


Erfolgreiche Navigation durch unbekanntes Terrain

Bewältigung von beweglichen Engpässen in der diskreten Fertigung

Antonio Gonzalez, Luis G. Nebra, David Sanz, Krzysztof Sowa-Piekkó



«Zeit ist Geld» – ist ein häufig gehörter Satz, der in jedem Fall auf Produktionsketten zutrifft. Ein schneller Durchsatz bedeutet nicht nur kurze Lieferzeiten, sondern auch eine hohe Produktivität, da Ressourcen schneller freigesetzt werden. Analog zu einer Sanduhr, bei der die Einschnürung den Sandfluss hemmt, wirkt sich auch bei einer Produktionskette der langsamste Abschnitt hemmend auf den Gesamtdurchsatz aus. Und so wie die Sanduhr nicht ohne Sand funktioniert, wird auch der Fluss der Produktionskette unnötig verlangsamt, wenn die Kapazität am Engpass nicht vollständig genutzt wird. Zwar gibt es Strategien, um dies zu verhindern, doch bei den meisten stellt ein einziger Produktionsschritt den Engpass dar. Was ist aber, wenn sich der Engpass aufgrund der Variabilität der Produkte zwischen mehreren Produktionsabschnitten hin- und her bewegt?

Zur Optimierung der Betriebs- und Ablaufplanung der Produktionskette im ABB-Transformatorwerk im spanischen Saragossa wurde das Planungstool DIVINER 3.0 entwickelt, das dabei hilft, solche beweglichen Engpässe zu bewältigen. Das Tool prognostiziert die zukünftige Entwicklung innerhalb der Produktionskette auf der Basis der Auftragsrückstände und bietet so die Möglichkeit, Veränderungen vorzusehen anstatt nur darauf zu reagieren.

Bedarfsgesteuerte Fertigung

Werden an einer Fertigungslinie kundenspezifische Produktvarianten hergestellt, wird die effiziente Bewältigung von Engpässen innerhalb der Produktionskette immer schwieriger, wenn die Engpässe nicht nur an ein und derselben Stelle auftreten, sondern von einem Prozessabschnitt zum nächsten «wandern». Das daraus resultierende Regelungsproblem lässt sich aufgrund der Dynamik nur schwer auf effiziente Weise lösen. Durch die Umformulierung des dynamischen Problems in eine Folge von festen Engpasslösungen ist es ABB gelungen, die Leistung ihres Transformatorenwerks im spanischen Saragossa deutlich zu verbessern.

Die Bedeutung einer präzisen Ablaufplanung

Eine geeignete Strategie zur präzisen Ablaufplanung der gesamten Produktionskette hat zum Ziel, den gesamten Workflow von den Zulieferern über die Hersteller bis hin zu den Großhändlern zu synchronisieren. Nur so kann dem Endkunden ein genaues und verlässliches Lieferdatum genannt werden.

Eine optimierte Ablaufplanung liefert nicht nur genaue Endtermine für jede Produktionsphase, sondern nutzt diese dazu, den Fluss entlang der gesamten Kette zu straffen.

So einfach ist das nicht

Die diskrete Fertigung ist ein weites Feld, in dem sich die Anforderungen je nach Branche stark voneinander unterscheiden. Diese reichen von der Massenfertigung von Konsumgütern mit einer große Menge identischer Produkte bis hin zum Schiffbau, bei dem selten zwei identische „Produkte“ gefertigt werden. Im ABB-Werk in Saragossa findet sich eine Mischung aus beiden Konzepten, was zu einer hybriden Produktionsumgebung führt. Die diskrete Fertigung lässt sich grob in zwei Kategorien unterteilen:

- **Massenfertigung (Lagerfertigung):** Hohe Effizienz und niedrige Kosten sind hierbei ein «Muss». Die Lagerfertigung entkoppelt den Rhythmus der Produktion von den Schwankungen des Marktes. Dies gilt besonders für Konsumgüter, bei denen der Kunde eine sehr kurze Vorlaufzeit von der Bestellung bis zur Lieferung erwartet. Die Produktionsvolumen

sind normalerweise sehr groß, mit langen Serien desselben Produkts und kurzen Zykluszeiten. Aufgrund der Gleichförmigkeit der Produktion taucht der Engpass immer an derselben Stelle auf. Diese hohe Vorhersehbarkeit spiegelt sich in der Optimierungsstrategie wider. Eine wichtige Voraussetzung für diese Art der Herstellung ist eine *schlanke* Produktionskette (besonders für die europäischen Märkte). Die verbleibenden Unregelmäßigkeiten (natürliche Zufallsfaktoren wie Qualitätsschwankungen, Maschinen- und krankheitsbedingte Ausfälle, Krankheit, Verspätungen usw.) lassen sich mit relativ kleinen Puffern auffangen.

- **Kundenspezifische Fertigung (Auftragsfertigung):** Die Produkte werden auf Bestellung entworfen und gefertigt, was zwangsläufig eine gewisse Variabilität mit sich bringt. Neben der allgegenwärtigen, nicht-deterministischen Variabilität, von der auch die Massenfertigung betroffen ist, führen individuelle Kundenspezifikationen zu weiteren Unregelmäßigkeiten. Die Engpässe und die Zykluszeiten in der Produktion sind auftragsabhängig und daher veränderlich. Wichtig für den Erfolg dieser Produktionsstrategie auf dem Markt ist eine *agile* Produktionskette.

Die Frage ist, ob sich diese beiden Strategien erfolgreich kombinieren lassen, um die Variabilität der Auftrags-

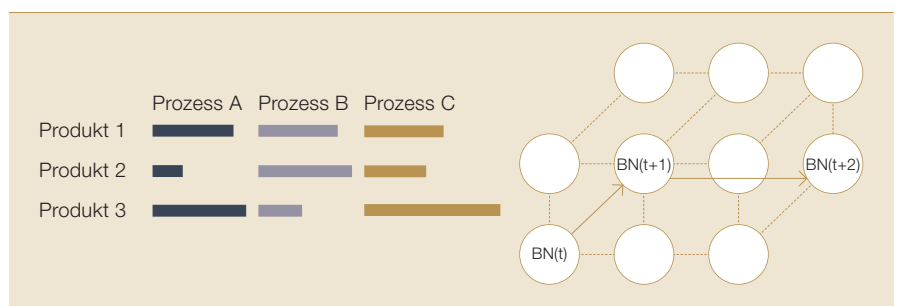
fertigung auf die der Massenproduktion zu reduzieren. Mit anderen Worten, kann eine Produktionskette sowohl agil als auch schlank sein?

Bei der Beantwortung dieser Frage hilft ein Modell zum Management komplexer, hoch variabler Umgebungen unter Verwendung der Theory of Constraints (TOC, siehe **Infobox** auf der nächsten Seite). Die Erfahrung zeigt, dass es in jedem Prozess mit voneinander abhängigen Ereignissen einen Punkt gibt, an dem der Durchsatz am niedrigsten ist. Dieser Engpass bestimmt die Produktionsrate des gesamten Prozesses. Befindet sich der Engpass an einer festen Stelle, kann er als Regelungspunkt verwendet werden. In diesem Fall bleiben die Regeln und Verknüpfungen zwischen Prozessen konstant. Beispiele für diese Art der Regelungsphilosophie sind *CONWIP*¹⁾ und *CONLOAD*²⁾. In diesem Fall wird der Fluss im System durch so genannte *Pull-Signale*³⁾ (typischerweise in Form von Begleitkarten) geregelt.

All diese Ansätze gehen von einem festen Engpass aus. Da das Problem der beweglichen Engpässe aus der Sicht der traditionellen Fertigungstechnik noch unerforschtes Terrain ist, erfordert die Suche nach einer Lösung einen neuartigen Denkansatz.

Ein bedeutender Unterschied zwischen der *Lagerfertigung* und der *Auftragsfertigung* besteht darin, dass aufgrund

- 1 Auftragsfertigungsumgebung mit mehreren Projekten und beweglichem Engpass infolge von Variabilität beim Produkt und innerhalb des Prozesses



Fußnoten

- ¹⁾ CONWIP (CONstant Work In Progress) ist eine Planungsstrategie für Fertigungslinien, bei der ein neuer Job aufgenommen werden darf, sobald ein älterer die Linie verlässt. Oder allgemeiner: die Anzahl der laufenden Jobs wird unter einem bestimmten Schwellwert gehalten.
- ²⁾ CONLOAD (CONstant LOAD) ist eine Verfeinerung von CONWIP, die zusätzlich die Verarbeitungszeiten berücksichtigt.
- ³⁾ Ein Pull-Signal ist ein Signal, das den Ersatz für eine verbrauchte Ressource anfordert.

kundenspezifischer Varianten, die sich durch unterschiedliche Zykluszeiten auszeichnen, eine «Standardproduktion» bei der Auftragsfertigung häufig nicht möglich ist.

In einer solchen von mehreren gleichzeitigen Projekten bestimmten Produk-

tionsumgebung, in der eine große Anzahl verschiedener Einheiten hergestellt wird, ist bei entsprechender Variabilität der Produkte eine Verschiebung des Engpasses sehr wahrscheinlich. Dies ist auch im ABB-Werk in Saragossa der Fall **1**.

Steuerung der Produktionskette mit TOC

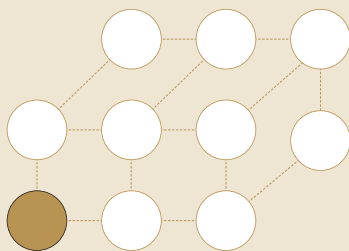
In jedem aus mehreren Prozessen bestehenden System gibt es einen Prozess mit der kleinsten Kapazität. Dies ist der langsamste Prozess mit der längsten Zykluszeit.



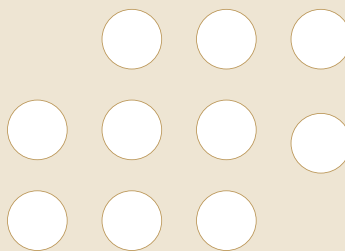
Der langsamste Prozess (Px) bestimmt den Durchsatz des Gesamtsystems und gibt den Taktzyklus am Ende der Kette vor. Px ist der Engpass, der als Beschränkung (Constraint) auf den gesamten Fluss wirkt.

Die von Eliyahu Goldratt entwickelte Theory of Constraints (TOC) konzentriert die Steuerung des Systems auf den Engpass. Da der Durchsatz durch den langsamsten Prozess begrenzt wird, sollten sich die anderen Prozesse nach diesem Engpass richten, um unwirtschaftliche Lagerbestände zwischen den Prozessabschnitten zu verhindern. Mit anderen Worten, der Engpass ist der dominierende Prozess im gesamten System.

Die Abhängigkeiten zwischen Px und den anderen Prozessen werden verwendet, um das gesamte System nur durch Einflussnahme auf Px zu steuern. Es ist wesentlich einfacher, das gesamte System über einen einzigen Punkt zu steuern als sich mit einem komplizierten Gefüge mit vielen Freiheitsgraden befassen zu müssen.



Ein Punkt zur Steuerung des Systems



Mehr als ein Punkt zur Steuerung erforderlich

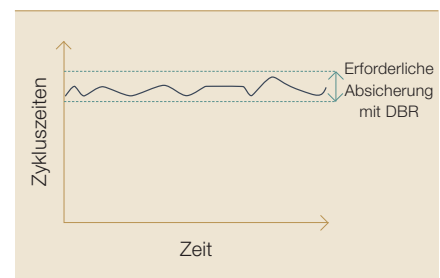
Daraus ergeben sich fünf Schritte zur Steuerung der Kette für einen bestmöglichen Betrieb:

1. Identifizieren des Engpasses (EP) im System
2. Entscheiden, wie er genutzt werden kann
3. Die anderen Prozesse dem EP unterordnen
4. Versuchen, den EP zu entfernen
5. Nach Entfernung des EP wieder mit Schritt 1 beginnen

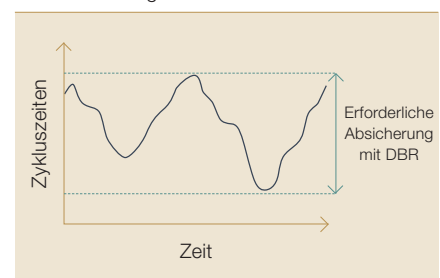
Px wird durch unmittelbar vorgelagerte Puffer abgesichert, die eine Unterversorgung des Engpasses verhindern. Wird Px gestoppt, reduziert sich automatisch auch der Durchsatz, sodass alle weiteren Puffer unnötig sind. Auf gleiche Weise werden in einer Projektmanagement-Strategie die Prozesse entlang der kritischen Kette durch (Zeit-)Puffer abgesichert.

Eine Möglichkeit, die Verschiebung des Engpasses zu verhindern, ist die Überdimensionierung jedes Prozesses. Dies wird auch als *Sicherungskapazität* bezeichnet und ist eine einfache, aber kostenintensive Möglichkeit, dynamische Engpässe in feste Engpässe umzuwandeln und somit einen festen Regelungspunkt zu erhalten. Dieser Ansatz ist jedoch mit unnötig großen Investitionen verbunden. Eine Sicherungskapazität wirkt zwar als Puffer gegen Schwankungen, doch wie bei jeder Art der Lagerhaltung haben Überkapazitäten nicht nur Vorteile. Zunächst muss die optimale Dimensionierung (und Erschwinglichkeit) der Sicherungskapazität bestimmt werden.

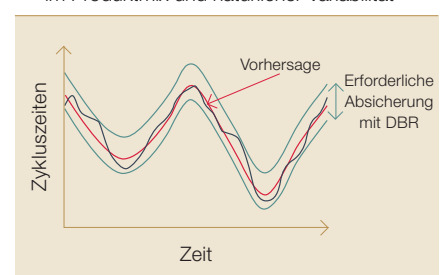
- 2** Erforderliche Absicherung mit DBR für Standardprozesse mit natürlicher Variabilität



- 3** Erforderliche Absicherung mit DBR für Auftragsfertigungsprozesse mit Veränderungen im Produktmix



- 4** Erforderliche Absicherung mit Diviner für Auftragsfertigungsprozesse mit Veränderungen im Produktmix und natürlicher Variabilität



Bedarfsgesteuerte Fertigung

Die Größe der Sicherungskapazität hängt von der Variabilität des Prozesses ab. Je größer die Variabilität, desto mehr Überkapazität wird benötigt. Ein Hersteller, der *Auftragsfertigung* betreibt und eine Regelungsstrategie nach dem Prinzip der *Lagerfertigung* einführen möchte, kann diesen Weg gehen. Abhängig von den Kundenspezifikationen können einige Prozesse durch ein Produkt überlastet werden, während andere Prozesse mit einem anderen Produkt noch Kapazitäten frei haben.

Grundsätzlich wird durch überdimensionierte Puffer die Abhängigkeit der Teilprozesse untereinander verringert. Bei einigen Unternehmen entspricht die durchschnittliche Zykluszeit der Prozesse in etwa ihrer Standardabweichung. Der Korrelationskoeffizient zwischen den Prozessen liegt bei 0,3 bis 0,4. Das zeigt, dass die Prozesse innerhalb des Systems nahezu unabhängig sind. In solchen Fällen ist eine riesige Sicherungskapazität nötig, um den Engpass an derselben Stelle zu halten (mehr als 25 % der perfekt ausgeglichenen Kapazität). Soweit die bittere Wahrheit, doch gibt es noch eine andere Lösung.

Diese Lösung nutzt die Tatsache, dass die Variabilität nicht ganz zufällig auftritt. Bei einer Fabrik, die *Auftragsfertigung* betreibt, können die Auftragsrückstände als Planungsdaten verwendet werden. Auf diese Weise lässt sich die Sicherungskapazität in ihre zwei Bestandteile, die Grundkapazität für die *Lagerfertigung* **2** und die zusätzliche Kapazität für die *Auftragsfertigung* **3** aufgrund der Variabilität der Kundenspezifikationen **3** aufteilen.

Ein wichtiges Kriterium auf dem europäischen Markt ist der Preis, weswegen

es sich lohnt, die Sicherungskapazität zu reduzieren. Doch kann dies in einem solchen Umfeld sicher realisiert werden?

Fortschrittliche Regelung mit DIVINER 3.0

Die Pull-Methoden auf der Basis einer festen Engpassstrategie (z. B. CONWIP oder CONLOAD) lassen sich mit einem typischen Regelungsschema vergleichen. Da die Pull-Regelung auf diskrete Ereignisse reagiert (ein Teil wird hergestellt, ein Puffer wird gefüllt bzw. entleert usw.), errechnet sich die Rückkopplung des Systems aus dem Signal des vorherigen Schrittes. Die entsprechende Analogie ist in **5** dargestellt.

Da sich die Variabilität der Zykluszeiten teilweise im Voraus untersuchen lässt, sobald die Spezifikation des Kunden bekannt ist, können diese Daten verwendet werden, um das Verhalten des Systems vorherzusagen. Eine solche Strategie arbeitet proaktiv statt reaktiv. Da der Engpass von den Kundenspezifikationen abhängt, lassen sich die Zykluszeiten der rückständigen Aufträge berechnen und die Lage des Engpasses kann vorhergesagt werden. Die *Simulation von Systemen mit diskreten Ereignissen* ist die Grundlage für ein Tool, mit dem sich das Verhalten des Systems vorhersagen lässt. Ein davon abgeleitetes mögliches Regelungsschema ist in **6** dargestellt.

Diese Strategie ist die Grundlage für eine *prädictive Regelung* in der Produktion. Dabei wird ein beweglicher Engpass behandelt, indem versucht wird zu handeln, bevor es zu Ereignissen kommt. Wenn der Engpass sich in Prozess A befindet, man aber weiß, dass er sich zu Prozess B bewegen wird, kann Prozess

B weiterhin mit hoher Leistung arbeiten, um dem zukünftigen Engpass so gut wie möglich vorzubeugen. Eine solche Philosophie zur Pufferverwaltung berücksichtigt nicht nur aktuelle sondern auch zukünftige Engpässe. Entsprechende Lösungen lassen sich durch eine *prädictive Regelung* analog zu der fortschrittlicher Automatisierungssysteme erreichen, die eine Vorwärtsregelung mit Rückkopplungsinformationen kombinieren.

Dieser Ansatz ermöglicht eine Minimierung der Kosten, denn:

- Das Regelungssystem ist *proaktiv* statt reaktiv (wie beim DBR-Prinzip)⁴⁾, d. h. Gegenmaßnahmen werden getroffen, bevor Probleme auftreten. Dadurch fallen mögliche Eingriffe weniger kostenintensiv aus.
- Die *Sicherungskapazität* kann reduziert werden, sodass sich der Engpass bewegen kann, was zusätzlich die Mehrkosten senkt.

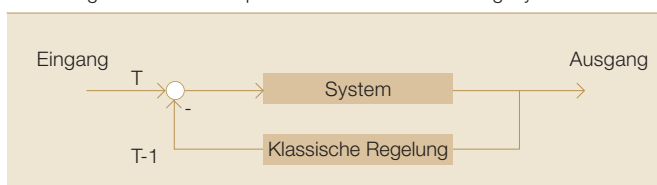
Diviner 3.0 analysiert die aus dem Produktmix der Auftragsrückstände resultierende Variabilität und optimiert anhand dieser Daten durch Simulation diskreter Ereignisse das zukünftige Verhalten des Systems. Die Toleranzen der Puffer werden auf das Minimum



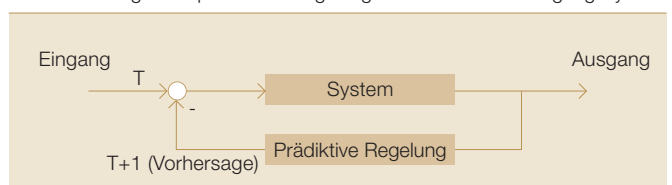
Fußnote

⁴⁾ DBR (Drum-Buffer-Rope) ist ein Begriff für die Anwendung der TOC auf die Ablaufplanung. Die «Drum» (Trommel) entspricht dem Engpass, der über das «Rope» (Seil) Arbeit in das System ziehen kann und somit die Lagerbestände niedrig hält. Es gibt nur einen Staubereich, den überwachten Puffer (Buffer) vor dem Engpass, der ihn gegen negative Einwirkungen wie unzuverlässige Lieferanten, Personalausfall und spätere Kundenforderungen absichert.

5 Analogie des Pull-Prinzips zu einem Automatisierungssystem



6 Anwendung eines proaktiven Regelungsmodells auf ein Fertigungssystem



reduziert, sodass sie das System (nur) noch gegen die natürliche Variabilität der normalen Massenfertigung absichern **4**. Die daraus resultierende Sicherungskapazität ist geringer, als mit dem DBR-Prinzip zu erwarten wäre.

Die Theorie klingt äußerst vielversprechend. Doch viele verlockende Theorien liefern in der Praxis keine brauchbaren Resultate, weil sie sich nicht auf reale Produktionsumgebungen anwenden lassen. Das Beste an dieser Theorie ist jedoch, dass ihre Anwendbarkeit seit Beginn des Projekts im Jahr 1999 durch eine Steigerung der Linienleistung im Werk in Saragossa untermauert wird.

Erfolg auf ganzer Linie

Die Ergebnisse der Anwendung dieser Strategie lassen sich am besten durch einen Blick auf die aussagekräftigsten Leistungsindikatoren (Key Performance Indicators, KPIs) beurteilen:

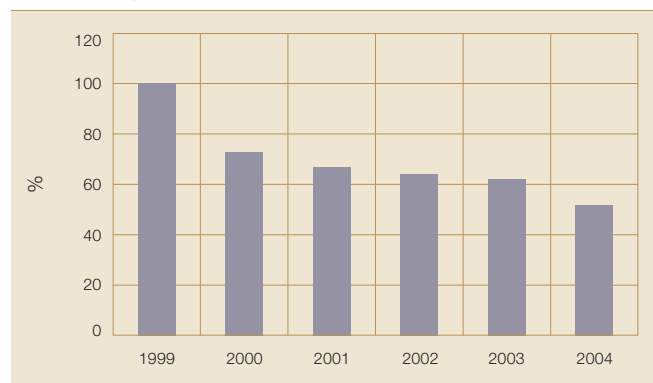
Das Werk in Saragossa konnte seine Gesamtdurchlaufzeit (TTPT)⁵⁾ vom Auftrag bis zum Versand nahezu halbieren (Verkürzung um 48 % gegenüber dem Wert von 1999) **7**.

Die Durchlaufzeit (TPT)⁵⁾ der Produktion wurde sogar auf 29% des Werts von 1999 verkürzt **8**. Die Liefertreue für Transformatoren beträgt heute 96% gegenüber 70% im Jahr 1999 **9**. Das Produktionsvolumen des Werks ist seit 1999 um 245 % gestiegen.

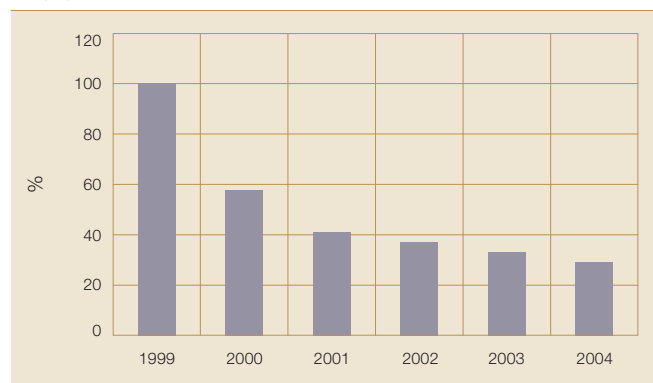
Umwandlung der Produktion

Die wichtigste und wahrscheinlich grundlegendste Erkenntnis für das Team im Werk in Saragossa ist, keine Angst vor dem Unbekannten zu haben,

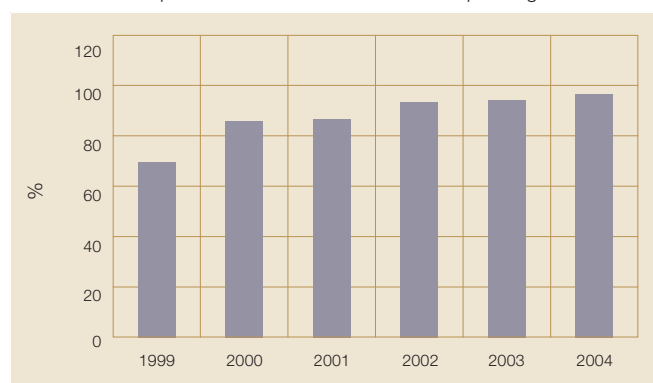
7 Verkürzung der Gesamtdurchlaufzeit (TTPT) um nahezu die Hälfte



8 Verkürzung der Durchlaufzeit (TPT) der Produktion auf 29 % gegenüber dem Wert von 1999



9 Höhere Liefertreue durch bessere Ablaufplanung



wenn Veränderungen notwendig sind. Vielmehr sind Mut und Phantasie gefragt, wenn es darum geht, unbekanntes Terrain zu betreten.

Übliche Verfahrensweisen in Frage zu stellen und neue Wege zu gehen – und manchmal sogar scheinbare theoretische Grenzen zu überschreiten – ist das beste Mittel, um Verbesserungen zu erreichen. So wird das Bewusstsein für eine kontinuierliche Verbesserung gefördert und Beharrlichkeit mit besseren Lösungen

und einer erweiterten Kompetenz belohnt.

Das Team in Saragossa stand vor der großen Herausforderung, die Wettbewerbsfähigkeit des Unternehmens in einem sehr komplexen Umfeld zu sichern. Dabei gelang es ihm, Grenzen zu überwinden, die bis dahin als absolut galten.

Diese Ergebnisse haben nicht nur gezeigt, dass es möglich ist, eine Produktionskette mit beweglichem Engpass zu steuern, sondern auch, dass dies die richtige Methode ist, um Produktionssysteme mit hoher Variabilität zu beherrschen und gleichzeitig die Kosten durch Reduzierung der Sicherungskapazitäten niedrig (d. h. agil und schlank) zu halten.

Diese Leistung wurde 2005 mit den beiden renommiertesten spanischen Logistik-Innovationspreisen ausgezeichnet, dem Pilot Award und dem CEL Award (verliehen durch das Spanish Logistics Centre, dem spanischen Mitglied der European Logistics Association). Das ABB-Werk in Saragossa genießt einen sehr guten Ruf bei seinen Kunden. Der Grund hierfür liegt in einer Kombination aus einem kundenorientierten Ansatz, dem Willen zur ständigen Verbesserung und der Offenheit für innovative Lösungen zur Ablaufplanung der Produktionskette.

Antonio Gonzalez

Luis G. Nebra

David Sanz

ABB Power Technology, S.A.

Saragossa, Spanien

antonio.j.gonzalez@es.abb.com

luis.garcia@es.abb.com

david.sanz@es.abb.com

Krzysztof Sowa-Pieklo

ABB Corporate Research

Krakau, Polen

krzysztof.sowa-pieklo@pl.abb.com

Fußnote

⁵⁾ Siehe Glossar auf Seite 74.