

# Schneidige Lösung

Effizienter Papierzuschnitt durch flexible Planung

Iiro Harjunoski, Simo Säynevirta

Es ist allgemein bekannt, dass der Erfolg komplexer Vorgänge häufig von der Fähigkeit abhängt, vorausschauend zu denken. Dementsprechend groß ist der Stellenwert, den die detaillierte Planung industrieller Produktionsprozesse einnimmt. Zwar sind rechnergestützte Planungswerkzeuge noch immer weit davon entfernt, es mit den analytischen Fähigkeiten des menschlichen Gehirns aufzunehmen, doch es gibt immer mehr Aufgaben, die Computer mindestens genauso gut, wenn nicht gar besser erledigen können als der Mensch.

In einer Papierfabrik muss die Jumbo-Rolle, die aus der Papiermaschine kommt, entsprechend der Kundenwünsche in kleinere Rollen geteilt werden. Sollte ein Mensch die jeweils beste Möglichkeit finden, eine solche Rolle zuzuschneiden, wäre das nicht nur sehr zeitaufwändig, sondern es gäbe auch keine Garantie dafür, dass der Zuschnitt im Hinblick auf Abfallvermeidung und Produktqualität optimal ausfällt. Noch komplizierter wird es, wenn bestimmte Teile der Papierbahn aus Qualitätsgründen entsorgt werden müssen. Die konkrete Aufgabenstellung ist stets eine andere und die Möglichkeiten sind endlos. ABB bietet daher ein Softwarepaket, das die beste Zuschnittstrategie ermittelt.



## Sensorik &amp; Regelung

In vielen industriellen Prozessen besteht noch immer ein hohes Einsparungspotenzial, das durch die Implementierung besserer Planungsstrategien in Bezug auf Zeit- und Rohstoffnutzung realisiert werden kann. Dieser Artikel beschreibt eine fortschrittliche Optimierungsstrategie, die Offline-Planung und Online-Qualitätsverbesserung miteinander kombiniert. Die Lösung berücksichtigt Qualitätsunterschiede entlang der Jumbo-Rolle ebenso wie die Anforderungen an die einzelnen Rollen, die daraus geschnitten werden sollen. Das Ergebnis ist eine vollständige kombinatorische Lösung für das so genannte «Verschnittproblem». Der hier vorgestellte Ansatz ermöglicht optimale bzw. annähernd optimale Lösungen, die wiederum mit erheblichen Einsparungen durch Reduzierung des Qualitätsverlusts – d. h. des wirtschaftlichen Verlusts durch verminderte Produktqualität – verbunden sind. Die Vorteile sind ein geringerer Energie- und Rohstoffbedarf (niedrigere Kosten und geringere Umweltbelastung), eine zuverlässigere Erfüllung der Kundenanforderungen und eine höhere Rentabilität durch die Senkung der Gesamtproduktionskosten.

### Papier schneiden

Eine typische Papiermaschine produziert eine 10 m breite Papierbahn mit einer Geschwindigkeit von 120 km/h (bzw. 33 m/s) – das sind in einer Sekunde mehr als 5.200 DIN A4-Seiten. Bei einem Flächengewicht (Grammatur) von 80 g/m<sup>2</sup> entspricht dies 97 Tonnen Papier in der Stunde. In einem solchen Prozess hängen das Ergebnis und die daraus resultierende

Gesamteffizienz und -rentabilität entscheidend von der Planung ab. ABB bietet bereits ein voll integriertes Produktionsmanagementpaket für die Papierherstellung, das moderne Qualitätsleitsysteme (Quality Control System, QCS) und Bahninspektionssysteme (Web Imaging System, WIS) beinhaltet. Zudem dient die Produktionsplanungssoftware von ABB häufig als Vergleichsmaßstab, sodass ABB verständlicherweise bestrebt ist, die bestehenden Lösungen immer weiter zu verbessern und ökonomischer zu gestalten, um die Produktionskosten, die Umweltbelastung sowie den Energie- und Materialverbrauch bei der Herstellung des benötigten Papiers zu minimieren.

Das Zuschneiden der riesigen Jumbo-Rollen in kleinere Rollen findet an einem Aufroller direkt hinter der Papiermaschine statt. Das oberste Ziel beim Zuschnitt besteht darin, den Verschnitt – d. h. den Abfall, der entsteht, wenn nicht die gesamte Breite der Jumbo-Rolle zur Herstellung der geforderten Rollen genutzt werden kann – zu minimieren. Wenn beispielsweise aus einer 10 m breiten Jumbo-Rolle 1,5 m breite Rollen geschnitten werden sollen, geht ein 1,0 m breiter Streifen (d. h. 10% des Gesamtprodukts) verloren. Das Problem, verschiedene Rollenbreiten so zu kombinieren, dass möglichst wenig Abfall entsteht, wird auch als Verschnittproblem bezeichnet. Um es zu lösen, werden Schnittmuster bestimmt, anhand derer die Messer der Schneidemaschine in die gewünschte Position gebracht werden **1**. Die beiden vorrangigen Ziele dabei sind:

- Eine Schnittstrategie zu finden, die mit möglichst wenig Material (also möglichst wenig Verschnitt) die geforderten Rollenbreiten herstellt.
- Die Zahl der unterschiedlichen Muster zu minimieren und sie so anzuordnen, dass unnötige Einstellungen der Messer vermieden und der Durchsatz maximiert wird.

Die zur Erreichung dieser manchmal gegensätzlichen Ziele gewählte Vorgehensweise wirkt sich entscheidend auf die am Ende erzielte Lösung aus. Da die Zahl der diskreten Einstellungen riesig ist, bedarf es zur Lösung des Optimierungsproblems anspruchs-

voller Mathematik. Häufig gibt es Millionen von Möglichkeiten, die Zielrollen auf die Jumbo-Rolle zu verteilen. Analysiert man diese, wird schnell deutlich, dass eine gründliche Prüfung all dieser Möglichkeiten selbst mit einem schnellen Supercomputer kaum möglich wäre. Mit steigender Rollenanzahl wächst auch das Problem aufgrund der Vielzahl von alternativen Schnittmöglichkeiten. Zwar gibt es viele heuristische/mathematische Ansätze, um ein solches Problem effizient zu lösen, doch keiner davon garantiert eine global optimale Lösung. Dazu gehören unter anderem Rundungsheuristiken, Spaltengenerierungsverfahren, partielle Problemlösungen und andere Rucksackalgorithmen<sup>1)</sup>. Betrachtet man diese Auswahl bekannter Verfahren, erscheint das Problem durchaus lösbar. Doch ist ein solcher Ansatz allein in der Lage, angemessene Ergebnisse für das Papierzuschchnittproblem zu liefern?

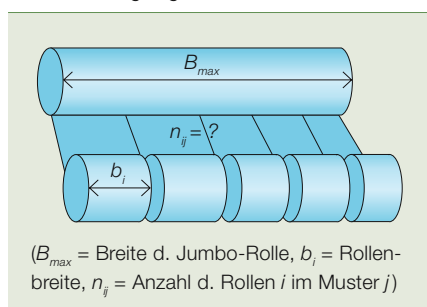
### Berücksichtigung der Papierqualität

In modernen Papierfabriken wird das Verschnittproblem für die Papiermaschine üblicherweise schon bei der Produktionsplanung und damit lange vor der eigentlichen Herstellung der Jumbo-Rollen gelöst.

Diese Vorausplanung wäre vollständig ausreichend, wenn man von einer gleichmäßigen Qualität des Papiers, also von einer guten Qualität über die gesamte Rolle ausgehen könnte. Leider ist dies nicht immer der Fall, da es zu lokalen Qualitätsabweichungen kommen kann. Während der Papierherstellung sammeln verschiedene Online-Mess- und Scangeräte große Mengen von Daten zu einer Vielzahl von Qualitätskriterien. Diese Daten werden sorgfältig verarbeitet und analysiert, und die meisten der daraus resultierenden Informationen stehen bereits kurz nach Fertigstellung der Jumbo-Rolle zur Verfügung, wenn die Rolle auf den Zuschnitt wartet. In **2** ist die Abweichung von der Zielqualität durch einen Farbcode dargestellt.

Vergleicht man die tatsächliche Qualitätsverteilung mit den geplanten Schnittmustern einer Jumbo-Rolle, so erweitert sich der vorbestimmte Schnittplan häufig als alles andere als

- 1** Zuschnitt der Jumbo-Rolle und das Verschnittproblem – wie können aus der Jumbo-Rolle am besten kleine Rollen mit bestimmten Abmessungen geschnitten werden?





Hauptschritte unterteilt. Im ersten Schritt wird die Jumbo-Rolle durch Aufteilung in «Scheiben» diskretisiert **3a**. Dabei wird die Qualität jeder Scheibe auf die Kundenanforderungen abgebildet. Das daraus resultierende Optimierungsmodell basiert auf einer Klassifizierung der Qualität (z. B. A, B oder C). Die endgültige Qualität jeder Rolle wird durch Kombination der Qualitätsbestimmung mit den wichtigsten Anforderungen an die Produktrollen berechnet. Dieses Diskretisierungsverfahren liefert eine gute Annäherung an die optimale Lösung.

In einem zweiten Schritt wird die Lösung weiter optimiert. Dieser umfasst einen kontinuierlichen und exakten Ansatz, mit dem die Machbarkeit einer endgültigen Lösung sichergestellt wird. Außerdem wird eine kontinuierliche Anpassung der Kanten für jeden Satz ermöglicht. Der kontinuierliche Ansatz basiert auf der Aufteilung der Jumbo-Rolle in kontinuierliche Qualitätszonen oder Bereiche entsprechend den verschiedenen Qualitätsklassifikationen **3b** jeder Rolle. Jeder Bereich ist einer entsprechenden Qualität (wieder A, B, C) zugeordnet. Ähnlich wie im ersten Schritt wird bei dieser Berechnung die Qualitätsbestimmung mit einigen Schlüsselparametern der Produktrollen kombiniert. Dieser Schritt liefert eine optimale Schnittstrategie, bei der die verschiedenen Qualitäten entlang der Jumbo-Rolle berücksichtigt werden.

Während keine dieser beiden Strategien allein in der Lage ist, alle komplexeren Probleme exakt und effizient zu lösen, ist der zweistufige Ansatz ebenso robust wie effektiv. Er bietet die Möglichkeit, die nicht konvergente Natur des Problems zu umgehen und schnell eine annähernd optimale Lösung zu erzielen.

**Gut versteckte Mathematik**

Der Benutzer muss sich nicht mit der zugrunde liegenden Mathematik oder den Algorithmen auseinandersetzen. Die Funktionalität kann vollständig in die bestehende Umgebung integriert werden, d. h. die Lösung arbeitet still im Hintergrund und bietet dem Kunden zusätzliche Vorteile. Doch für diejenigen, die gern einen «Blick hinter die Kulissen» werfen möchten, sollen

im Folgenden einige der Hauptmerkmale erläutert werden.

Der Ansatz umfasst die Lösung so genannter Mixed Integer Linear Programs (MILP) innerhalb spezieller Algorithmen und basiert auf robusten und bewährten Techniken. Die mathematischen Modelle weisen eine gewisse Ähnlichkeit zur Produktionsplanung auf, da in beiden Bereichen wichtige logische Entscheidungen bezüglich Anforderungen getroffen werden. Bei der Ablaufplanung wird der Zeithorizont durch eine feste Anzahl von Rasterpunkten diskretisiert, die über binäre Variablen bestimmten Aufträgen zugeordnet sind. Bei der Zuschnittoptimierung nimmt die Breite bzw. Länge der Jumbo-Rolle den Platz der Zeitvariable ein.

Beim Zuschnitt eines einzelnen Satzes wird eine Rolle durch den Index *r* und jede diskrete «Scheibe» durch *j* dargestellt. Die binäre Variable (mit dem Wert «1» oder «0») *xd<sub>rj</sub>* entspricht an der Stelle *j* auf der Jumbo-Rolle, an der die Rolle *r* beginnt (linke Kante), dem Wert «1». Für eine Optimierung und Maximierung des Gesamtwerts eines Zuschnittsatzes ist außerdem ein Kostenkoeffizient *c<sub>rj</sub>* erforderlich, der den Wert der Rolle an der betreffenden Position angibt. Die Zielfunktion ist sehr einfach: jede Rolle *r* so zu platzieren, dass der Gesamtwert des Zu-

schnittsatzes maximiert wird. Dies wird in folgender Gleichung ausgedrückt:

$$\max \sum_{r,j} c_{rj} \times xd_{rj} \tag{1}$$

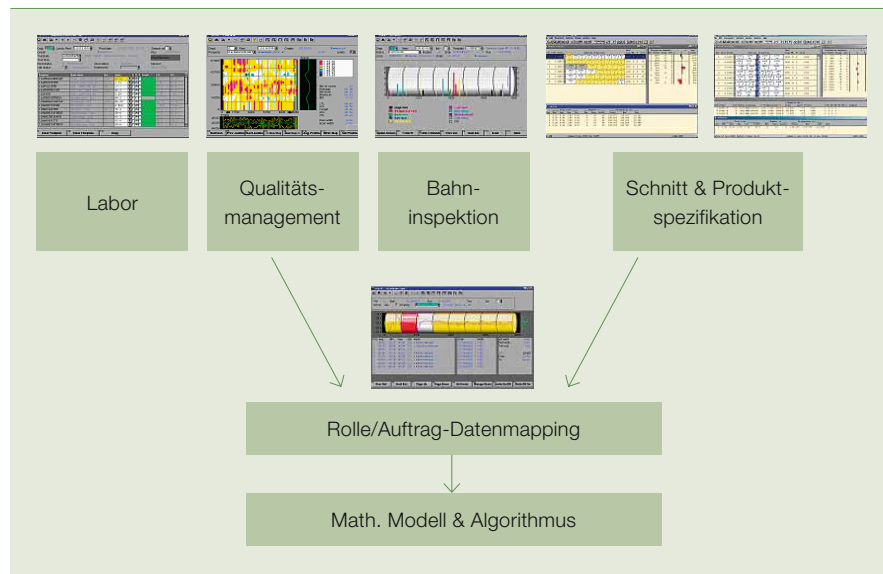
$$xd_{rj} \in \{0,1\}$$

Damit alles mathematisch korrekt definiert ist, werden Gleichungen eingeführt, die sicherstellen, dass sich die Rollen nicht überlappen und jeweils genau einmal auftauchen. Dies mag einfach klingen, doch solche Gleichungen können komplexer werden als erwartet.

Das diskretisierte Problem führt zu einem optimalen Schnittplan in Bezug auf eine bestimmte Rasterdichte. Bei typischen Jumbo-Rollen mit Breiten von bis zu 10.000 mm würde ein zu feines Raster (1 mm) das Problem rechnerisch unlösbar machen. Deshalb wird ein gröberes Raster (10–20 mm) gewählt. In diesem Fall müssen die Rollenbreiten gerundet werden, damit das Problem lösbar bleibt (aus 578 mm werden bei einem 10-mm-Raster z. B. 570 mm). Diese Rundungsfehler werden in einem nachfolgenden kontinuierlichen Schritt korrigiert.

Der kontinuierliche Schritt ähnelt ebenfalls einigen Ablaufplanungsstrategien, da hier die Jumbo-Rolle in flexible Abschnitte unterteilt wird. Diese Abschnitte sind von links nach

**4** Anwendungsübergreifende Komponenten – um ein Gesamtoptimum zu erreichen, müssen viele verschiedene Faktoren berücksichtigt werden.



rechts angeordnet, wobei die Grenzen zwischen ihnen stufenlos veränderbar sind, d. h. sie können an die jeweiligen Breiten der Kundenrollen angepasst werden. Jede Rolle wird mithilfe binärer Variablen genau einem Abschnitt und einem Qualitätsbereich zugeordnet. In den Gleichungen (2) bis (5) werden die Abschnitte mit  $n$  und die Bereiche mit  $s$  bezeichnet. Somit hat die binäre Variable  $x_{rn}$  nur dann den Wert «1», wenn die Rolle  $r$  dem Abschnitt  $n$  zugeordnet ist. Ebenso gibt die Variable  $x_{rs}$  an, dass sich die Rolle  $r$  im Qualitätsbereich  $s$  be-

findet.  $W_r$  gibt die Rollenbreite,  $r_r^{start}$  die Position der linken Kante einer Rolle,  $W_n^B$  und  $W_n^E$  die Start- und Endpositionen eines Abschnitts und  $S_s^B$  und  $S_s^E$  die Start- und Endpositionen der Bereiche an.

$$W_n^E = W_n^B + \sum_r x_{rn} \cdot W_r \quad (2)$$

$$r_r^{start} = W_n^B \text{ wenn } x_{rn} = 1 \quad (3)$$

$$\sum_s x_{rs} = 1 \quad (4)$$

$$S_s^B \leq r_r^{start} \leq S_s^E \text{ wenn } x_{rs} = 1 \quad (5)$$

$$x_{rn}, x_{rs} \in \{0,1\}$$

Kurz gesagt passt Gl. (2) die Breite eines Abschnitts an die ihm zugewiesene Rolle an. Der Abschnitt sollte genau an der linken Kante seiner Rolle beginnen, was durch Gl. (3) erzwungen wird. Die Tatsache, dass eine Rolle nur zu einem Qualitätsbereich gehören kann, wird in Gl. (4) ausgedrückt. Und schließlich muss die Rolle innerhalb dieses Bereichs platziert werden, was in Gl. (5) festgelegt ist. Dies sind nur einige der wichtigsten Nebenbedingungen des Problems, die einen Teil der mathematischen und logischen Abhängigkeiten verdeutlichen.

#### Der Algorithmus, der alles verbindet

Die oben beschriebenen Komponenten sind in 4 dargestellt. Noch wichtiger als die Beherrschung der mathematischen Einzelheiten ist das Verständnis, wie alles zu einem stabilen und einheitlichen Konzept zusammengesetzt werden kann. Um dies zu verdeutlichen, wird noch einmal das ursprüngliche Problem betrachtet. Die oben beschriebenen mathematischen Modellierungsaspekte ermöglichen in Kombination mit dem zweistufigen Ansatz eine effiziente Lösung des qualitätsbasierten Zuschnittproblems. Die daraus resultierende Strategie lässt sich auf verschiedene Weise anwenden: Entweder kann die Neuordnung satzweise 5a oder durch Änderung der Reihenfolge der Sätze in einer Jumbo-Rolle 5b erfolgen.

Im ersten Fall (Schwerpunkt auf einem geplanten Zuschnittsatz) werden die Rollen so im Satz platziert, dass der Gesamtwert (Qualitätsertrag) maximiert und somit die Auswirkung

von Qualitätsabweichungen minimiert wird. Ein vereinfachtes Beispiel wäre, die wertvollste Rolle in einem guten Bereich zu platzieren. In 5a steht rot für Rollen, die aussortiert werden müssen, und gelb für geringe Qualitätsabweichungen (B-Qualität).

Dasselbe Verfahren kann auch angewandt werden, um die Sätze auf einer Jumbo-Rolle neu anzuordnen 5b. Entsprechend dem oben beschriebenen Prinzip kann das Qualitätsergebnis verbessert werden, indem die Informationen über die Qualitätsverteilung mit dem Schnittplan der Jumbo-Rolle kombiniert werden. Dazu werden die Schnittsätze so angeordnet, dass sich ein maximaler Gesamtwert ergibt.

Ein intelligenter Algorithmus, der diese beiden Probleme in einer bestimmten Reihenfolge löst, kann die Qualitätsverluste auf ein physisches Minimum reduzieren. So ist sichergestellt, dass sich die aktuelle Planung stets an den bekannten Qualitätsdaten orientiert. Ein automatisches Aufspießen der Jumbo-Rolle sowie Ausschusszonen in Querrichtung können ebenso in die Lösung integriert werden wie die Berücksichtigung von Mustern des gesamten Produktionslaufs. Darüber hinaus bietet die übergreifende Anwendung von Produktionsplanung und Qualitätsmanagement zusätzliche Möglichkeiten, die Produktion sowohl wirtschaftlicher als auch umweltverträglicher zu gestalten.

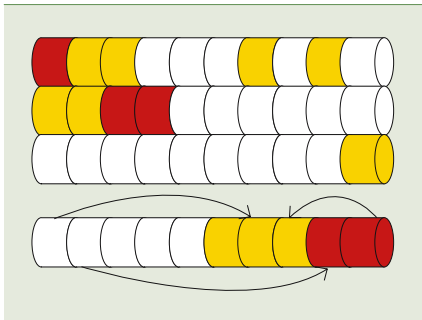
#### Ein anschauliches Beispiel

Im Folgenden soll ein vereinfachtes Beispiel dargestellt werden, das auf einem Zuschnittsatz mit den Rollenbreiten aus Tabelle 1 basiert.

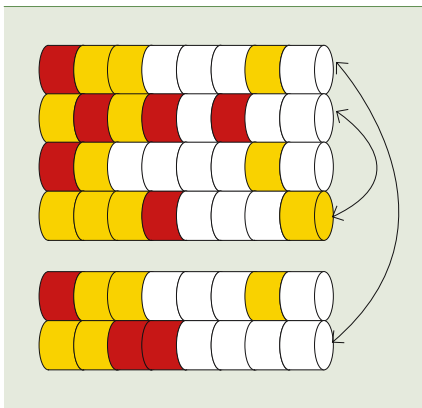
Die Jumbo-Rolle in diesem Beispiel hat eine Breite von 8.000 mm. Die Summe der zu schneidenden Rollenbreiten beträgt 7.915 mm, woraus sich ein Verschnitt von 85 mm ergibt. Für jede Rolle sollen genau die gleichen Qualitätsanforderungen gelten. Somit lässt sich das Beispiel vereinfachen, indem die Jumbo-Rolle direkt in verschiedene Qualitätsbereiche eingeteilt wird. Erstreckt sich eine Rolle über mehrere Qualitätsbereiche, wird sie entsprechend der schlechtesten Qualität bewertet. Zur Verdeutlichung ist in 6a eine Qualitätsverteilung mit den

#### 5 Optimierungsansätze

##### a Anpassung eines Satzes



##### b Änderung der Satzreihenfolge



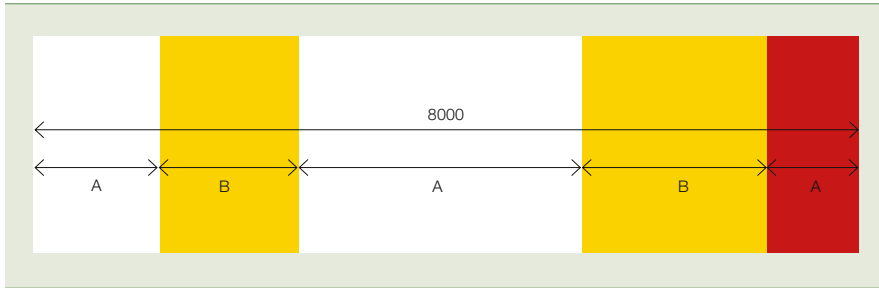
Fertige Papierrollen vor der Verpackung.



## Sensorik & Regelung

### 6 Qualitätsbestimmung der Jumbo-Rolle

#### a Das Problem



#### b Der resultierende Zuschnittsatz (Qualität: A = weiß, B = gelb, C = rot)

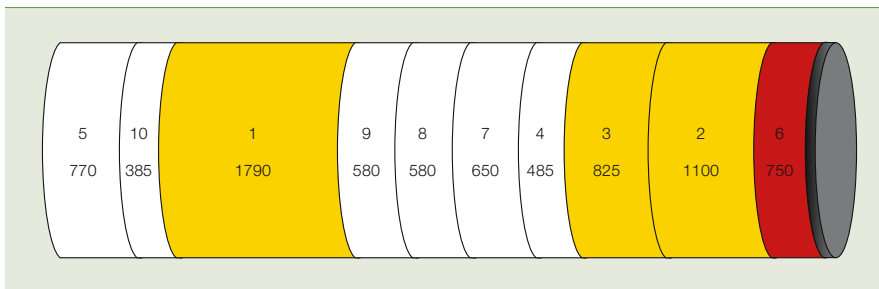


Tabelle 1 Daten für das obige Beispiel (Rollenbreiten)

Rolle	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Breite (mm)	1790	1100	825	485	770	750	650	580	580	385

Klassen A, B und C dargestellt. Für die hier beschriebenen Optimierungsprobleme wird der Wert jeder Rolle auf Grundlage folgender Angaben berechnet: Satzlänge = 5.896 m, Papiergewicht = 80 g/m<sup>2</sup>, Preis = 500 €/t, A-Qualität (volle Qualität) = 100% des Preises, B-Qualität (geringe Fehler) = 70% des Preises und C-Qualität (abgewiesen) = 0% des Preises.

#### Legende

$x_{d_{rj}}$	= 1 wenn Rolle $r$ am Rasterpunkt $j$ beginnt
$c_{rj}$	= Wert der Rolle $r$ am Rasterpunkt $j$
$x_{r_n}$	= 1 wenn Rolle $r$ dem Abschnitt $n$ zugeordnet ist
$x_{r_s}$	= 1 wenn Rolle $r$ im Bereich $s$ liegt
$r_r^{start}$	= linke Kante der Rolle $r$
$W_r$	= Breite der Rolle $r$
$W_n^B$	= Beginn (linke Kante) von Abschnitt $n$
$W_n^E$	= Ende (rechte Kante) von Abschnitt $n$
$S_s^B$	= Beginn (linke Kante) von Qualitätsbereich $s$
$S_s^E$	= Ende (rechte Kante) von Qualitätsbereich $s$

Würden die Rollen ohne jede Optimierung wie in Tabelle 1 vorgegeben im Satz angeordnet, ergäbe sich ein Gesamtertrag von 1.236 €. Der qualitätsbasierte Zuschnittalgorithmus liefert einen Ertrag von 1.427 €<sup>[6b]</sup>, was einer Verbesserung von rund 15% entspricht. Die Effizienz der Optimierung lässt sich noch besser abstimmen, wobei stets ein Kompromiss zwischen Lösungsqualität und Effizienz erforderlich ist. Doch die kombinierte Strategie liefert ein gutes Ergebnis in einer annehmbaren Zeit.

#### Weniger Abfall

Die beschriebene Lösung beseitigt keine Qualitätsprobleme, sondern minimiert ihre Auswirkungen, indem sie dafür sorgt, dass sich die Planung stets auf die rentabelste Möglichkeit richtet und die aktuelle Qualität bestmöglich genutzt wird. Außerdem kann sich eine Steigerung des Qualitätsbewusstseins positiv auf die gesamte Planungskultur auswirken und somit zur Stärkung der Fähigkeit zur Identifizierung und Analyse der Produktivi-

tät im Hinblick auf die Qualität beitragen.

Weniger Qualitätsverluste bedeuten:

- kürzere Produktionszeiten
- weniger Recycling aussortierter Rollen
- geringerer Energie- und Rohstoffbedarf
- bessere Erfüllung der kundenseitigen Qualitätsanforderungen
- zuverlässigere Lieferzeiten
- geringere Umweltbelastung
- niedrigere Gesamtproduktionskosten
- weniger Qualitätsbeanstandungen
- höhere Kundenzufriedenheit

Dies mag trivial klingen, doch die vorgeschlagene Lösung trägt dazu bei, dass diese Überlegungen in die täglichen Standardabläufe integriert werden können.

#### Iiro Harjunkoski

ABB Corporate Research  
Ladenburg, Deutschland  
iiro.harjunkoski@de.abb.com

#### Simo Säynevirta

ABB Process Industries  
Helsinki, Finnland  
simo.saynevirta@fi.abb.com

#### Fußnote

<sup>1)</sup> Das Rucksackproblem ist eine kombinatorische Optimierungsaufgabe mit dem Ziel, eine Teilmenge aus einer bestimmten Menge von Objekten zu bestimmen, sodass die Summe ihrer Werte so nah wie möglich an einer gegebenen Grenze liegt, ohne sie zu überschreiten. Der Name bezieht sich auf ein Beispiel, bei dem so viele Objekte wie möglich in einen Rucksack mit begrenzter Größe gepackt werden sollen.