu fertigenden Werkstückes abhängt. Je kleiner der Durchmesser, umso größer ist die einzubringende Energie, da die verschiedenen Durchmesser eine unterschiedliche Anzahl an Stichen erfordern. Aus den zu Verfügung stehenden Daten konnte man keinen Zusammenhang zwischen Durchmesser und Energieverbrauch erfassen. Durch Messungen der spezifischen Energieverbräuche in Abhängigkeit vom Durchmesser könnte ein genaueres Modell zur Abbildung des Gesamtenergieverbrauches aufgestellt werden.

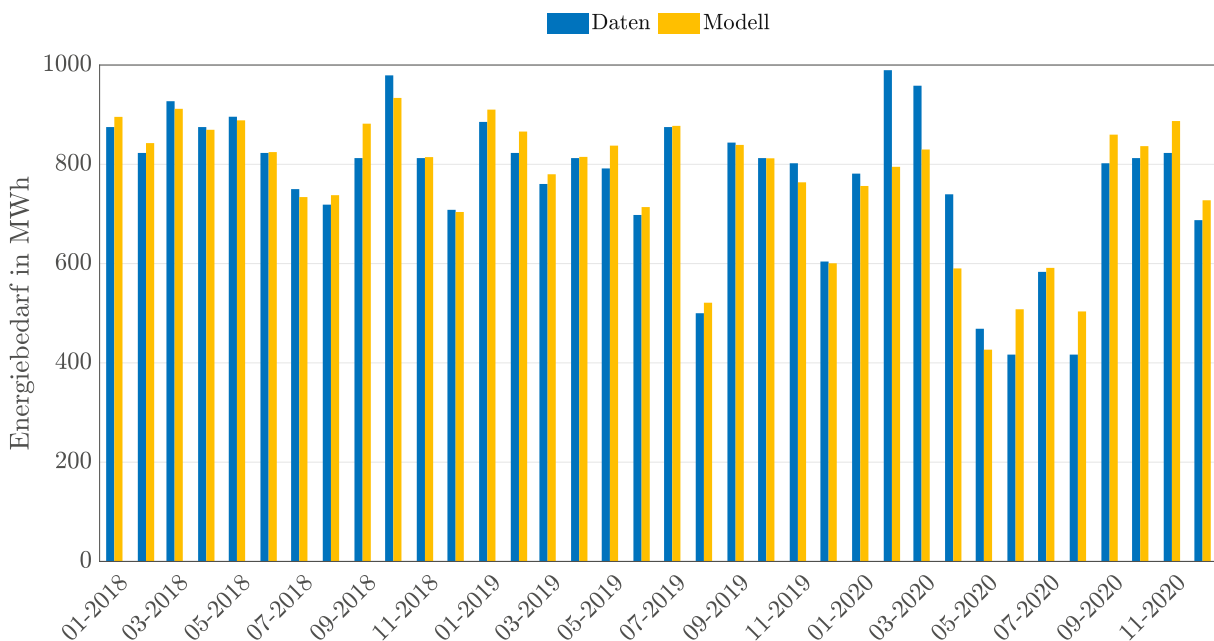


Abbildung 5.13.: Gegenüberstellung Daten und Modell für die Walzstraße.

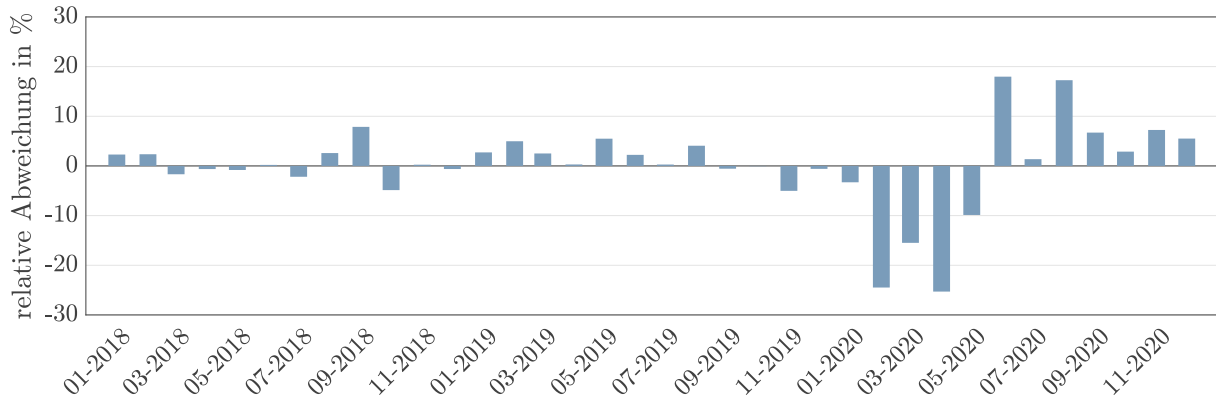


Abbildung 5.14.: Walzstraße: relative Abweichung des Modells in Bezug auf die Daten.

5.2.3. Blankstahl

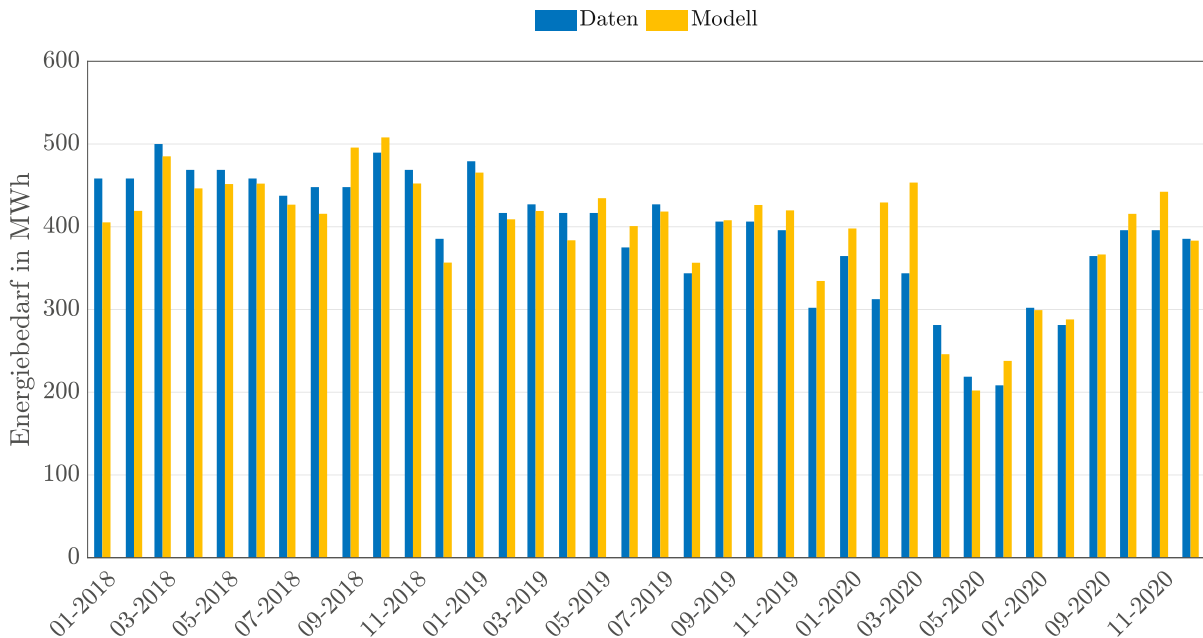


Abbildung 5.15.: Gegenüberstellung Daten und Modell für den Blankstahl.

Abbildungen 5.15 und 5.16 zeigen die Gegenüberstellung der Daten mit den errechneten Werten sowie die relativen Abweichungen. Die Abweichungen sind signifikant und sind vor allem im Zeitraum Februar 2020 bis Mai 2020 sehr hoch. Circa 90 % der relativen Abweichungen liegen zwischen $\pm 10,4\%$. Grund hierfür ist, dass nur Durchsatzmengen von den Schälanlagen bekannt waren und basierend auf diesen ein Modell für den gesamten Blankstahlbetrieb erstellt wurde. Neben den Schälanlagen zählen weiters die Anlagen für das

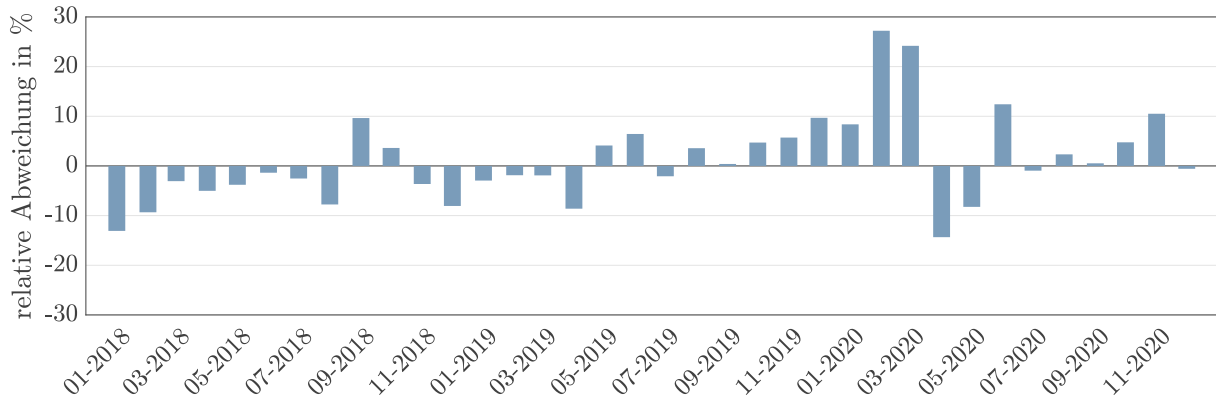


Abbildung 5.16.: *Blankstahl: relative Abweichung des Modells in Bezug auf die Daten.*

Schleifen, Polieren, Ablängen sowie Fräsen zum Blankstahlbetrieb, welche nicht berücksichtigt werden konnten. Obwohl davon auszugehen ist, dass der Großteil des Energiebedarfs im Blankstahlbetrieb durch die Schälmaschinen entsteht, kann dieses Modell nur im Groben den Energiebedarf abbilden. Um eine genauere Abbildung des Energiebedarfes zu erreichen, müssten die spezifischen Energieverbräuche der einzelnen Anlagen vorliegen.

5.3. Zusammenfassung und Erkenntnisse

Zusammenfassend sind die Ergebnisse in Tabelle 5.1 dargestellt. Es lässt sich ableiten, dass die Modelle für den Hubherdofen sowie für die Durchlaufglühöfen die besten Ergebnisse liefern. Ausschlaggebend dafür war, dass hier die Datengrundlage die Beste war. Weitere Verbesserungen dieser beiden Modelle könnten durch Einbindung noch größerer Datenmengen erzielt werden. Vor allem für den Hubherdofen ist zu erwarten, dass durch den Einbezug größerer Datenmenge die Genauigkeit weiter zunehmen würde. Ein genaues Modell für die Beheizung aufzustellen erweist sich als nicht einfach. Das bestehende Modell kann den Energiebedarf in groben Zügen abbilden, wobei die Abweichungen recht groß sind. Nachdem es sich hier um einen vergleichsweise kleinen Verbraucher handelt, genügt allerdings das Modell in Abhängigkeit von der Außentemperatur.

Bei der Modellbildung für die elektrisch betriebenen Anlagen müssen die Modelle in weite-

5. Ergebnisse und Diskussion

Tabelle 5.1.: Zusammenfassung der Ergebnisse.

| Anlage | Datenqualität | 90. Perzentil der rel. Abweichungen |
|-------------------|---------------|-------------------------------------|
| Gasverbraucher | gut | $\pm 5,0\%$ |
| Hubherdofen | gut | $\pm 6,4\%$ |
| Durchlaufglühöfen | gut | $\pm 4,0\%$ |
| Beheizung | schlecht | $\pm 27,0\%$ |
| Stromverbraucher | mittel | $\pm 10,0\%$ |
| Induktivanlagen | mittel | $\pm 15,7\%$ |
| Walzstraße | mittel | $\pm 7,1\%$ |
| Blankstahl | mittel | $\pm 10,4\%$ |

rer Folger verfeinert werden. Bei den Induktivanlagen wird ein Modell in Abhängigkeit des Werstückdurchmessers zielführend sein. Ein genaues Modell zur Abbildung des Energieverbrauchen der Walzstraße ließe sich durch Messungen der spezifisches Energieverbräuche für jeden Durchmesser erstellen. Für den Blankstahlbetrieb könnte man eine genauere Abbildung erreichen, indem für alle Anlagen spezifische Daten vorliegen würden.

6. Conclusio

Im Zuge dieser Arbeit wurde eine Prozess- und Energieanalyse eines realen Prozesses in der energieintensiven stahlverarbeitenden Industrie vorgenommen. Es wurden die Hauptenergieverbraucher der Prozesskette identifiziert und in einer anschließenden Analyse deren Betrieb sowie die energietechnische Sicht beschrieben. Dabei wurde auf Optimierungspotentiale der Anlagen eingegangen. Auf Basis vorhandener Daten wurden lineare Modelle erstellt, die den Energieverbrauch der Anlagen abbilden.

Die sechs identifizierten Hauptverbraucher in der Prozesskette sind der Hubherdofen, die beiden Durchlaufglühöfen, die Beheizung des Werkes, die Induktivanlagen, die Walzstraße sowie der Blankstahbetrieb. Optimierungspotentiale sind zum einen in der Abwärmerückgewinnung zu finden, konkret ist das die Rückgewinnung von Wärme aus dem Abgas des Hubherdofens oder der Durchlaufglühöfen und aus dem Kühlwasser der Walzen. Die Abwärme könnte zur Beheizung des Werkes eingesetzt werden, wodurch es hier zu einer Verringerung des Energiebedarfes kommt. Die Leerzeiten bei den Durchlaufglühöfen machen insgesamt etwa 25 % des Energieverbrauches aus. Durch eine Anpassung der Glühprogrammabfolge und infolge dessen Reduzierung der Leerzeiten lassen sich so Energieersparnisse erzielen. Das Potential bei den Induktivanlagen liegt in der Verringerung des Luftspalts zwischen Werkstück und Spule.

Im nächsten Schritt wurden lineare Modelle der Hauptverbraucher erstellt. Als Grundlage für die Modellerstellung standen Daten von dem Unternehmen zu Verfügung. Die Datenlage war für die einzelnen Anlagen nicht überall in ausreichendem Maße gegeben. Die Modelle

6. Conclusio

für den Hubherdofen und die Durchlaufglühöfen lieferten die genauesten Ergebnisse, was auf die relativ gute Datenlage zurückzuführen ist. Die Beheizung wurde in Abhängigkeit der Außentemperatur modelliert und zeigt relativ große Abweichungen, erreicht jedoch eine gute Schätzung. Die Modelle der Induktivanlagen und der Walzstraße könnten durch zusätzliche Messungen eine höhere Genauigkeit aufweisen.

Im Großen und Ganzen kann man schlussfolgern, dass sich bei einer umfangreichen und guten Datenlage Modelle aufstellen lassen, dessen Abbildungen relativ geringe Abweichungen vom realen Verhalten erzielen. Nachdem es für insbesondere die strombetriebenen Anlagen im Zeitraum der Entstehung dieser Arbeit nicht möglich war an detailliertere Daten zu kommen, weisen diese relativ hohe Abweichungen auf und können nur in groben Zügen den Energieverbrauch abbilden. Das Ziel in weiterer Folge ist es, diese Modelle so weit zu verfeinern, dass sie für die praktische Anwendung in einer Optimierung eingesetzt werden können.

Literatur

- [1] O. Irretier, “Energieeffizienz in Industrieofenbau und Wärmebehandlung - Maßnahmen und Potentiale”, *elektrowärme international*, Jg. 1, S. 37–44, 2010.
- [2] K. He und L. Wang, “A review of energy use and energy-efficient technologies for the iron and steel industry”, *Science Direct*, Jg. 70, S. 1022–1039, 2017. DOI: 10.1016/j.rser.2016.12.007.
- [3] M. Wörtler, F. Schuler, N. Voigt, T. Schmidt, P. Dahlmann, H. B. Lünger und J.-T. Ghenda, “Steel’s contribution to a low-carbon Europe 2050 - Technical and economical analysis of the sector’s CO₂ Abatement Potential”, The Boston Consulting Group, Forschungsber., 2013, 49 S.
- [4] W. Sun, Q. Wang, Y. Zhou und J. Wu, “Material and energy flows of the iron and steel industry: Status quo, challenges and perspectives”, *Applied Energy*, Jg. 268, 2020. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.114946.
- [5] *Energy use in the steel industry*, 2016. Adresse: <https://www.steel.org.au/resources/elibrary/resource-items/worldsteel-fact-sheet-steel-and-energy/download-pdf.pdf>/ (besucht am 14.07.2021).
- [6] R. Banerjee, “Energy end-use: Industry”, International Institute for Applied Systems Analysis, Forschungsber., 2014, 61 S.
- [7] “Energy Technology Perspectives 2012”, International Energy Agency, Forschungsber., 2012, 690 S.
- [8] “Steel Statistical Yearbook 2020”, Worldsteel Association, Forschungsber., 2020, 46 S.

- [9] “Energy Efficient Technologies and Best Practices in Steel Rolling Industries”, The Energy und Resources Institute New Delhi, Forschungsber., 2014, 116 S.
- [10] “Reference Document on Best Available Techniques in the Ferrous Metals Processing Industry”, European Commission, Forschungsber., 2019, 538 S.
- [11] R. Wenije, L. Baokuan und Q. Fengsheng, “Performance evaluation of a walking beam type reheating furnace based on energy and exergy analysis”, *Thermal science*, S. 226–226, 2020. DOI: 10.2298/TSCI200424226R.
- [12] H. Pfeifer, “Industrial Furnaces for Steel Processing – 90 Years of Continuous Improvement”, *steel research international*,
- [13] “Reference Document on Best Available Techniques for Energy Efficiency”, European Commission, Forschungsber., 2009, 430 S.
- [14] *Forming of Steel: Billets, Bars and Rods*, 2021. Adresse: <https://www.britannica.com/technology/steel/Billets-bars-and-rods> (besucht am 16.08.2021).
- [15] V. Shinkin, “Geometry of steel sheet in a seven-roller straightening machine”, *Chernaya Metallurgiya*, Jg. 11, S. 793–798, 2016. DOI: 10.3103/S0967091216110115.
- [16] *Adjustage*, 2015. Adresse: <https://de.wikipedia.org/wiki/Adjustage> (besucht am 09.10.2015).
- [17] E. Macherauch und H.-W. Zoch, *Praktikum in Werkstoffkunde*, 13. Auflage. Karlsruhe, Deutschland: Springer Vieweg, 2019, ISBN: 978-3-658-25374-5.
- [18] *Härten (Stahl)*, 2021. Adresse: https://www.chemie.de/lexikon/H%C3%A4rten_%28Stahl%29.html (besucht am 28.10.2021).
- [19] H. Berns und W. Theisen, *Eisenwerkstoffe - Stahl und Gusseisen*, 3. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer, 2006, ISBN: 978-3-540-32319-5.
- [20] S. Sackl, H. Leitner, M. Zuber, H. Clemens und S. Primig, “Induction Hardening vs. Conventional Hardening of a Heat Treatable Steel”, *Metallurgical and Materials Transactions*, Jg. 45a, S. 5657–5666, 2014. DOI: 10.1007/s11661-014-2518-4.

Literatur

- [21] C. Bohn und H. Unbehauen, *Identifikation dynamischer Systeme - Methoden zur experimentellen Modellbildung aus Messdaten*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016, ISBN: 978-3-8348-1755-6.
- [22] Verena Halmschlager, “Development of an optimization framework and grey-box modeling concepts for industrial applications”, PhD Thesis, TU Wien, Wien, 2021.
- [23] J. Yetyukov, M. Kozek und S. Jakubek, *Vorlesungsskriptum Stochastik*. Wien: Institut für Mechanik und Mechatronik, TU Wien, 2019.
- [24] *Wetter-Rückblick Judenburg*, 2020. Adresse: <https://www.timeanddate.de/wetter/oesterreich/judenburg/rueckblick> (besucht am 30.08.2021).

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|-------|--|----|
| 1.1. | Reduktion des Energiebedarfs pro Tonne Rohstahl 1960 - 2020, nach [5]. | 2 |
| 2.1. | Querschnitt eines Hubbalkenofens [12]. | 8 |
| 2.2. | Profilierte Walzen für Stabstahl, nach [14]. | 10 |
| 2.3. | Schematischer Temperaturverlauf beim Glühen. T_h ...Haltetemperatur, t_e ...Erwärm- dauer, t_{an} ...Erwärmdauer Rand, t_h ...Haltedauer, t_{ab} ...Abkühldauer [17]. | 11 |
| 2.4. | Temperaturbereich für das Normalglühen in Abhängigkeit des C-Gehaltes [17]. | 12 |
| 2.5. | Temperaturbereich für das Weichglühen in Abhängigkeit des C-Gehaltes [17]. | 13 |
| 2.6. | Temperaturbereich für das Rekristallisationsglühen in Abhängigkeit des C- Gehaltes [17]. | 14 |
| 2.7. | Temperaturbereich für das Spannungsarmglühen in Abhängigkeit des C-Gehaltes [17]. | 14 |
| 2.8. | $t_{8/5}$ -Zeit bei der Abkühlung mit Öl in Abhängigkeit vom Querschnittsdurch- messer [19]. | 15 |
| 2.9. | Temperaturverlauf beim Vergüten von Stahl. T_A ...Austenitisierungstemperatur, T_{An} ...Anlasstemperatur [19]. | 17 |
| 2.10. | Modellvarianten [22]. | 19 |
| 3.1. | Vereinfachtes Fließbild der relevanten Prozesse und Wärmebehandlungsver- fahren der STJ. | 24 |
| 3.2. | Schematische Darstellung eines Teils der Walzstraße: Hubherdofen, Walzgerüste. | 25 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| 3.3. Fließbild mit ein- und ausgehenden Stoffströmen für Hubherdofen und Reku- perator. | 26 |
| 4.1. Gasverbrauch der STJ von Jänner 2018 bis Dezember 2020. | 32 |
| 4.2. Stromverbrauch der STJ von Jänner 2018 bis Dezember 2020. | 32 |
| 4.3. Normierter Gasverbrauch der STJ von Jänner 2018 bis Dezember 2020. . . . | 33 |
| 4.4. Normierter Stromverbrauch der STJ von Jänner 2018 bis Dezember 2020. . . | 34 |
| 4.5. Sankey-Diagramm der Energieflüsse in der STJ für den Zeitraum Jänner 2018 bis Dezember 2020. | 35 |
| 4.6. Temperaturverlauf für den HHO für KW18 des Jahres 2021. | 36 |
| 4.7. Regressionsgerade für das Modell Erwärmen des Stahls. | 38 |
| 4.8. Regressionsgerade für das Modell Aufheizen. | 39 |
| 4.9. Regressionsgerade für das V947-Glühlen im DGO1. | 42 |
| 4.10. Regressionsgerade für das E-Glühlen im DGO2. | 43 |
| 4.11. Gasverbrauch und Außentemperatur aufgetragen über den Zeitraum Jänner 2018 bis Dezember 2020. | 45 |
| 4.12. Regressionsgerade für das Modell Hallenheizung. | 46 |
| 4.13. Regressionsgerade für das Modell Büroheizung. | 47 |
| 4.14. Regressionsgerade für das Modell Induktivanlagen. | 49 |
| 4.15. Verteilung der zu walzenden Durchmesser. | 50 |
| 4.16. Regressionsgerade für das Modell Walzstraße. | 51 |
| 4.17. Regressionsgerade für das Modell Blankstahl. | 52 |
| 5.1. Gegenüberstellung Daten und Modell für den Gasverbrauch. | 53 |
| 5.2. Gasverbrauch: relative Abweichung des Modells von den Daten. | 54 |
| 5.3. Gegenüberstellung Daten und Modell für den Hubherdofen. | 55 |
| 5.4. Hubherdofen: relative Abweichung des Modells in Bezug auf die Daten. . . . | 56 |
| 5.5. Gegenüberstellung Daten und Modell für DGO1 und DGO2. | 56 |
| 5.6. Durchlaufglühöfen: relative Abweichung des Modells in Bezug auf die Daten. | 57 |
| 5.7. Gegenüberstellung Daten und Modell für die Beheizung. | 57 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| 5.8. Beheizung: relative Abweichung des Modells in Bezug auf die Daten. | 58 |
| 5.9. Gegenüberstellung Daten und Modell für den Stromverbrauch. | 59 |
| 5.10. Stromverbrauch: relative Abweichung des Modells in Bezug auf die Daten. . . | 60 |
| 5.11. Gegenüberstellung Daten und Modell für die Induktivanlagen. | 61 |
| 5.12. Induktivanlagen: relative Abweichung des Modells in Bezug auf die Daten. . . | 61 |
| 5.13. Gegenüberstellung Daten und Modell für die Walzstraße. | 62 |
| 5.14. Walzstraße: relative Abweichung des Modells in Bezug auf die Daten. | 63 |
| 5.15. Gegenüberstellung Daten und Modell für den Blankstahl. | 63 |
| 5.16. Blankstahl: relative Abweichung des Modells in Bezug auf die Daten. | 64 |
| | |
| A.1. DGO1 E-Glühen | 75 |
| A.2. DGO1 E-2-Glühen | 75 |
| A.3. DGO1 V320-GKZ-Glühen | 76 |
| A.4. DGO1 GKZ-Glühen | 76 |
| A.5. DGO1 A470-Glühen | 76 |
| A.6. DGO1 K742-Glühen | 76 |
| A.7. DGO1 Leerzeit | 76 |
| A.8. DGO2 E-2-Glühen | 77 |
| A.9. DGO2 ZB-Glühen | 77 |
| A.10. DGO2 V947-Glühen | 77 |
| A.11. DGO2 V320-GKZ-Glühen | 77 |
| A.12. DGO2 Leerzeit | 77 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|---|----|
| 3.1. Betriebszeiteiten der Walzstraße im Regelfall. | 27 |
| 4.1. Einteilung der Anlagen nach Energieträgern. | 31 |
| 4.2. Aufgezeichnete Daten des Hubherofens. | 37 |
| 4.3. Glühprogramme und Parameter der linearen Modelle für DGO1. | 44 |
| 4.4. Glühprogramme und Parameter der linearen Modelle für DGO2. | 44 |
| 5.1. Zusammenfassung der Ergebnisse. | 65 |

A. Anhang

A.1. Weitere Modelle

A.1.1. DGO1

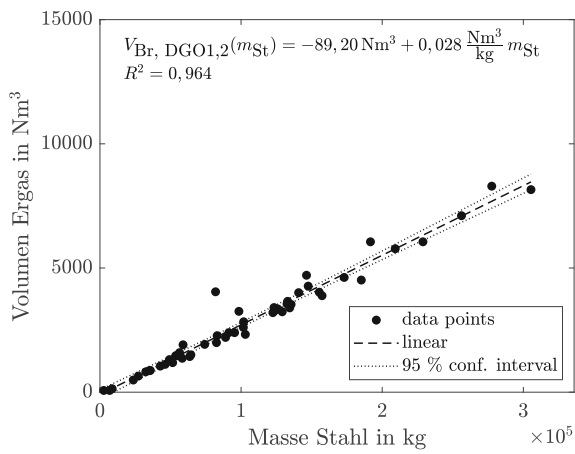


Abbildung A.1.: DGO1 E-Gluehen

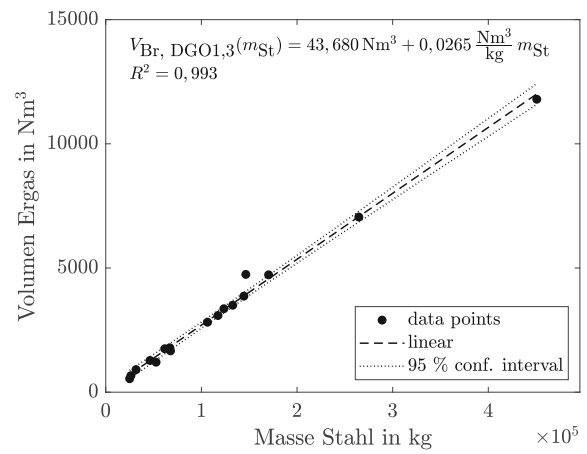


Abbildung A.2.: DGO1 E-2-Gluehen

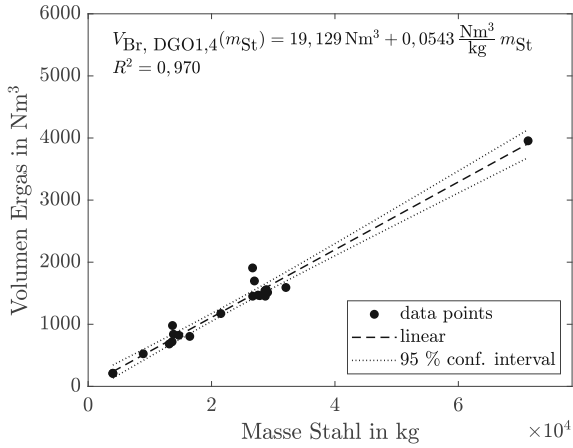


Abbildung A.3.: DGO1 V320-GKZ-Gluehen

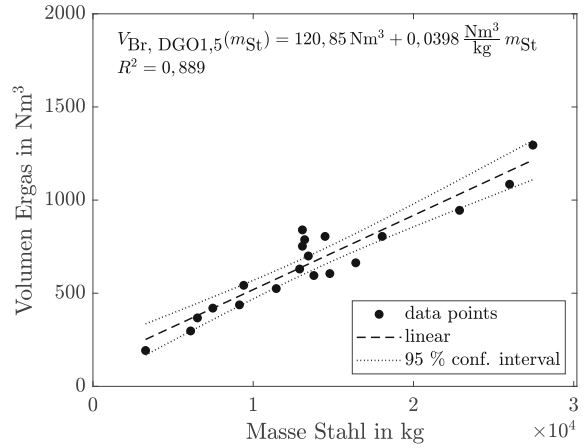


Abbildung A.4.: DGO1 GKZ-Gluehen

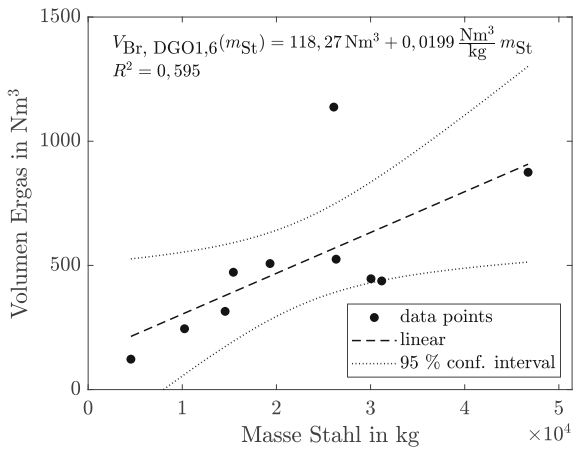


Abbildung A.5.: DGO1 A470-Gluehen

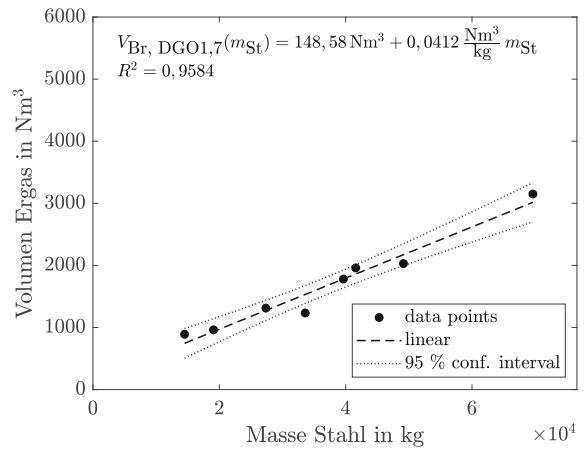


Abbildung A.6.: DGO1 K742-Gluehen

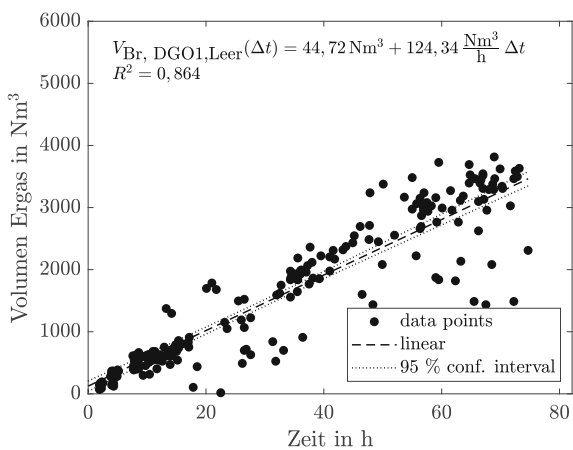


Abbildung A.7.: DGO1 Leerzeit

A.1.2. DGO2

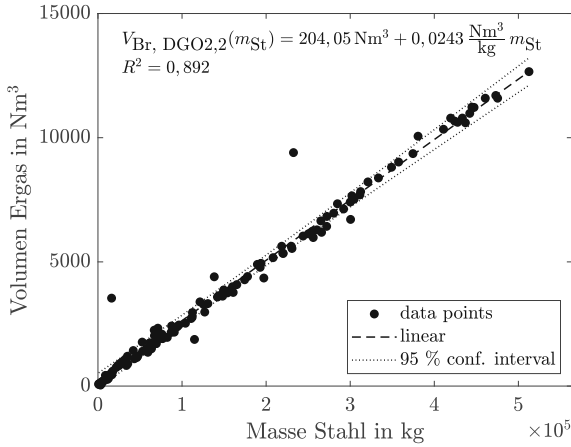


Abbildung A.8.: DGO2 E-2-Glügen

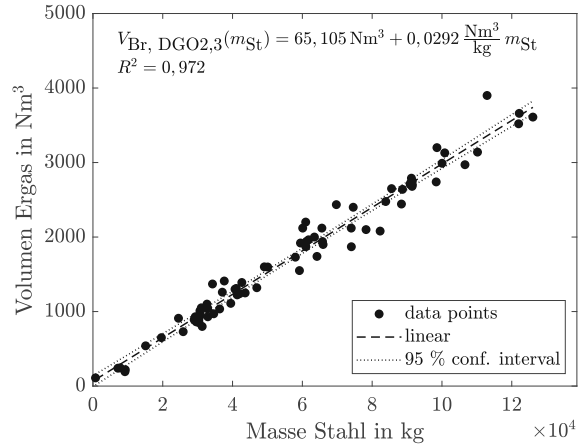


Abbildung A.9.: DGO2 ZB-Glügen

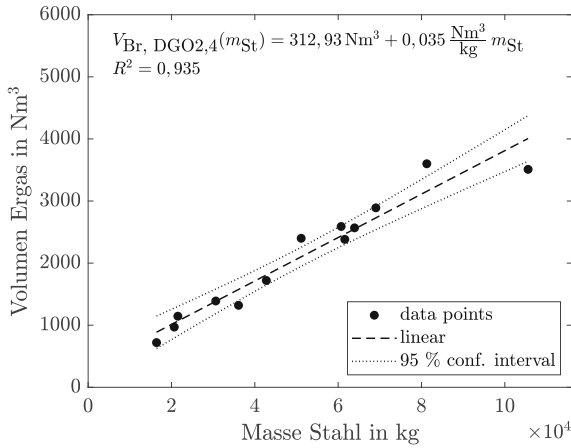


Abbildung A.10.: DGO2 V947-Glügen

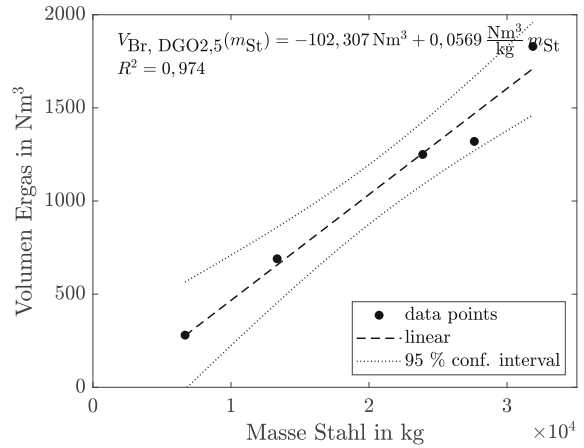


Abbildung A.11.: DGO2 V320-GKZ-Glügen

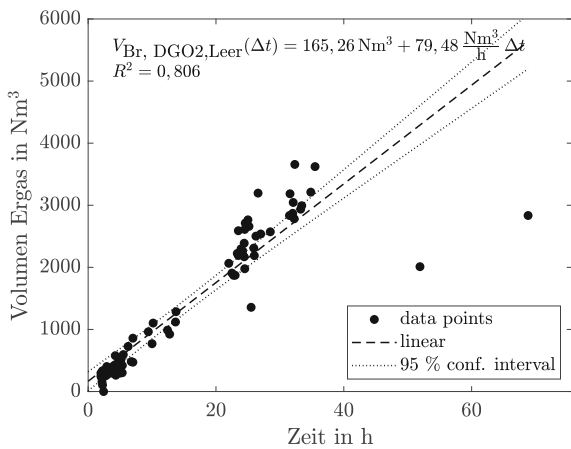


Abbildung A.12.: DGO2 Leerzeit