

Optimierung der Produktionsreihenfolgeplanung in Walzwerken durch Auswertung von Expertenregeln und Einsatz von Evolutionären Algorithmen

F. Hendrich, R. Ihle, V. Thiel; Gröditzter Stahlwerke GmbH¹

R. Mikut; TU Bergakademie Freiberg²

1. Motivation

Im hier betrachteten Ringwalzwerk werden Blöcke unterschiedlicher Stahlsorten und Formate auf Länge gesägt, in einem Drehherdofen auf Umformtemperatur erwärmt und mittels Presse und einem Radial-Axial-Walzwerk weiterverarbeitet. Bei der Fertigung von Aufträgen mit kleinen Stückzahlen kommt der produktionsvorbereitenden Planung entscheidende Bedeutung zu. Die Ursache liegt in der hohen Flexibilität der Produktion, die auftragsspezifisch eine Reihe von Werkzeugwechseln an Presse und Walzwerk erfordert. Eine optimierte Produktionsreihenfolge der zu bearbeitenden Aufträge bestimmt maßgeblich die erreichbare Anlagenkapazität.

Gegenwärtig wird diese Planung manuell vorgenommen, wodurch die erreichbare Gesamtgüte limitiert ist. Die Einschätzung eines Lösungsvorschlages hängt von einer großen Anzahl z.T. widersprüchlicher Forderungen, wie z.B. der Einhaltung von Terminen und der Reduzierung des Umbauaufwandes ab. Dabei besteht eine Vielzahl technologischer Restriktionen. Alle Zielsetzungen und Forderungen sind als Voraussetzung für eine Optimierung in eine mathematische Zielfunktion zu integrieren, deren Parametrierung noch Modifikationen durch den Technologen erlauben muß. Zur Lösung solcher und ähnlicher Aufgaben sind aus der Literatur verschiedene Algorithmen bekannt (z.B. [1-9]).

Aus mathematischer Sicht handelt es sich um ein Travelling Salesman Problem (TSP), das allerdings durch zeitvariante Einflußgrößen überlagert ist. In dieser Arbeit soll gezeigt werden, daß sich der Einsatz eines wissensbasierten Lösungsverfahrens in Kombination

¹Gröditzter Stahlwerke GmbH, D-01609 Gröditz, Riesaer Str., Telefon: +49-35263-62 700, Fax: ++49-35263-62 701

² TU Bergakademie Freiberg, Institut für Automatisierungstechnik, D-09596 Freiberg, Lessingstr. 45, Telefon: +49-3731-393247, Fax: +49-3731-392925, E-mail: mikut@aut.tu-freiberg.de

mit einem Evolutionären Algorithmus zur Lösung dieser Aufgabe eignet. Die eingesetzten Expertenregeln dienen dabei in erster Linie zur Bereitstellung einer Startlösung für die Evolutionären Algorithmen, um die Konvergenzgeschwindigkeit zu erhöhen und die Gefahr des Einlaufens in relativ schlechte lokale Minima der Zielfunktion zu reduzieren. Als Programmiersprache für die wissensbasierte Optimierung wurde MATLAB verwendet.

Ziel dieser Arbeit ist es,

- die Strategie bei der Aufstellung der Kostenfunktion zu erläutern,
- den hybriden Lösungsalgorithmus vorzustellen und
- die Effizienz des Algorithmus anhand eines Walzprogrammes für eine Kalenderwoche mit realen Daten zu demonstrieren.

Dabei steht hier nicht der Vergleich mit anderen mathematischen und heuristischen Verfahren zur Lösung verwandter Probleme im Vordergrund, sondern die Lösung der technischen Aufgabe.

2. Technologischer Ablauf

Das Ringwalzwerk (RWW) stellt neben dem Stahlwerk, der Stahlgießerei und der Schmiede mit mechanischer Bearbeitungswerkstatt einen Betrieb im Unternehmen Gröditzer Stahlwerke GmbH dar. Der prinzipielle technologische Ablauf ist in Bild 1 dargestellt.

Als Ausgangsmaterial dienen im Stahlwerk gegossene Blöcke in unterschiedlichen Blockformaten, Strangguß aus Fremdzukauf und Schmiedewellen aus der Fertigung der Schmiede (1 in Bild 1). Dieses Vormaterial wird auf eine festgelegte Masse gesägt (2). Nach dem Sägen eines Blöckchens wird dieses auf eine Palette geschoben und im Palettenlager (3) abgelegt. Mittels Kran werden die Paletten an die Beschickungseinrichtung des Drehherdofen (DHO) transportiert (4). Die Temperaturführung der Zonen hängt von der Stahlmarke und der Einsatzmasse ab. Sie ist für jeden Auftrag in der speziellen Technologie festgelegt. Anschließend bearbeitet die Stauchpresse (5) die erwärmten Blöckchen und locht mit einem Lochdorn einen Butzen aus. In der speziellen Technologie ist festgelegt, ob sofort zur eigentlichen Walzung übergegangen werden kann oder ob ein vorheriges Aufweiten der Lochscheibe erforderlich ist. Über den Rollgang (7) erfolgt entweder der Transport zur Aufweitpresse (6) oder direkt zum Radial-Axial-Walzwerk (RAW). Seine endgültige Form erhält der Rohling beim Walzen auf dem RAW (8). Die Walzerzeugnisse werden anschließend der Stempelpresse zugeführt (9). Die jeweiligen Werkzeuge an (5-8) müssen auftragsspezifisch konfiguriert werden.

Notwendige Werkzeugumbauten werden mit Hilfe von zwei Krananlagen vorgenommen, von denen eine die Stauchpresse bedient und die andere für den Bereich Aufweitpresse und Radial-Axial-Walzwerk zuständig ist. Dadurch können Umbauten teilweise parallelisiert werden.

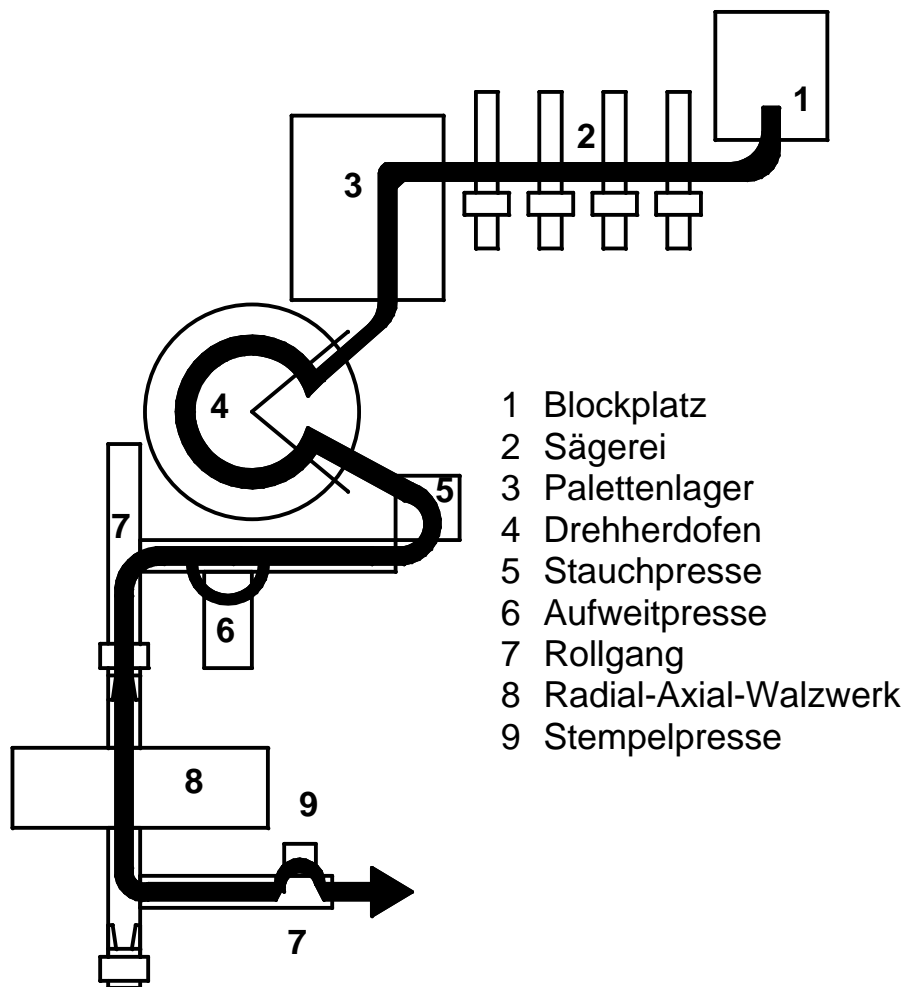


Bild 1: Schematische Darstellung Ringwalzwerk

3. Problemdarstellung

Das hier betrachtete Problem ist strukturell mit einem Flowshop Scheduling Problem vergleichbar und entspricht einem Travelling Salesman Problem [1]. Als Travelling Salesman Problem (TSP) wird das Problem eines Handlungsreisenden bezeichnet, der eine vorgeschriebene Anzahl von Orten zu besuchen hat. Er hat die Orte so zu einer Rundreise zu verknüpfen, daß der Weg minimal wird, aber jeder Ort genau einmal bereist wird. Tiefergehende Betrachtungen zur Lösung von TSP beispielsweise durch die Erzeugung einer Startlösung mittels Heuristiken als Grundlage für die Branch-and-Bound-Methode finden sich in [2].

Exakte Verfahren garantieren eine optimale Lösung. Die Auswahl aller Permutationen und Berechnung des Zielkriteriums wird vollständige Enumeration [3] genannt und ist eine Methode der exakten Verfahren. Auch wenn die Angaben über die Problemgröße für eine sinnvolle Anwendung der vollständigen Enumeration unterschiedlich sind, so kann doch

festgestellt werden, daß diese Methode keinen allgemeingültigen Lösungsweg für kombinatorische Probleme darstellt. Für ein typisches Wochenprogramm mit 135 Aufträgen folgen hier $2.7 \cdot 10^{230}$ mögliche Lösungen. Folglich ist diese Methode wegen ihres hohen Rechenaufwandes sehr langsam und allenfalls für nicht zu umfangreiche Probleme anwendbar. Deswegen werden im folgenden **heuristische** Verfahren untersucht, die zwar keine exakte Lösung, aber hinreichend gute praktische Näherungen ermitteln sollen.

Die Gütefunktion ist für die Optimierung der Auftragsreihenfolge \underline{s} von n Aufträgen durch

$$T_{ges} = \underbrace{\sum_{k=1}^{n-1} u_k(\underline{w}(\underline{s}))}_{\text{Umbauzeit}} + \underbrace{\sum_{k=1}^n v_k(\underline{s})}_{\text{Restriktionen}} + \underbrace{\sum_{k=1}^n T_k(\underline{s})}_{\text{Terminbewertung}} \stackrel{!}{=} \underset{\underline{s}}{\text{Min}} \quad (1)$$

gegeben. Die technologischen Restriktionen v_k und die Terminbewertungen T_k des Auftrages k liefern zusätzliche Strafterme. Technologische Verbote (z.B. beim Erwärmungsregime im Drehherdofen), technologisch unerwünschte Situationen (z.B. Aufeinanderfolge von Teilen unterschiedlicher Masse im Drehherdofen, die insgesamt zu längeren Erwärmungszeiten führen) und ungünstige Terminlagen (zu frühes oder zu spätes Walzen) werden so gegen Vor- und Nachteile bei den Umbauzeiten abgewogen.

Dabei bedeutet

$$u_k = \max \left((\underline{w}_k \neq \underline{w}_{k+1})^T \cdot \underline{a}, (\underline{w}_k \neq \underline{w}_{k+1})^T \cdot \underline{b}, \underline{g} \right) \quad (2)$$

die Umbauzeit zwischen dem k -ten und $(k+1)$ -ten Auftrag, wobei der Operator " \neq " durch

$$\underline{z} = (z_1 \quad \dots \quad z_m)^T = (\underline{x} \neq \underline{y})^T$$

$$z_i = \begin{cases} 1 & \text{für } (x_i \neq y_i) \wedge (y_i \neq 0) \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad \text{für } i = 1, \dots, m \quad (3)$$

definiert ist. Der Term γ kennzeichnet immer notwendige Justierzeiten. Die Terme α und β charakterisieren die parallelen Umbauzeiten der jeweils zugehörigen **eingebauten** Werkzeugkonfigurationen

$$\underline{w}_k = (w_{1k} \quad w_{2k} \quad \dots \quad w_{mk})^T$$

$$w_{ik} = \begin{cases} \tilde{w}_{i,\underline{s}(k)} & \text{für } \tilde{w}_{i,\underline{s}(k)} \neq 0 \\ \tilde{w}_{i,\underline{s}(k-n)} & \text{mit } n: \forall j: j=0, \dots, n-1 \left((\tilde{w}_{i,\underline{s}(k-j)} = 0) \wedge (\tilde{w}_{i,\underline{s}(k-n)} \neq 0) \right) \end{cases}, \quad (4)$$

wobei $\tilde{w}_{i,\underline{s}(k)}$ die **technologisch vorgegebene** Konfiguration des i -ten Werkzeuges des k -ten Auftrages der Sequenz \underline{s} bedeutet. Die Fallunterscheidungen sind erforderlich, um

nicht notwendige Umbauten an der Aufweitpresse (hier durch $\tilde{w}_{i,s(k)} = 0$ gekennzeichnet) zu berücksichtigen.

Dennoch ist es zur Reduzierung des Berechnungsaufwandes sinnvoll, für die nicht sequenzabhängigen Teile eine Umbaumatrix \tilde{U} mit den Elementen

$$\tilde{u}_{i,j} = \max\left(\left(\tilde{w}_i \neq \tilde{w}_j\right)^T \cdot \underline{a}, \left(\tilde{w}_i \neq \tilde{w}_j\right)^T \cdot \underline{b}, g\right), \quad i = 1, \dots, n; \quad j = 2, \dots, n; \quad j \neq i \quad (5)$$

einzuführen und als wesentlichen Teil der Güteberechnung zur Verfügung zu stellen. Die prinzipielle Funktionsweise soll hier an einem akademischen Beispiel mit der technologisch vorgegebenen Werkzeugkonfiguration

$$\tilde{W} = \begin{pmatrix} 2 & 7 & 1 & 4 & 3 & 2 & 99 & 8 \\ 3 & 7 & 2 & 3 & 2 & 9 & 8 & 8 \\ 22 & 19 & 2 & 0 & 0 & 4 & 5 & 8 \\ 6 & 19 & 2 & 3 & 2 & 4 & 16 & 8 \end{pmatrix} \quad (6)$$

verdeutlicht werden. Der erste Auftrag kennzeichnet dabei die bereits eingebaute Werkzeugkonfiguration und kann im folgenden in seiner Position nicht mehr verändert werden. Mit den notwendigen Umbauzeiten pro Werkzeug

$$\underline{a} = (30 \quad 20 \quad 20 \quad 20 \quad 15 \quad 10 \quad 0 \quad 0)^T \text{ und} \quad (7)$$

$$\underline{b} = (0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 15 \quad 15)^T$$

folgt mit dem Verbot des Umbaus auf den gleichen Auftrag ($\tilde{u}_{ii} = \infty$, $i = 1, \dots, n$) und dem Rückbau auf die Ausgangskonfiguration ($\tilde{u}_{i,1} = \infty$, $i = 1, \dots, n$)

$$\tilde{U} = \begin{pmatrix} \infty & \underline{95} & 80 & 115 \\ \infty & \infty & \underline{60} & 60 \\ \infty & 95 & \infty & \underline{\underline{65}} \\ \infty & 60 & 30 & \infty \end{pmatrix}, \quad (8)$$

wobei die sequenzabhängigen Umbauzeiten bewirken, daß bei Umbauten von Auftrag 3 (3. Zeile der Matrix) auf einen anderen Auftrag ausgewählte Zeiten aus einem Intervall (60..95 bei Umbau auf Auftrag 2 bzw. 30..65 bei Umbau auf Auftrag 4 - doppelt unterstrichen) auftreten können, z.B.

$$\underline{u}(\underline{s}) = \underline{u}\left(\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \end{pmatrix}^T\right) = \left(\underline{95} \quad \underline{60} \quad \underline{\underline{30}}\right)^T. \quad (9)$$

Die Asymmetrie der Matrix \tilde{U} liegt in der bereits erwähnten Besonderheit des Einsatzes der Aufweitpresse gegenüber den anderen Werkzeugen begründet. So ist die Umbauzeit von einem Auftrag, der die Aufweitpresse durchlaufen muß, auf einen Auftrag ohne Auf-

weitpresse geringer als umgekehrt, da die Aufweitpresse nicht umgebaut werden muß, sondern in der letzten Konfiguration stehen bleibt. Sind die beiden Aufträge genau umgekehrt miteinander verknüpft, so hängt der Umbau vom letzten die Aufweitpresse beanspruchenden Auftrag ab.

4. Wissensbasis

Zur Beherrschung dieses Aufgabentyps bietet sich der Einsatz von wissensbasierten und heuristischen Lösungsverfahren an, die laut [3,4] zu hinreichend guten Ergebnissen führen. Zu den heuristischen Verfahren zählen z. B. das Verfahren des besten Nachfolgers, Verfahren mit Prioritätsregeln [5] oder Engpaßregeln. Ein weiterer Lösungsweg ist der Einsatz unscharfer Methoden [6]. Ein interessanter Vorteil rein wissensbasierter Ansätze ist die Tatsache, daß der aufwendige Entwurf der Gütefunktion für das Prozeßverhalten entfallen kann.

Das Grundprinzip besteht darin, den Technologen zu befragen und seine Methoden und Heuristiken zur Aufstellung des Walzprogrammes als Regeln zu systematisieren. Dieses Vorgehen liefert Regeln wie

Regel 1: Sind in der Menge der zu planenden Aufträge unterschiedliche Walzen enthalten, dann fasse als ersten Arbeitsschritt Aufträge mit gleichen Walzen zusammen.

und

Regel 14: Drängt ein Termin zur Fertigung eines Auftrages, so ist dieser - falls nicht anders realisierbar - ungeachtet seines Umbauaufwandes einzuplanen.

Insgesamt wurde eine Regelbasis von 24 Regeln erstellt [10]. Andererseits ergaben Untersuchungen, daß die Expertenregeln nur suboptimale Ergebnisse liefern und insbesondere bei komplizierten Ausgangssituationen (z.B. durch die parallelen Umbauten der Werkzeugkonfiguration an der Aufweitpresse usw.) für eine befriedigende Lösung nicht ausreichen. Zudem ist der Wissenserwerb durch die Nichterfassung unbewußten Wissens ("Dem Experten genügt ein Blick."), die ständige Aktualisierung des Expertenwissens, die notwendige Quantifizierung der qualitativen Regeln, der z.T. fehlenden Angaben über Prioritäten bei widersprüchlichen Regeln u.s.w. problematisch.

Deshalb soll zusätzlich zu den Expertenregeln ein weiterer Optimierungsansatz untersucht werden, der im folgenden Abschnitt vorgestellt wird.

5. Evolutionäre Algorithmen

Der Ansatz, evolutionäre Modelle als Lösungskonzepte für komplexe Optimierungsprobleme zu verwenden, läßt sich bis in die 70er Jahre zurückverfolgen. Zu diesem Zeitpunkt entstanden unterschiedliche Konzepte, die heute unter dem Begriff *Evolutionäre Algorithmen* (EA) zusammengefaßt werden. Als die beiden Hauptvertreter der EA sind die *Evolutionären Strategien* (ES) und die *Genetischen Algorithmen* (GA) zu nennen. Die ES wurden von Rechenberg [11] und Schwefel [12] entwickelt. Die Methoden der GA gehen auf Holland [13] zurück.

Der Vorteil der EA gegenüber den herkömmlichen Suchverfahren liegt darin begründet, daß sie selbst im Falle komplizierter unstetiger, nicht differenzierbarer und zeitvarianter Zielfunktionen einsetzbar sind.

Evolutionäre Algorithmen sind der Klasse heuristischer Such- und Optimierungsstrategien zuzuordnen, welche sich einer gezielten Zufallssuche bedienen. Die Menge möglicher Lösungen des Optimierungsproblems wird als *Population von Individuen* in einer künstlichen Umwelt betrachtet. Der Grad der Anpassung eines Individuums an die Umwelt wird durch seine *Fitneß* angegeben. Die Koordinaten eines Individuums im Suchraum werden als *Gene* bezeichnet. Durch Modellierung der evolutionären

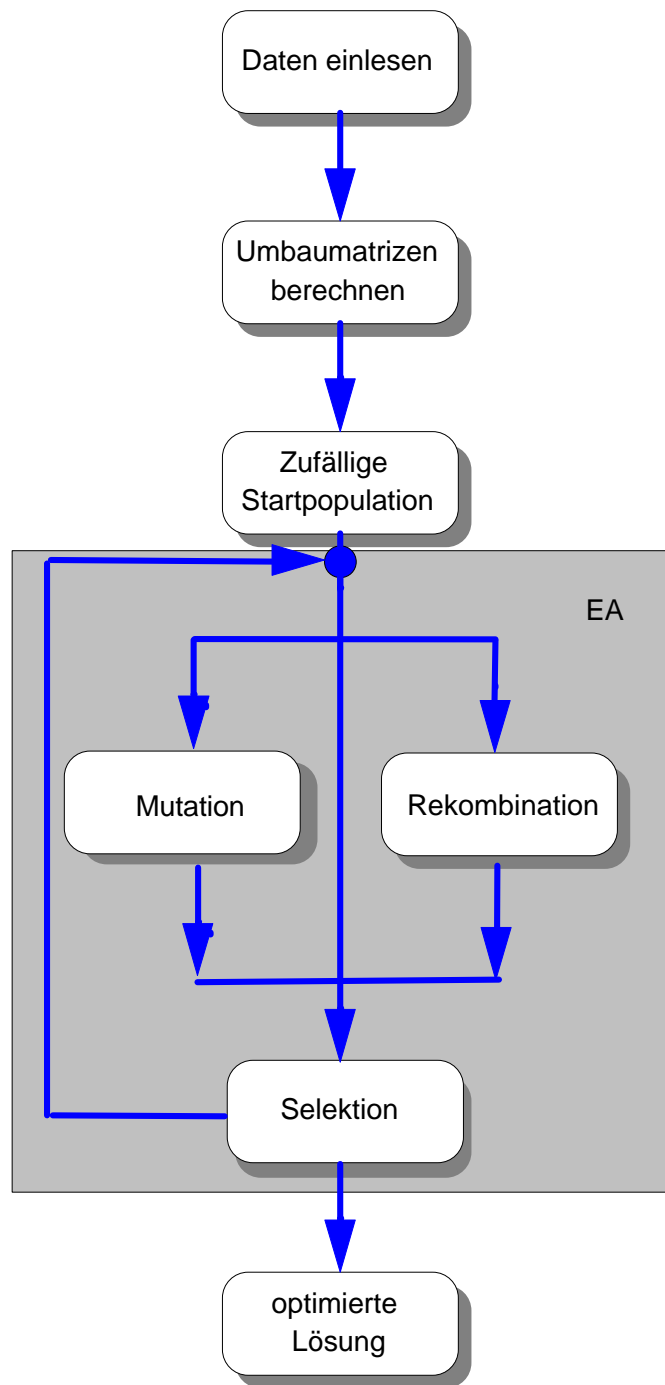


Bild 2: Prinzipieller Ablauf eines Evolutionären Algorithmus'

Prozesse *Rekombination*, *Mutation* und *Selektion* werden neue Generationen von Suchpunkten gefunden, die mit hoher Wahrscheinlichkeit eine durchschnittlich größere Fitneß aufweisen als ihre Vorfahren (prinzipieller Ablauf siehe Bild 2).

Die Codierung für die Auftragsreihenfolgeplanung wird so vorgenommen, daß natürliche Zahlen (Auftragsnummern von 1 bis zur Anzahl der Aufträge) verwendet werden, deren Reihenfolge im Chromosom die Reihenfolge der Aufträge bezeichnet. Dabei ist bei allen modifizierenden Operatoren darauf zu achten, daß nur gültige Lösungen entstehen und jeder Auftrag genau einmal enthalten ist.

Crossing-over steht für die **Rekombination** zweier Individuen zur Erzeugung von Nachkommen (neue Lösungen). Ausführlicher beschrieben werden soll an dieser Stelle der in Bild 3 dargestellte Order Crossover (OX), weil er sich für Probleme in der hier behandelten Art am besten eignet [1].

<i>Elter A:</i>	1	<u>4</u>	5	7	3	2	6
<i>Elter B:</i>	2	5	3	6	4	1	7
<i>B - A:</i>	2	*	*	6	<u>4</u>	1	*
<i>B - A (z)</i>	2	6	<u>4</u>	*	*	*	1
<i>Nachkomme:</i>	2	6	4	<u>5</u>	<u>7</u>	<u>3</u>	1

Bild 3: Funktionsweise des OX-Operators

Aus dem Code des Elters A wird an zufällig gewählter Stelle ein Stringsegment einer zufälligen Länge zwischen $n/2$ und $n/3$ gewählt (unterstrichen), das in den Nachkommen implantiert werden soll. Als nächstes werden aus dem Elter B die Elemente gelöscht, die in den gemeinsamen Nachkommen implantiert werden sollen (* in A-B). Beim Zusammenschieben muß darauf geachtet werden, daß die erste Kante des Nachkommen, die dem Crossoverstring folgt, auch als Kante im Empfängercode vorhanden ist. Diese Forderung ist nur zu erfüllen, sofern der zweite Knoten dieser Kante nicht auch im Crossoverstring liegt.

Ein sinnvoller Mutationsoperator ist hier das zufällige Vertauschen zweier Aufträge.

Für die hier zu lösende Aufgabe wurden zusätzliche heuristische Operatoren eingesetzt, auf dem systematischen Vertauschen einzelner Aufträge oder von Auftragsblöcken aus 1-6 Aufträgen beruhen (Prinzip siehe Bild 4). Entsprechend ihrer Ähnlichkeit mit Mutationsoperatoren werden diese Operatoren im folgenden als "gezielte Mutation" bezeichnet. Der Vorteil dieser Operatoren liegt im systematischen Absuchen des Zielgebietes und in Rechenvereinfachungen aufgrund der teilweise wiederverwendbaren Teilergebnisse bei der Erstellung der Gütefunktion.

<i>Elter :</i>	1	<u>4</u>	5	7	3	2	6
Nachkommen:	<u>4</u>	1	5	7	3	2	6
(Mutanten)	1	<u>4</u>	5	7	3	2	6
	1	5	<u>4</u>	7	3	2	6
	1	5	7	<u>4</u>	3	2	6
	1	5	7	3	<u>4</u>	2	6
	1	5	7	3	2	<u>4</u>	6
	1	5	7	3	2	6	<u>4</u>

Bild 4: Funktionsweise der gezielten Mutation für einen Auftrag (hier Auftrag 4)

6. Planungsstrategie

Die Gütewerte ergeben sich aus der Zielfunktion (1). Ein zweidimensionaler Ausschnitt aus dem Gütegebirge verdeutlicht, warum eine zufällig generierte Startlösung problematisch ist. Dazu wurde der Verlauf der Gütewerte in Abhängigkeit von der Position zweier Aufträge grafisch dargestellt (Bild 5). Deutlich zu erkennen ist ein stark zerklüftetes Gütegebirge mit einer Vielzahl lokaler Minima.

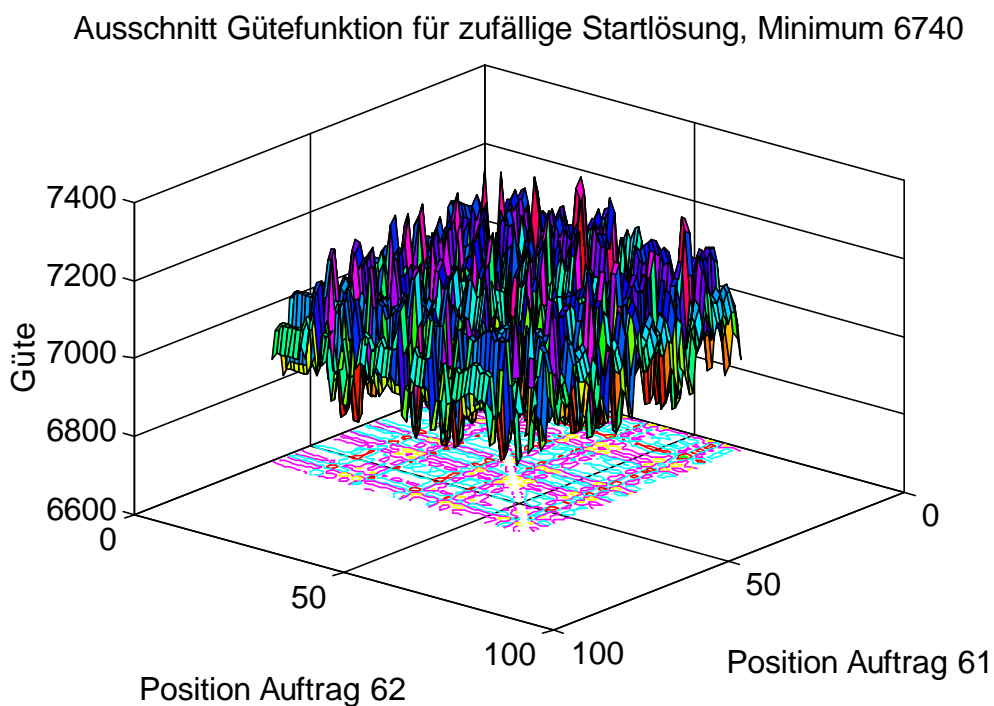


Bild 5: Ausschnitt aus dem Gütegebirge in Abhängigkeit der Positionen zweier Aufträge in einer zufälligen Walzreihenfolge
 Im Vergleich dazu gibt Bild 6 einen Ausschnitt aus der Gütefunktion für eine durch Expertenregeln (ES) aufgestellte und Evolutionäre Algorithmen (EA) bearbeitete Reihenfolge, das eine deutlich verbesserte Ordnung zeigt.

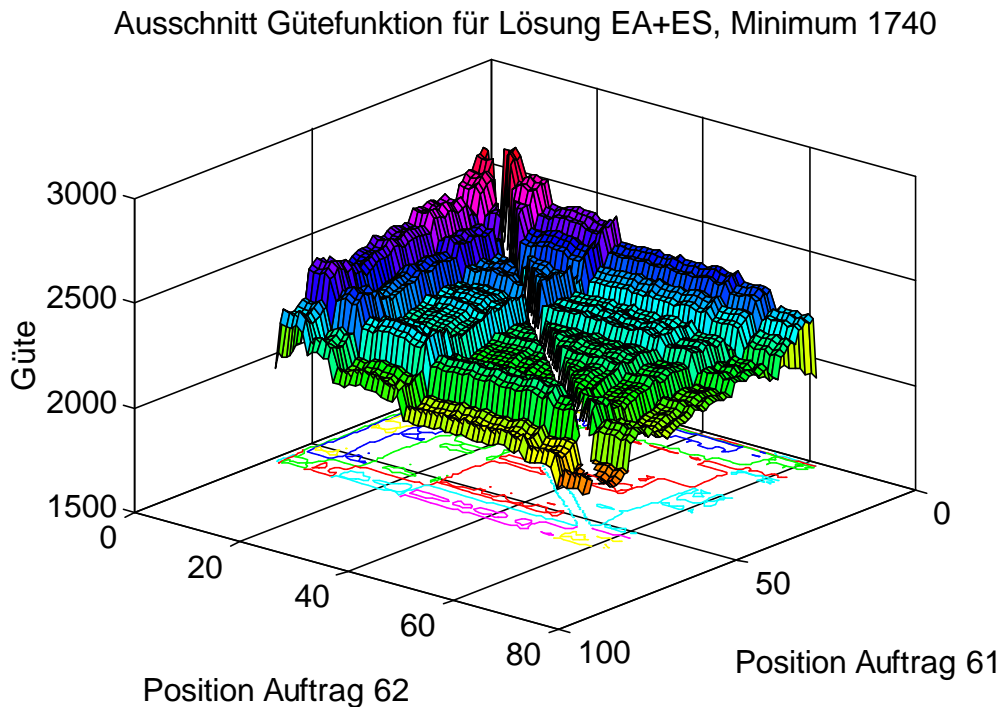


Bild 6: Ausschnitt aus dem Gütegebirge in Abhängigkeit der Positionen zweier Aufträge in einer durch Expertenregeln generierten Walzreihenfolge

Zudem belegt das Bild mit der Expertenlösung, daß die gezielten Mutationsoperatoren im hier vorliegenden Gütegebirge mit seiner stark orthogonal ausgerichteten Topologie gute Chancen auf effiziente Suchvorgänge bietet.

Durch den Einsatz der Expertenlösungen besteht offensichtlich die Chance, eine gute Startlösung zu erzielen und als Ausgangspunkt einer weiteren Optimierung zu verwenden. Der prinzipielle Ablauf dieses hybriden Algorithmus ist in Bild 7 dargestellt und soll nun im folgenden anhand eines realen Beispiels auf seine Effizienz untersucht werden.

Wesentlich für das hier behandelte Problem ist die Tatsache, daß spätere strukturelle und parametrische Änderungen der Gütefunktion zu erwarten sind und dieses Verfahren auch bei zusätzlichen Restriktionen einsetzbar ist.

7. Bewertung der Methoden an einem realen Walzprogramm

Zur Einschätzung der Leistungsfähigkeit der vorgestellten Methoden wurde ein reales Wochenprogramm verwendet, das mit etwa zwei Stunden Bearbeitungsaufwand vom Technologen aufgestellt worden ist und in der Praxis bereits abgearbeitet wurde. Das Beispiel umfaßt 135 Aufträge.

Es wurden folgende Versuchsstrategien auf dieses Beispiel angewendet und bezüglich ihrer erreichten Güterwerte und den dazu notwendigen Rechenzeiten miteinander verglichen:

- Expertenregeln und gezielte Mutation (ES + mod. EA),
- gezielte Mutation, angewandt auf eine zufällige Startlösung (ZUF + mod. EA),
- Expertenregeln (ES),
- EA mit zufälliger Startpopulation (ZUF + EA) und
- EA mit bestimmter Startpopulation aus Expertensystem (ES + EA).

Die im folgenden angegebenen Rechenzeiten ergaben sich aus Versuchen auf einem Pentium-PC mit 120 MHz und 16 MB RAM.

Die besten Ergebnisse liefert der Algorithmus, der auf der Basis einer Startlösung mit Expertenregeln mit den heuristisch gewählten Tauschoperatoren optimiert. Hier wird mit relativ geringen Rechenzeiten von etwa fünf Minuten ein befriedigendes Ergebnis erzielt, das die Lösung des Technologen in den reinen Umbauzeiten um etwa 15% verbessert und alle technologischen Restriktionen einhält (Optimierungsverlauf siehe Bild 8).

Ein Algorithmus mit zufälliger Startlösung und Tauschoperatoren gelangt mit großem Rechenaufwand (20 bis 60 Minuten) etwa in die Bereiche der Expertenregeln, weist allerdings eine große Streuung in den erreichbaren Güterwerten auf.

Bereits die systematische Anwendung der Expertenregeln bringt etwa 5% Einsparung der Umbauzeiten, wobei die Rechenzeit etwa 2 s beträgt. Die Differenz zu den erreichbaren Güterwerten erklärt sich daraus, daß die Expertenregeln nur suboptimale Lösungen liefern

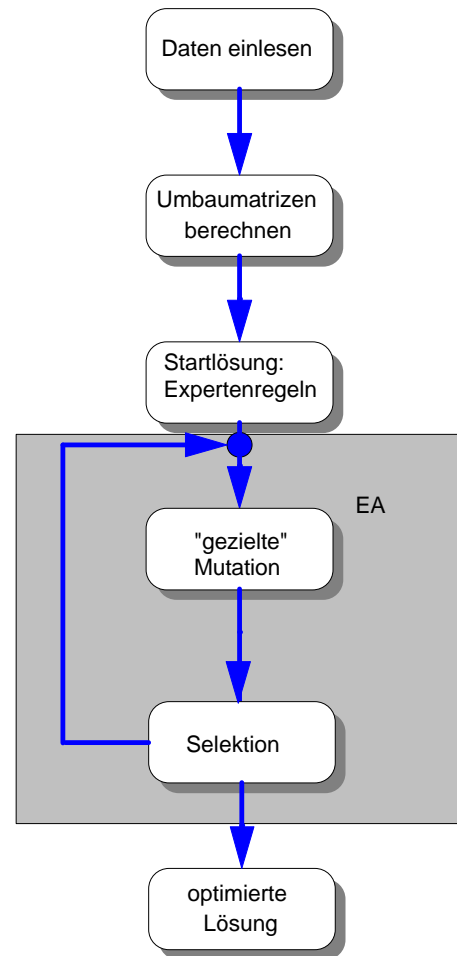


Bild 7: Optimierungsverlauf des modifizierten evolutionären Algorithmus

und z.B. für die Einsparung eines Umbaus an der Walze mehrmalige Umbauten an anderen Anlagengruppen verursachen, wodurch die Gesamtumbauzeit ansteigt. Zudem wird die Komplexität des Suchraums durch die z.T. parallelen Umbauten und die nur teilweise benötigte Aufweitpresse nicht überblickt. Beide Faktoren verschlechtern auch die Ergebnisse von konventioneller Suchheuristiken, wie z.B. die Verwendung des ähnlichsten Folgeauftrages.

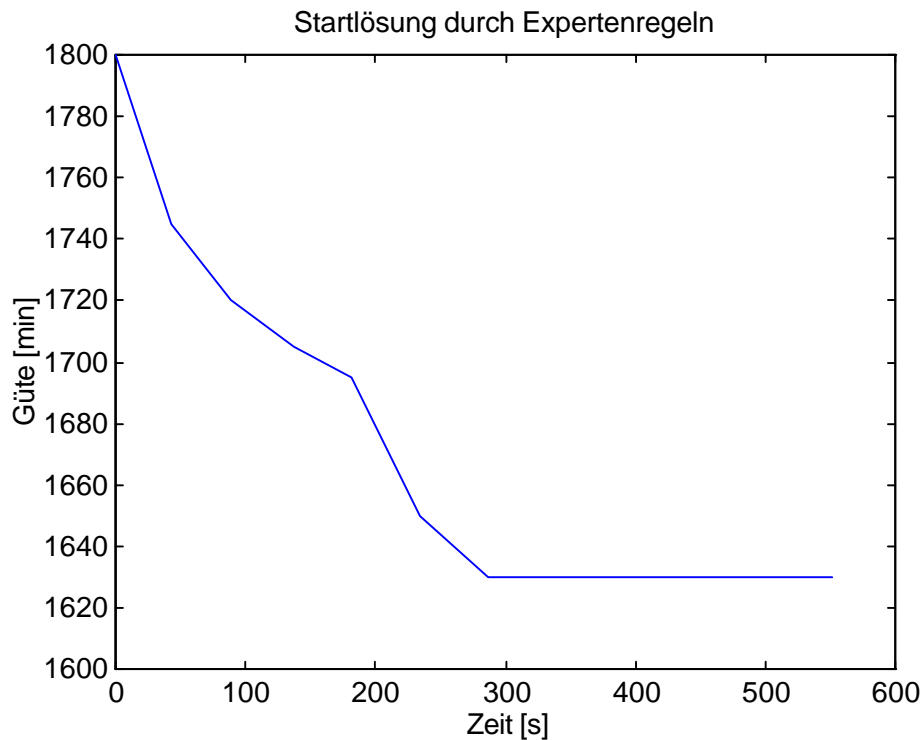


Bild 8: Optimierungsverlauf des modifizierten evolutionären Algorithmus bei Startlösung aus Expertenregeln

Der EA wird aus einer zufällig generierten Population gestartet. Diese Population besteht aus 100 Individuen, wobei jedes Individuum eine Walzsequenz aus 135 Aufträgen charakterisiert. Die 33 besten und zusätzlich 25 zufällig ausgewählte Lösungen wurden selektiert. Anschließend wurden identische Lösungen entfernt, um eine Dominanz dieser Lösungen durch Überrepräsentation auszuschließen. Die verbleibenden Lösungen stellten die Eltern der nächsten Generation dar. Dabei wurden der OX-Operator und ein Mutationsoperator eingesetzt. Die Versuche wurden abgebrochen, wenn nach 30 Zyklen keine Verbesserung der Güte mehr eintrat. Anfangs bewirkt die Rekombination große Güteverbesserungen. Im weiteren Verlauf überwiegt der Anteil der durch Mutation verbesserten Lösungen. Dennoch sind Rechenzeit und Optimierungsergebnisse unbefriedigend (Optimierungsverlauf siehe Bild 9). Versuche mit extrem großen Populationen (z.B. 2500

Individuen) führten zu verbesserten Ergebnissen im Bereich der Expertenlösungen, erforderten aber mehrere Stunden Rechenzeit.

Tabelle 1 gibt zudem eine Gesamtübersicht der untersuchten Optimierungsverfahren, die die Überlegenheit des Algorithmus mit dem modifizierten Genetischen Algorithmus mit dem Ergebnis der Expertenregeln als Startnäherung belegt.

	Minimale Güte	Maximale Güte	Minimale Rechenzeit [s]	Maximale Rechenzeit [s]
ES + mod. EA	1630	1630	290	290
ZUF + mod. EA	1680	2025	1406	3559
ES	1800	1800	2	2
ZUF + EA	3050	4120	550	2201
ES + EA	1695	1720	530	720

Tabelle 1: Vergleich von erreichter Güte und Rechenzeit der verschiedenen Methoden

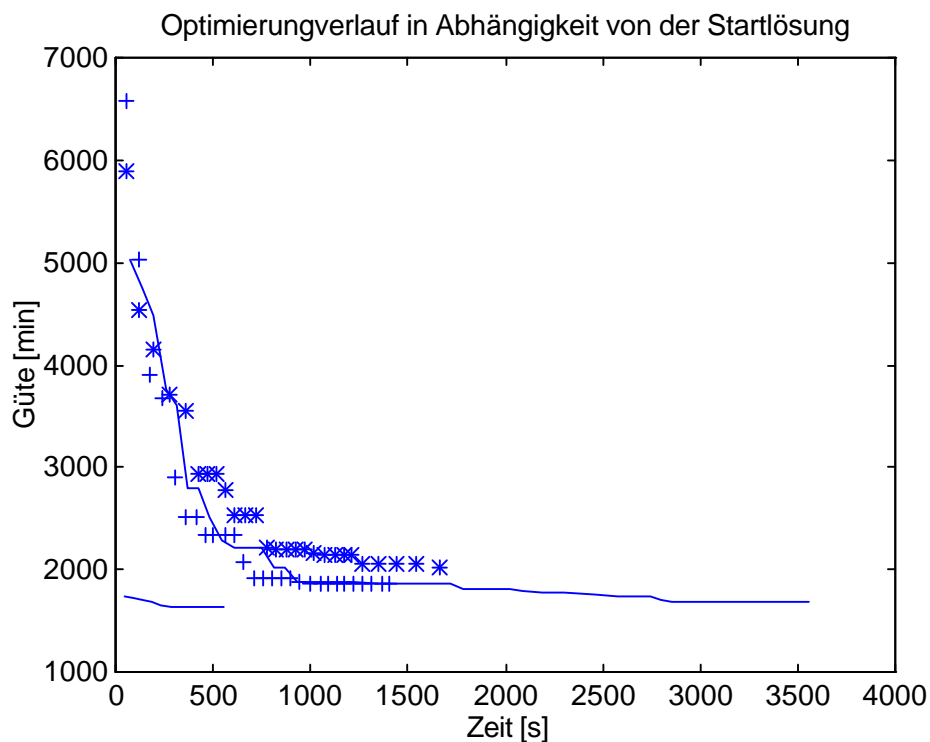


Bild 9: Verlauf der Gütwerte in Abhängigkeit von der Startlösung
 ... Startlösung (1800) durch Expertenregeln (ES + mod. EA)
 *, -, + zufällige Startlösung (5000-6600) Versuch 1-3 (ZUF + mod. EA)

8. Ausblick

Im hier vorgestellten Projekt wurde ein hybrider Algorithmus aus Expertenregeln und modifizierten evolutionären Algorithmen zur Optimierung des Walzprogrammes der Gröditzer Stahlwerke GmbH vorgestellt und anhand praktischer Daten seine Effizienz nachgewiesen. Diese Vorgehensweise ist für das hier untersuchte Beispiel der Anwendung von Expertenregeln und klassischen evolutionären Algorithmen überlegen und ermöglicht brauchbare Ergebnisse bei kurzen Rechenzeiten. Die vom Technologen heuristisch entworfene Strategie konnte unter Einhaltung der technologischen Restriktionen um ca. 15% verbessert werden.

Zukünftige Entwicklungsarbeiten konzentrieren sich insbesondere auf die Kopplung mit dem vorhandenen SAP und die Optimierung des Sägeprogramms zur weiteren Effektivitätssteigerung der gefundenen Lösung.

9. Literatur

- [1] BIERWIRTH, C: Flowshop Scheduling mit parallelen Genetischen Algorithmen, Deutscher Universitäts-Verlag GmbH, Wiesbaden, 1993
- [2] HAMACHER, A., MOLL, C.: The Euclidian Traveling Salesman Selection Problem, Proc., Symposium on Operations Research (SOR '95), Passau, Springer-Verlag, S.54 - 59, 1996
- [3] ABLAY, P.: Optimieren mit Evolutionsstrategien: Reihenfolgeprobleme, nichtlineare und ganzzahlige Optimierung, Dissertation, Universität Heidelberg, 1979
- [4] DORN, J., FROESCHL K. (Hrsg.): Scheduling of Production Processes, Ellis Horwood Limited, Chichester, 1993
- [5] FRANCK, B.: Empirische Untersuchungen von Prioritätsregeln für die ressourcenbeschränkte Projektplanung von zeitlichen Minimal- und Maximalabständen. Proc., Symposium on Operations Research (SOR '95), Passau, Springer-Verlag, S.144 - 149, 1996
- [6] ALBRECHT, H.-J., STRIETZEL, R.: Ein Fuzzy Algorithmus zur Reihenfolgeplanung in der Produktion, Proc., Seminar Fuzzy Logik und Neuronalen Netzen, Dresden; 1996
- [7] THOMALLA, C., ESCHBACH, O.: Maschinenbelegungsplan mit einem genetischen Algorithmus, Automatisierungstechnik 43, Heft 3, 1995
- [8] STOLP, W.: Ein Beitrag zur wissensbasierten Auftragsreihenfolgeplanung in der Fertigung, Fortschritts-Berichte VDI, Reihe 20, Nr. 72, Düsseldorf, 1992
- [9] SCHÄFER, G.: Funktionen der Produktionsplanung und -steuerung in einem integrierten Eisenhüttenwerk zur Erzeugung von Langprodukten unter besonderer Berücksichtigung des Einsatzes eines Expertensystems für die Feinplanung von Schmelz- und Gießprogrammen im Stahlwerk, Fortschritts-Berichte VDI, Reihe 2, Nr. 278, Düsseldorf, 1992
- [10] HENDRICH, F.: Erarbeitung einer Wissensbasis für ein Expertensystem im Säge- und Walzprogramm unter Beachtung der technologischen Durchsetzbarkeit im Bereich des Walzwerkes. Diplomarbeit, TU Dresden, Fakultät für Elektrotechnik, Institut für Automatisierungstechnik; 1997
- [11] RECHENBERG, I.: Evolutionsstrategie: Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution. Frommann Holzboog, Stuttgart, 1993
- [12] SCHWEFEL, H.-P.: Numerische Optimierung von Computermodellen mittels der Evolutionsstrategie. Birkhäuser, Stuttgart, 1977
- [13] HOLLAND, J. H.: Adaption in Natural and Artificial Systems. The University of Michigan Press, Ann Arbor, MI, 1975