

KI-unterstützte Kapazitätsplanung in der Wärmebehandlung

Karl Diederichs GmbH & Co. KG
(Dirostahl)

Dr. Guido Mittler

Inhalt

1. Unternehmensprofil und Kennzahlen
2. Ausgangssituation
3. Planungsaufgabe/-herausforderung
4. KI-unterstützter Lösungsansatz
5. Softwarelösung im Einsatz
6. Zusammenfassung und Ausblick



Dirostahl - Unternehmensprofil



Standort

Remscheid-Lüttringhausen

Historie

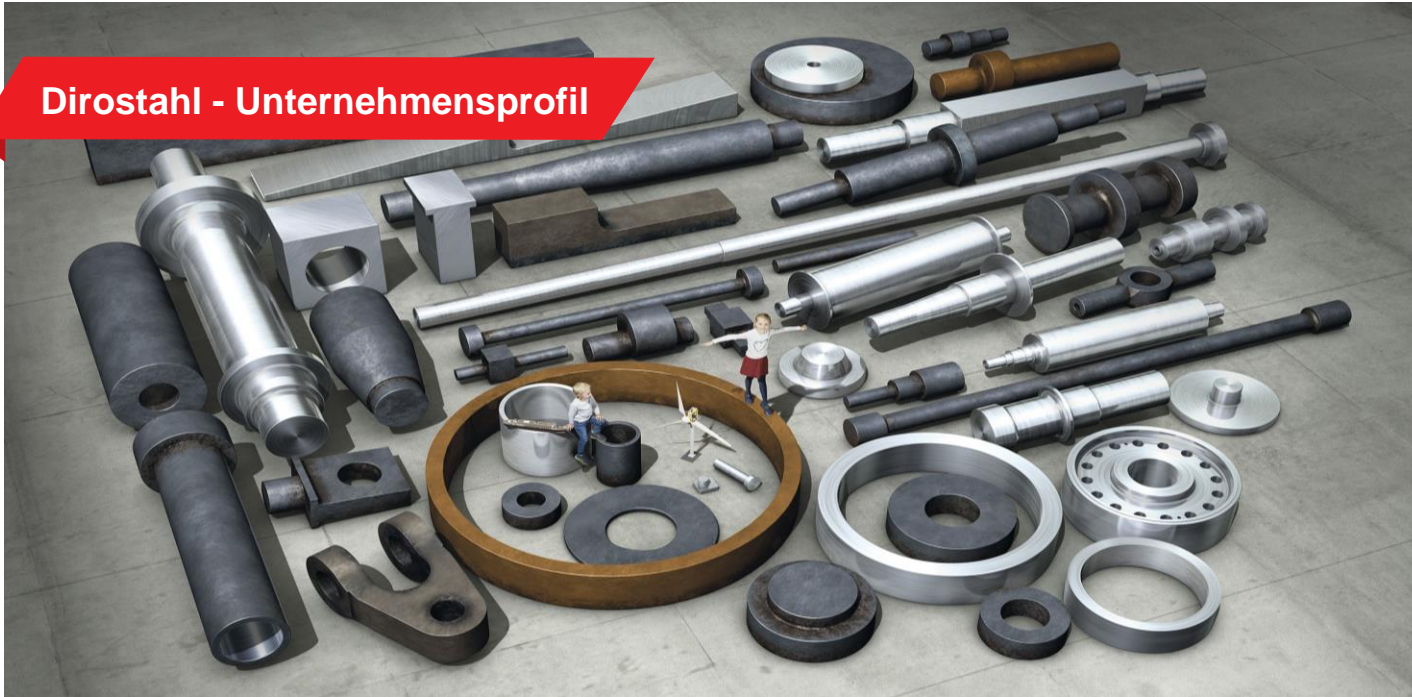
Schmiedetradition mit Wurzeln in wassergetriebenem Schmiedekotten im Bergischen Land seit 400 Jahren

Heute

- Familiengeführtes Unternehmen
- Freiformschmiede und Ringwalzwerk
- 450 Mitarbeiter



Dirostahl - Unternehmensprofil



| | | |
|--|--|------------|
| WELLEN | | 26% |
| Länge | bis maximal 15.000 mm | |
| Durchmesser | bis maximal 1.600 mm | |
| Stückgewicht | bis maximal 35.000 kg | |
| BLÖCKE / PLATTEN UND STABSTAHL VIERKANT / FLACH | | 7% |
| Länge | bis maximal 15.000 mm | |
| Breite | bis 1.800 mm breit / 1.000 mm dick | |
| Stückgewicht | bis maximal 35.000 kg | |
| GESCHMIEDETE ROHRE / ZYLINDER | | 7% |
| Durchmesser | Außen-Ø max. 2.400 mm/ Innen-Ø max. 1.800 mm | |
| Länge | bis maximal 5.000 mm | |
| Stückgewicht | bis maximal 25.000 kg | |
| RINGE GEWALZT | | 45% |
| Durchmesser | Außen-Ø maximal 3.500 mm | |
| Höhe | bis maximal 850 mm | |
| Stückgewicht | bis maximal 8.000 kg | |
| SCHEIBEN / LOCHSCHEIBEN / RINGE GESCHMIEDET | | 20% |
| Durchmesser | Außen-Ø maximal 2.400 mm | |
| Stärke | bis maximal 1.200 mm hoch | |

Dirostahl - Produktion (2022)



Gesamtgasverbrauch

- 17,6 Mio. m³ ≈ 183 Mio. kWh ≈ 31.000 t CO₂

Gesamtstromverbrauch

- 16,3 Mio. kWh

Gesamtkosten Gas+Strom

- 8,4 Mio. €

Materialeinsatz

- 56.000 t (Block- und Strangguss)

Werkstoffe

- 80 Güten im Standardprogramm

Warmumformung Presswerk

- 2 Freiformschmiedepressen (40 MN / 32 MN)
- 1 Dampfhammer (120 Ztr.)

Warmumformung Hammerwerk

- 8 Dampfhammer (≤ 60 Ztr.)

Warmumformung Ringwalzwerk

- 2 Ringwalzwerke
- 1 Ringrohlingpresse

Warmumformung gesamt

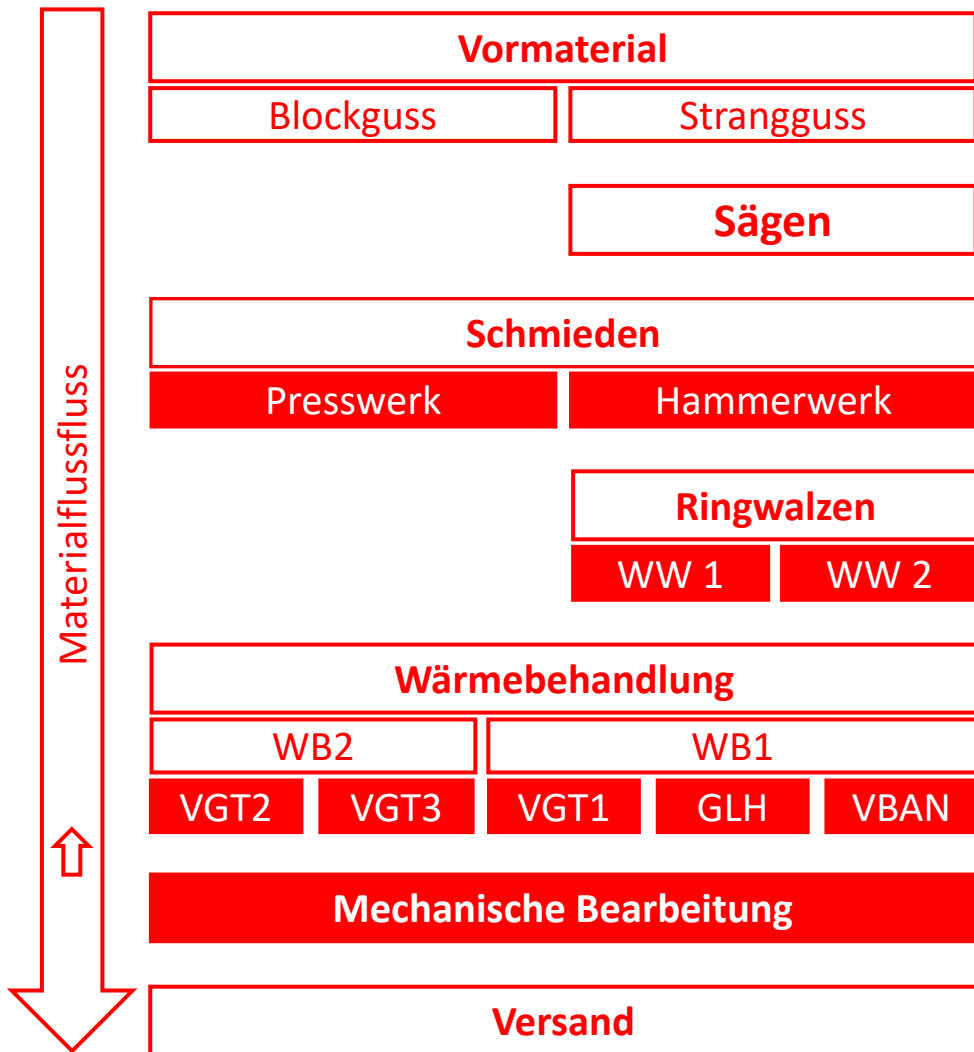
- 40 Öfen (alle erdgasbeheizt)

Wärmebehandlung

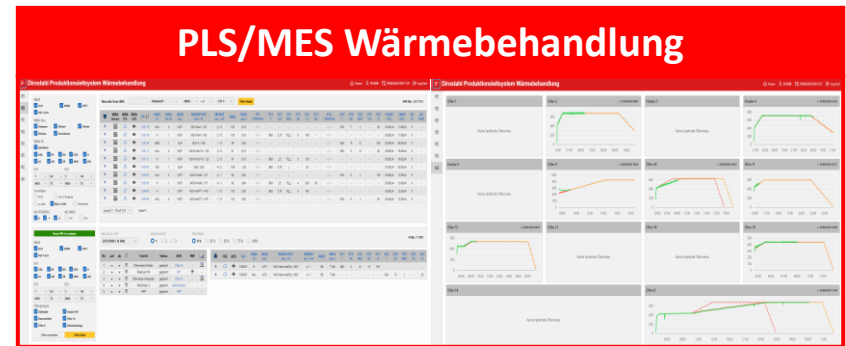
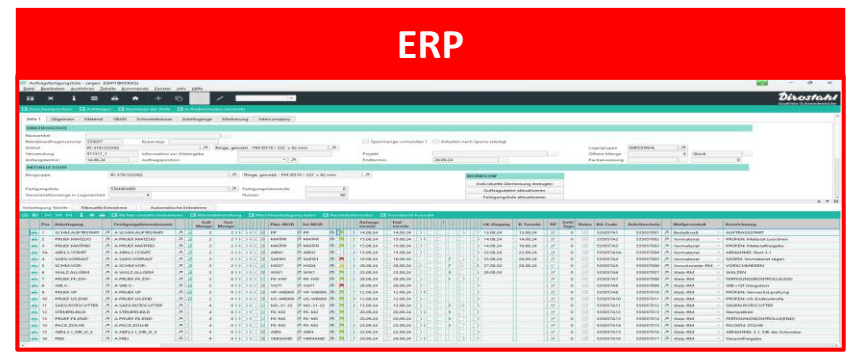
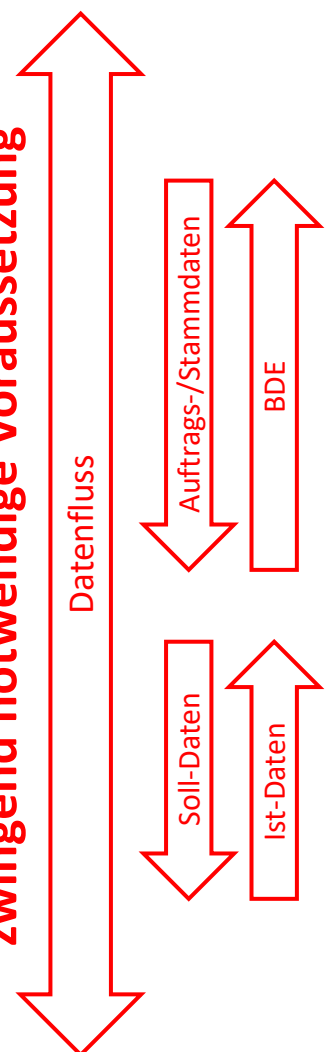
- 26 Öfen (alle erdgasbeheizt)
- 5 Abschreckbecken

Mechanische Bearbeitung

- Spitzen- und Karusseldrehmaschinen
- Fräs- und Bohrwerke



Digitale Dateninfrastruktur ist zwingend notwendige Voraussetzung



KI-unterstützte Kapazitätsplanung in der Wärmebehandlung

Ausgangssituation | Planungsaufgabe/-herausforderung (grob)

Planungsbasis (WBA-Pool)*:
 600 Wärmebehandlungsaufträge
 ca. 3000 Teile, ca. 60 Werkstoffe
 Ø 5 Auftragsgröße

* bei manueller Planung:
Vorgängerstatus = -2

Kundenvorgaben
mechanische Eigenschaften
Termin

Vergüten

| Austenitisieren | | | | | |
|-----------------|-------|-------|-------|--------|-------|
| 860°C | 880°C | 900°C | 920°C | | |
| Härten | | | | | |
| FQ H | | FQ L | | Wasser | |
| 180°C | 200°C | 230°C | 150°C | 180°C | 200°C |
| 240°C | 250°C | 270°C | 230°C | 250°C | 180°C |
| 300°C | | | | 200°C | 230°C |
| Anlassen | | | | | |
| 500°C | 510°C | 520°C | 530°C | 540°C | 550°C |
| 560°C | 570°C | 580°C | 590°C | 600°C | 610°C |
| 620°C | 630°C | 640°C | 650°C | 660°C | 670°C |
| 680°C | 690°C | 700°C | 710°C | 720°C | 730°C |

Glühen

| | | | | | |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 470°C | 490°C | 500°C | 510°C | 520°C | 530°C |
| 540°C | 550°C | 560°C | 570°C | 580°C | 590°C |
| 600°C | 610°C | 620°C | 640°C | 650°C | 660°C |
| 680°C | 720°C | 800°C | 820°C | 840°C | 850°C |
| 860°C | 870°C | 880°C | 890°C | 900°C | 920°C |
| 930°C | 1050°C | 1060°C | 1070°C | 1100°C | 1140°C |

26 Öfen

| | | | |
|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| Ofen 1 ≤ 1100°C | | Ofen 2 ≤ 1000°C | |
| Haube 3 ≤ 1100°C | Haube 4 ≤ 1100°C | Haube 5 ≤ 1100°C | |
| Ofen 6 ≤ 950°C | | | |
| Ofen 10 ≤ 1100°C | Ofen 11 ≤ 950°C | Ofen 12 ≤ 950°C | Ofen 13 ≤ 950°C |
| Ofen 18 ≤ 1200°C | Ofen 19 ≤ 1200°C | Ofen 9 ≤ 1100°C | |
| Ofen 14 ≤ 1100°C | | Ofen 8 ≤ 1200°C | |
| Haube a ≤ 1100°C | Haube b ≤ 1100°C | Haube c ≤ 1100°C | Haube d ≤ 1100°C |
| Haube e ≤ 1100°C | Haube f ≤ 1100°C | Haube g ≤ 1100°C | Ofen 24 ≤ 1100°C |
| Haube 25 ≤ 1100°C | Haube 50 ≤ 1100°C | Haube 51 ≤ 1100°C | |

5 Härtebecken

| | | |
|-------------------|-------------------|---------------------|
| Becken F1 FQ L | Becken F2 FQ H | Becken W1 Wasser |
| Becken F3 FQ L | | Becken W2 Wasser |

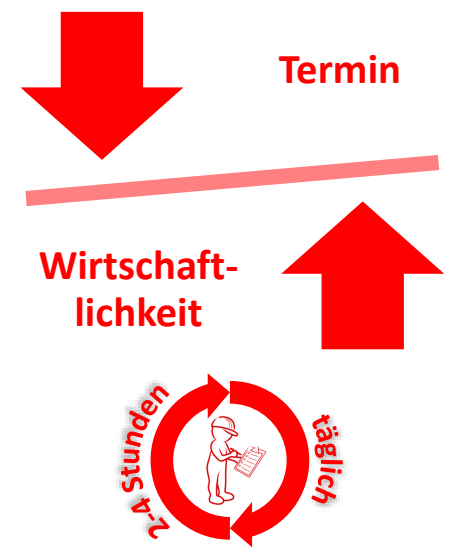
KI-unterstützte Kapazitätsplanung in der Wärmebehandlung

Ausgangssituation | Planungsaufgabe/-herausforderung (Detail)

Planungsbasis (WBA-Pool)*:
* bei manueller Planung: Vorgängerstatus = 2
600 Wärmebehandlungsaufträge
ca. 3000 Teile, ca. 60 Werkstoffe
Ø 5 Auftragsgröße

| Austenitisieren | | | | | | | | | | | |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 860°C | | | 880°C | | | 900°C | | | 920°C | | |
| Härten | | | | | | | | | | | |
| FQ H | | | | FQ L | | | | Wasser | | | |
| 180°C | 200°C | 230°C | 300°C | 150°C | 180°C | 200°C | 100°C | 130°C | 150°C | 240°C | 250°C |
| 270°C | 230°C | 250°C | 180°C | 200°C | 230°C | 180°C | 200°C | 230°C | 300°C | | |
| Anlassen | | | | | | | | | | | |
| 500°C | 510°C | 520°C | 530°C | 540°C | 550°C | 560°C | 570°C | 580°C | 590°C | 600°C | 610°C |
| 620°C | 630°C | 640°C | 650°C | 660°C | 670°C | 680°C | 690°C | 700°C | 710°C | 720°C | 730°C |
| 470°C | 490°C | 500°C | 510°C | 520°C | 530°C | 540°C | 550°C | 560°C | 570°C | 580°C | 590°C |
| 600°C | 610°C | 620°C | 640°C | 650°C | 660°C | 680°C | 720°C | 800°C | 820°C | 840°C | 850°C |
| 860°C | 870°C | 880°C | 890°C | 900°C | 920°C | 930°C | 1050°C | 1060°C | 1070°C | 1100°C | 1140°C |

- ↑ Qualitätsanforderungen
- ↑ Preisdruck
- ↑ Termindruck
- ↓ Losgrößen
- ↑ Energiekosten
- ↑ Materialkosten
- ↑ Lohnkosten
- ↓ CO₂-Emissionen (PCF)
- ↓ Fachkräfte



- ↑ Energieeffizienz
- ↑ Ressourceneffizienz
- ↑ Anlagenauslastung
- ↓ Mehraufwand
- ↓ Leerzeiten
- ↓ Nacharbeit
- ↑ Fertigungssteuerung

Belegung für die nächsten 1-2 Tage
(max. Planungshorizont bei manueller Planung)

| | | | |
|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| Ofen 1 ≤ 1100°C | | Ofen 2 ≤ 1000°C | |
| Haube 3 ≤ 1100°C | Haube 4 ≤ 1100°C | Haube 5 ≤ 1100°C | |
| Ofen 6 ≤ 950°C | | | |
| Ofen 10 ≤ 1100°C | Ofen 11 ≤ 950°C | Ofen 12 ≤ 950°C | Ofen 13 ≤ 1100°C |
| Ofen 18 ≤ 1200°C | Ofen 19 ≤ 1200°C | Ofen 9 ≤ 1100°C | |
| Ofen 14 ≤ 1100°C | | Ofen 8 ≤ 1200°C | |
| Haube a ≤ 1100°C | Haube b ≤ 1100°C | Haube c ≤ 1100°C | Haube d ≤ 1100°C |
| Haube e ≤ 1100°C | Haube f ≤ 1100°C | Haube g ≤ 1100°C | Ofen 24 ≤ 1100°C |
| Haube 25 ≤ 1100°C | Haube 50 ≤ 1100°C | Haube 51 ≤ 1100°C | |
| Becken F1 FQ L | Becken F2 FQ H | Becken W1 Wasser | |
| Becken F3 FQ L | | Becken W2 Wasser | |



KI-unterstützte Kapazitätsplanung in der Wärmebehandlung

KI-unterstützter Lösungsansatz | Projektphasen (grob)



Prognose-KI (generative KI)

- ✓ Am weitesten verbreiteter Teilbereich der KI mit „Machine Learning“ als bekanntester Vertreter.
- ✓ Große Mengen historischer Daten werden zwecks Mustererkennung verarbeitet, um aus der Vergangenheit zu lernen und Aussagen über die Zukunft zu treffen.
- ✓ Anwendungen: Navigationssysteme (Erstellung von Stauprognosen) und Anlagensoftware (Predictive Maintenance).
- ! Für die automatische Planungsoptimierung der Wärmebehandlung ist diese Fähigkeit der Vorhersage nicht zielführend.
- ! Die automatische „Nachahmung“ des menschlichen Planers verringert zwar den Planungsaufwand, eine Verbesserung der Planqualität ist jedoch nicht erreichbar, anhand der Historie nachgeahmte Plänen würden dieselben Schwächen/Fehler enthalten.

Planungs-KI

- ✓ Technologie der Mathematischen Optimierung (siehe auch Operations Research oder Decision Intelligence).
- ! Lernt nicht aus historischen Plänen, wie geplant wurde.
- ✓ Lernt im Vorfeld vollständig, wie geplant werden darf, um für die Zukunft bestmögliche Aussagen zu treffen.
- ✓ Generierung einer mathematischen Beschreibung („mathematischer Zwilling“), die das gesamte Spektrum der zulässigen Planungsmöglichkeiten unter **Berücksichtigung sämtlicher Regeln/Restriktionen und Vorgaben**, aber auch Freiheiten abbildet.
- ✓ Durch die **Beschreibung des Optimierungszieles** erhält die Mathematische Optimierung die Fähigkeit, Pläne qualitativ bewerten und miteinander vergleichen zu können.
- ✓ Es entsteht somit ein hochkombinatorisches Konstrukt aus ineinander verflochtener und abhängiger Teilentscheidungen, das durch die Mathematische Optimierung beherrscht wird.

¹ Dr. Sebastian Goderbauer (gapzero mathematical decision support GmbH) et. al. | stahl. Nr. 4 (2024)

Regeln/Restriktionen (Auswahl)

- WBA sind zum WB-Los kombinierbar, wenn $[T_{WBA,min}, T_{WBA,max}]$ im WB-Los gilt
- WBA sind zum WB-Los kombinierbar, wenn die möglichen Abschreckmedien mindestens eine Übereinstimmung haben
- Zeit zwischen Härten und Anlassen ≤ 18 h
- \vdots
- Für Ofen 9 gilt $B \times L \times H = 2,4 \times 2,7 \times 1$ m
- Für Ofen 14 gilt WB-Los Härten ≤ 15 t
- Ringe dürfen ineinander gelegt werden, wenn der Abstand ≥ 100 mm
- Härtebecken F2 ist mit den Handlingsgeräten 2-, 3- und 4-Zinker erreichbar

Zielfunktionen (Beispiel)

1. Maximiere die Anzahl der verplanten WB-Lose mit Priorität
2. Maximiere die Anzahl der verplanten WB-Lose ohne Priorität
3. Verplane WB-Lose mit Priorität frühestmöglich
4. Minimiere die Gesamtverspätung
5. Minimiere die Anzahl der Ofenreisen
6. Maximiere den Füllgrad der Ofenreisen

IT-Infrastruktur

- Linux-VM auf Dirostahl-Server
- Docker-Container mit Planungs-KI und Solvern
- REST-API für Datenaustausch Planungs-KI \leftrightarrow PLS WB

KI-unterstützte Losbildung

- Entwicklung Planungs-KI mit Berücksichtigung sämtlicher WB-Regeln/Restriktionen

KI-unterstützte Losbildung

- Entwicklung Planungs-KI mit Berücksichtigung sämtlicher Packregeln/-restriktionen

Intelligente Plantafel

- Entwicklung Planungs-KI zur Ofenbelegungsplanung unter Berücksichtigung steuerbarer Optimierungsziele

In Produktion bringen

- Hosten der Planungs-KI auf Dirostahl-Server

Dirostahl Produktionsleitsystem Wärmebehandlung - Plantafel

WB1 WB2 - Plantafel GAPZERO

alle Anlassen Glühen Glühen/Anlassen Glühen/Härten Härten Leercharge

BA ID ...OR... 29.08.2024 00:00 - 27.09.2024 13:15 SET RESET WB ART Prio/TERMIN VN an VN aus REFRESH MV PLANTAFEL zyklisch on demand Start Berechnung

Planungsparameter

Planungsanalyse

Ofenauslastung

Material in WB ja

Vorgängerstatus 0 -1 -2

Öfen

- Ofen 1 Ofen 2 Haube 3
- Haube 4 Haube 5 Ofen 10
- Ofen 11 Ofen 12 Ofen 13
- Ofen 18 Ofen 19 Ofen 9
- Ofen 14 Ofen 8

Härtebecken

- F1 F2 W1

12:52:52 | Optimierung abgeschlossen

WBA: 653
39 Prio mit 2 zu spät
614 nicht Prio mit 12 zu spät
48 fehlerhaft

WB-Lose: 156
26 Prio mit 0 zu spät
130 nicht Prio mit 0 zu spät
11 nicht verplant

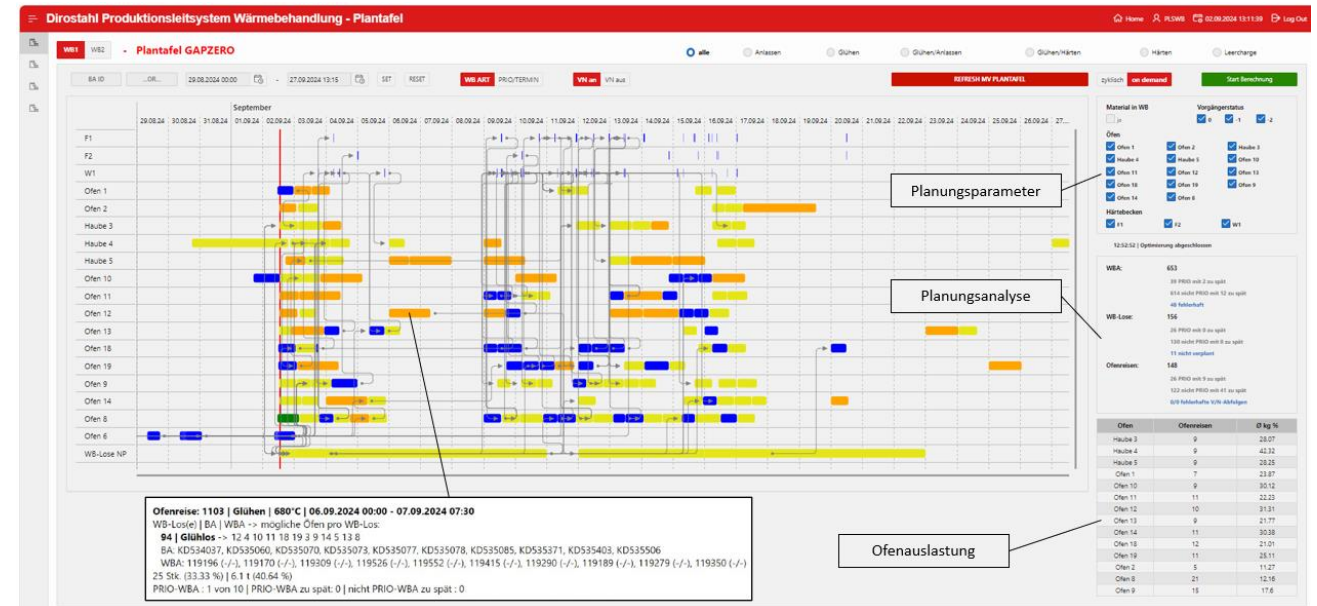
Ofenreisen: 148
26 Prio mit 9 zu spät
122 nicht Prio mit 41 zu spät
0/0 fehlerhafte V/N-Abfolgen

| Ofen | Ofenreisen | Ø kg % |
|---------|------------|--------|
| Haube 3 | 9 | 28.07 |
| Haube 4 | 9 | 42.32 |
| Haube 5 | 9 | 28.25 |
| Ofen 1 | 7 | 23.87 |
| Ofen 10 | 9 | 30.12 |
| Ofen 11 | 11 | 22.23 |
| Ofen 12 | 10 | 31.31 |
| Ofen 13 | 9 | 21.77 |
| Ofen 14 | 11 | 30.38 |
| Ofen 18 | 12 | 21.01 |
| Ofen 19 | 11 | 25.11 |
| Ofen 2 | 5 | 11.27 |
| Ofen 8 | 21 | 12.16 |
| Ofen 9 | 15 | 17.6 |

Ofenreise: 1103 | Glühen | 680°C | 06.09.2024 00:00 - 07.09.2024 07:30
 WB-Los(e) | BA | WBA -> mögliche Öfen pro WB-Los:
94 | Glühlos -> 12 4 10 11 18 19 3 9 14 5 13 8
 BA: KD534037, KD535060, KD535070, KD535073, KD535077, KD535078, KD535085, KD535371, KD535403, KD535506
 WBA: 119196 (-/-), 119170 (-/-), 119309 (-/-), 119526 (-/-), 119552 (-/-), 119415 (-/-), 119290 (-/-), 119189 (-/-), 119279 (-/-), 119350 (-/-)
 25 Stk. (33.33 %) | 6.1 t (40.64 %)
 Prio-WBA : 1 von 10 | Prio-WBA zu spät: 0 | nicht Prio-WBA zu spät : 0

Status Quo Praxis/Betrieb

- Plantafel seit 07/2024 im Einsatz als Assistenzsystem für den Planer
- (Komplett-)Planung „auf Knopfdruck“ in ≤ 15 Minuten statt bisher (Teil-)Planung in 2-4 Stunden
- Planungshorizont ca. 28 Tage statt bisher 1-2 Tage
- ⇒ Erhebliche Mitarbeiterentlastung und „noch nie dagewesene Übersicht“



Reduzierung von Mehraufwand (Nachwärmern) und Leerzeiten

- 4000 Ofenreisen, davon 460 x Nachwärmern (2023)
- 65000 h Ofenbetrieb, davon 2250 h Nachwärmern und 21000 h Leerlaufzeit (2023)
- ⇒ Planung ohne Nachwärmern (zwischen Härten und Anlassen)
- ⇒ Reduzierung von Leerlaufzeiten durch geplante/vorausschauende Außerbetriebnahme von Öfen
- ⇒ - 2,81 Mio. kWh/a (Gas) \approx - 500 t CO₂/a \approx - 94.000,- €/a

Detektion von „Solisten“ (Wärmebehandlungsaufträge (WBA), die mit keinem anderen WBA kombinierbar sind)

Aufgabe und Herausforderung

- Verbesserung der Planungsqualität hinsichtlich Durchsatz und Energieeffizienz bei gleichzeitiger Reduzierung des Planungsaufwandes

Lösungsansatz

- Entwicklung einer Planungs-KI zur automatischen Planung von WB-Losen und Anlagenbelegung gemäß steuerbarem Optimierungsziel

Voraussetzung für die Umsetzung

- Digitale Dateninfrastruktur zwingend erforderlich
- Partner mit entsprechendem Know-how und eigene Mitarbeiter, die das Projekt vorantreiben

Umsetzung

- Intelligente Plantafel im vorhandenen Produktionsleitsystem

Ausblick und weitere Ziele

- Erweiterung der Planungsbasis (WBA-Pool) und somit Erweiterung des Planungshorizontes
- Steuerung der Optimierungsziele in der Bedienoberfläche (Regler für „Spagat“ zwischen Termin und Wirtschaftlichkeit)
- Weitere Steigerung der Energie-/Ressourceneffizienz
 - Verbesserung und Homogenisierung der Anlagennutzung/-auslastung (- 2,65 Mio. kWh/a (Gas) \approx - 471 t CO₂/a \approx - 90.000,-- €/a)
 - Reduzierung der Nacharbeit von Ø 15% auf Ø 7% (- 0,41 Mio. kWh/a (Gas) \approx - 73 t CO₂/a \approx - 14.000,-- €/a)
- Ausrollen der KI-unterstützten Planung auf die Betriebsbereiche vor der Wärmebehandlung (Walz-, Hammer-, Presswerk), um absolutes statt lokales Planungsoptimum zu erreichen

Vielen Dank für ihre Aufmerksamkeit.

Dr. Guido Mittler

✉ gmitter@dirostahl.de

☎ +49 2191 593 258

<https://dirostahl.com>

<https://www.linkedin.com/company/dirostahl-karl-diederichs-kg>

Dank an die Projektpartner.



Dr. Sebastian Goderbauer

✉ goderbauer@gapzero.de

<https://gapzero.de>

EFFIZIENZ
AGENTUR
NRW



Matthias Graf

✉ mgr@efa.nrw

<https://ressourceneffizienz.de>