

# Beer Distribution Game - Erfolgreich dank Regelungstechnik

Steinegger, Rolf Dipl. Ing. ETH; Barbey, Hans-Peter Prof. Dr.-Ing.

Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, Fachhochschule Bielefeld

*rolf.steinegger@zhaw.ch*

Das Beer Distribution Game BDG kann als eine einfache Simulation zur Veranschaulichung zentraler Herausforderungen im Supply Chain Management SCM gelesen werden: Peitscheneffekt und Aufschaukelung von Bestelländerungen. Wie werden maximaler Gewinn und adäquate Lieferfähigkeit erreicht? Mit einem PID-Regler, basierend auf den üblichen Beschaffungsstrategien aus der Logistik (Bestellpunktverfahren und Bestellrhythmusverfahren) und dem SCM. Der Proportional- und der Integralanteil führen die Sicherheitsbestände und Bestellmengen dem Inputsignal nach. Der Differentialanteil sorgt dafür, dass die Lager weder leer laufen noch überlaufen, d.h. rasch den sich änderen Kundenbestellungen nachgeführt werden.

Die Regleroptimierung erfolgt experimentell mittels Simulationsläufen. Die üblichen Anforderungen an das Führungsverhalten werden erfüllt: Stabilität, Genauigkeit, Schnelligkeit und Dämpfung, Robustheit. Die Ziele werden für alle Charakteristiken von Kundenbestellreihen zuverlässig und nahe dem theoretischen Optimum erreicht: Konstanz, Schwankung um Mittelwert und Trends. Der Bullwhip-Effekt lässt sich in Beschaffungsketten mit zeitlichen Verzögerungen und variablen Kundenbestellmengenreihen nicht grundsätzlich vermeiden, sondern nur kontrollieren.

Die Wirksamkeit systemischer Eingriffe bestätigt das Systems Engineering: 1. Veränderung der Anzahl Elemente im System (Verkürzung der Lieferkette), 2. Reduktion der Verzögerungseffekte (Verkürzung von Lieferzeiten) und 3. durchgängiger Informationsfluss (SCM). Die Betrachtung von Lager- und Transportkosten ergibt eine weitere Möglichkeit zur Optimierung des Reglers.

Keywords: Beer Distribution Game, Bullwhip-Effekt, Supply Chain Management, Bestellpunktverfahren, Bestellrhythmusverfahren, PID-Regler, Regelungstechnik.

## 1 Das Beer Distribution Game

### 1.1 Der Bullwhip-Effekt in der Beschaffungskette

Kennen Sie das "Beer Distribution Game" (BDG)? Spielregeln und -verlauf sind unter Logistikern und Systemtheoretikern bekannt. Die Phänomene, die sich damit so eindrücklich zeigen lassen, gehören zum "mainstream der Logistik" (Werner 2008 u.a.) [1]: Peitscheneffekt, Aufschaukelung und die Auslieferung der Spieler an ein an sich einfaches System, das sich aber nicht ohne Weiteres beherrschen lässt. Das BDG ist also eine Simulation zur Anschauung zentraler Herausforderungen in der Beschaffungslogistik.

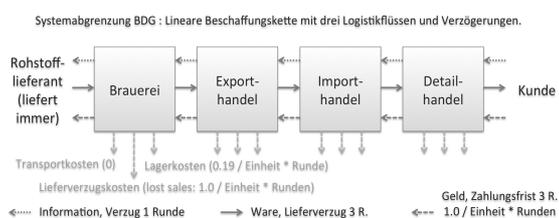


Abbildung 1. BDG: System und Logistik.

Das Spiel basiert auf den Arbeiten von Forrester (1958 / 1975) [2].

### 1.2 BDG - more than a game?

Aber kennen Sie auch die Lösung des Problems? Können Sie einem unbelasteten Anfänger einen Algorithmus erklären, mit dem er oder sie erfolgreich spielt? Ziele sind ja bekanntlich, dass die gesamte Lieferkette "automatisch" in die Gewinnzone kommt, dass der Gewinn der gesamten Lieferkette möglichst hoch wird und dass der Peitscheneffekt vermieden wird. Damit ist auch impliziert, dass die Lieferfähigkeit hoch ist, denn Lieferrückstände werden mit einem Malus bestraft. Diese Fragestellung fokussiert

auf die Lösung(en) statt auf die Probleme – diese können als bekannt vorausgesetzt werden.

### 1.3 Erkenntnisse

1) Es ist möglich, einen oder mehrere geeignete Algorithmen zu beschreiben, mit denen eine Bestellmenge (und weitere Bestellparameter) berechnet werden, so dass der Erfolg im Spiel kontrolliert werden kann.

2) Lösungsalgorithmen sind möglich für Kundenbestellungen, welche um einen Mittelwert schwanken - wie auch für Kundenbestellungen, welche Trends unterliegen (Boom und Baisse).

3) Es lässt sich abschätzen, wie hoch der Gewinn im Spiel maximal sein kann. Die gefundenen Lösungs-Algorithmen lassen sich damit vergleichen. Die Algorithmen lassen sich untereinander vergleichen und bestimmten Anwendungsfällen (Vergleich von Modell und Realität) zuordnen.

4) Der Peitscheneffekt lässt sich in Beschaffungsketten mit zeitlichen Verzögerungen und variablen Kundenbestimmengereihen nicht grundsätzlich vermeiden, sondern nur kontrollieren.

5) Es lässt sich eine Rangfolge bestimmen für die Wirksamkeit systemischer Eingriffe - Beispiele sind die Veränderung der Anzahl Elemente im System, die Verkürzung von Lieferzeiten etc.

6) Es lassen sich konkrete Gemeinsamkeiten und Unterschiede von Modell und Realität beschreiben.

## 2 Erfolgreiche Spielstrategien

### 2.1 "Order in - order out"

Wenn die Kundenbestellungen um einen Mittelwert (7) schwanken, ist es im BDG am einfachsten und erfolgreichsten, jeweils in jeder Runde dieselbe Menge nachzubestellen, wie gerade abverkauft wird. Damit kann sowohl finanzieller Erfolg erzielt werden wie auch eine ansprechende Lieferbereitschaft garantiert werden (z.B. Service Level 95 % und Gedeckter Anteil des Bedarfs 99 %), wenn das Lager in etwa doppelt so hoch gross ist wie die durchschnittliche Kundenbestellmenge (für Standardabweichung  $\sigma = 2.4$ ).

Eine Abschätzung mit der Black Box-Methode nach Haberfellner (2012) [3] zeigt, dass der experimentell ermittelte Gewinn pro Runde von 5.4 durchaus im Bereich des maximal möglichen liegt.

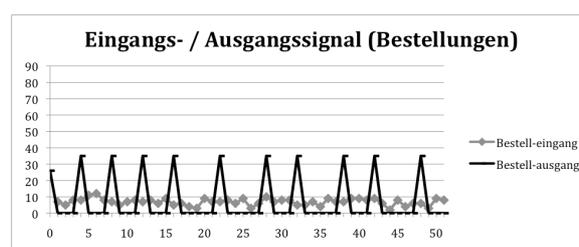
| Kosten- / Erfolgsfaktoren | Einheiten | Gewinn / Einheit | Erfolg     |
|---------------------------|-----------|------------------|------------|
| verkaufte Einheiten       | 7         | 1                | + 7        |
| Lager                     | 7         | - 0.19           | - 1.3      |
| Transport                 | 7         | 0                | 0          |
| Lieferverzug              | 0.1       | - 1              | - 0.1      |
| <b>Gewinn</b>             |           |                  | <b>5.6</b> |

**Tabelle 1.** Maximal möglicher Gewinn, ermittelt mit der Black-Box-Methode. Alle Angaben sind Durchschnittswerte pro Spielrunde bei Beschaffungsstrategie "order in - order out".

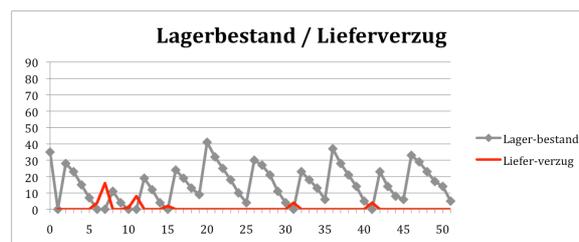
Werden auch Transportkosten berücksichtigt, so hängt die Wahl der erfolgreichsten Spielstrategie vom Verhältnis von Lager- und Transportkosten ab. Je nachdem werden die bekannten Beschaffungsstrategien aus der Logistik (Bestellpunktverfahren oder Bestellrhythmusverfahren) oder aber die order in - order out-Strategie bessere Resultat bringen.

### 2.2 Bestellpunkt- u. Bestellrhythmusverfahren

Die folgenden Grafiken zeigen beispielhaft das experimentell ermittelte Systemverhalten für das Bestellpunktverfahren bei verhältnismässig kleinen Bestellmengen. Dies ist eine verhältnismässig erfolgreiche Strategie. Allerdings ist der Gewinn deutlich kleiner als bei "order in - order out". Der Grund sind die hohen Lagerkosten (pro Einheit).



**Abbildung 2.** Das Ausgangssignal ist ein Abbild des variablen Bestellzyklus.



**Abbildung 3.** Der Lagerbestand zeigt die typische Kennlinie.

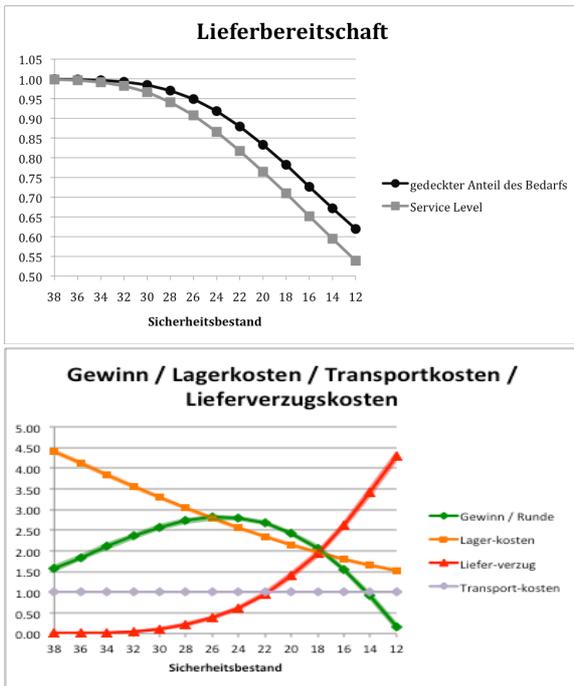


Abbildung 4. Lieferbereitschaft und Gewinn zeigen das Dilemma: Es ist nicht möglich, beide gleichzeitig zu optimieren.

### 2.3 PID-Regler zur Bewältigung von Trends

Wenn sich die Bestellungen zufällig entwickeln sind die Mitglieder der Lieferantenkette vor Probleme gestellt, für die es im Lehrbuch nicht ohne Weiteres eine einfache Anleitung gibt. Gomes/Probst (1999) [4] plädieren in solchen Fällen dafür, verwandte Systeme aus Wissenschaft und Technik für die Systemanalyse und zur Problemlösung beizuziehen.

Es wird eine Lösung aus der Regelungstechnik gezeigt, mit dem auch diese Herausforderung erfolgreich gemeistert wird. Ein solcher PID-Regler wurde erstmals von Dejonckheere (2003) [5] vorgeschlagen. Mann (2009) [6] bezeichnet "Regelung" als Vorgang, einen tatsächlichen Wert (sog. Istwert) mit einem gewünschten Wert (sog. Sollwert) fortlaufend zu vergleichen und den tatsächlichen Wert entsprechend zu korrigieren.

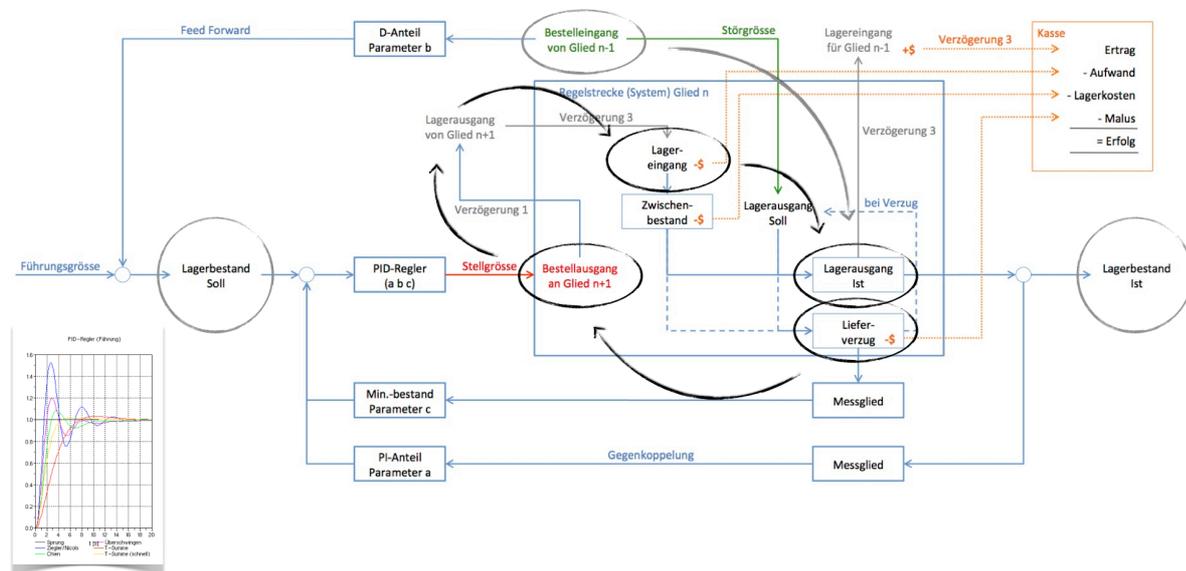


Abbildung 5. PID-Regler-Schema mit zentralem Wirkungskreis für ein Glied in der Beschaffungskette.

Der Proportional- und der Integralanteil führen die Sicherheitsbestände und Bestellmengen dem Inputsignal nach. Der Proportionalregler führt zu einer bleibenden Regelabweichung. Dies führt bei grösseren Störungen des Eingangsignals (Kundenbestellungen Boom) rasch zu leeren oder

übertollen Lagern. Das Beispiel zeigt eine Änderung der Bestellmenge durch den Kunden um +2. Es resultiert eine Lagerveränderung von  $-4 \cdot 2 = -8$ , wobei 4 die Verzögerung der Lieferung ist.

Der Integralregler korrigiert den Fehler. Er bringt das Ausgangssignal zum Schwingen oder – bei korrekter, d.h. gedämpfter Reglereinstellung asymptotisch zum Angleichen an das Eingangssignal (Parameter a).

Der Differentialanteil sorgt für Schnelligkeit und raschestmögliche Nachführung der Ist- an die Sollgröße, d.h. dass die Lager weder leer laufen noch überlaufen. Allerdings erhält das nachfolgende Glied der Lieferantkette ein stark überproportional vergrößertes Eingangssignal, was unerwünscht ist (Peitscheneffekt). Er wird deshalb ebenfalls durch einen Parameter (b) in der Wirkung eingeschränkt.

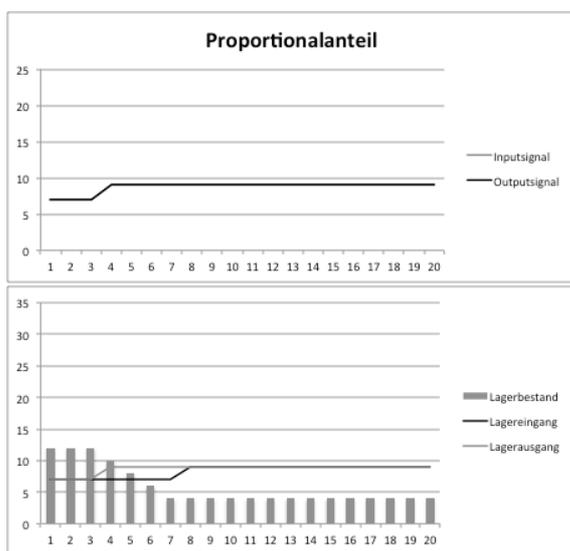


Abbildung 6. Proportionalregler mit bleibender Regelabweichung.

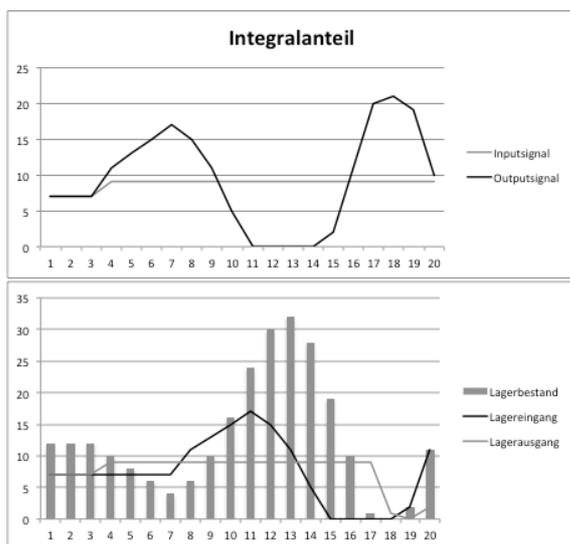


Abbildung 7. Integralregler: Fehlerkorrektur, resp. angeregter Schwingung (bei fehlender Dämpfung).

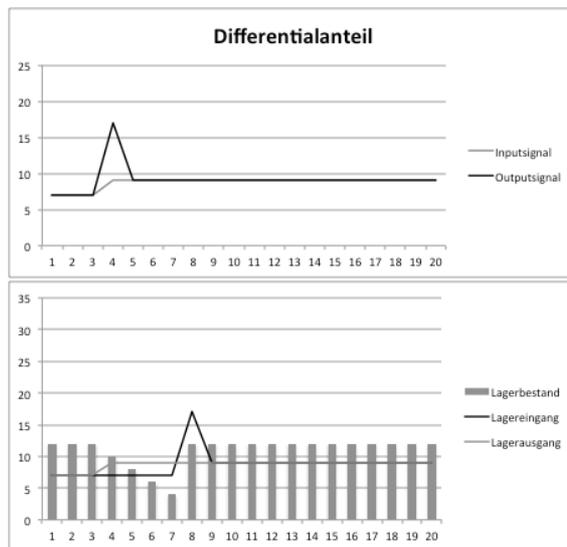


Abbildung 8. Differentialregler: Nachführung der Ist- an die Sollgröße.

Die mathematische Formulierung für die lautet:

$$A = P + I + D \quad (1)$$

$$A = B \cdot (1 - a) + (S - L + B) \cdot a + T \cdot \Delta B \cdot b \quad (2)$$

P = Proportional-Anteil

I = Integral-Anteil

D = Differential-Anteil

B = Kundenbestellung [Anzahl Waren-Einheiten]

S = Sicherheitsbestand [Anzahl Waren-Einheiten]

L = Lagerbestand [Anzahl Waren-Einheiten]

T = Lieferverzugszeit [Anzahl Spielrunden]

$\Delta B$  = Bestellmengenänderung gegenüber Vorrunde [Anzahl Waren-Einheiten]

A = Bestellausgang (Nachbestellung beim Lieferanten) [Anzahl Waren-Einheiten]

## 2.4 Reglereinstellung

Mit Hilfe der Tabellenkalkulation werden eine statistisch relevante Zahl an Simulationsläufen mit jeweils 5000 "Spielrunden" durchgeführt werden. Die Reglereinstellung umfasst die folgenden Schritte.

1. Optimierung des vordersten Gliedes in der Lieferantkette, d.h. Einstellung der Parameter anhand von Führungsverhalten und Sprungantwort.

Die "Störung" (= Änderung in der Kundenbestellung) soll einerseits schnellstmöglich nach hinten durchgereicht werden. Andererseits soll die Störung aber

auch rasch und ohne übermässiges Überschwingen abklingen, d.h. die Fläche zwischen Sollwert und Ist-Wert soll minimal sein (absolute Werte). Dies entspricht der allgemeinen Vorgehensweise zur Optimierung der Reglerparameter nach Mann (2009) [7].

Mit der Bedingung "kein Überschwingen" kann der Parameter a beschränkt werden (Integral-Glied). Mit der Anforderung "raschestmögliche Informationssweitergabe" kann der Parameter b (Differential-Glied) bestimmt werden.

2. Optimierung der weiteren Glieder in der Lieferantenkette (Reglereinstellung) und jeweils Überprüfung, ob die Einstellung der davor liegenden (kundennahen) Glieder damit noch sinnvoll korrespondiert.

3. Bestimmung der Sicherheitsbestände (Parameter c) auf der Basis von Simulationsläufen zur Minimierung der Lagerbestände und damit der Lagerkosten.

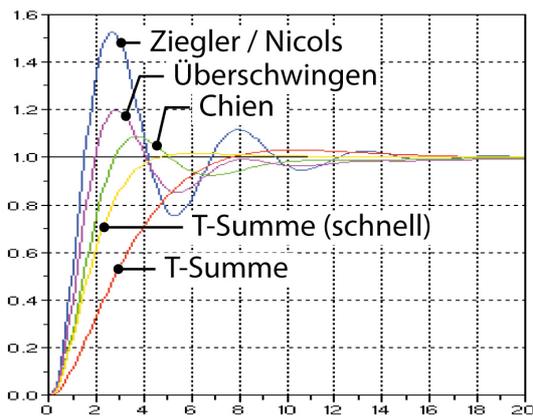


Abbildung 9. Verfahren zur Reglereinstellung und entsprechende Führungsverhalten (Wikipedia.org/ Einstellregeln.png, bearbeitet).

Die rasche, aber gemässigte (Über-)Reaktion auf Veränderungen der Kundenbestellungen macht den Unterschied zum Misserfolg – zusammen mit relativ hohen Sicherheitsbeständen. Diese beiden Einstellungen erlauben gleichzeitig Gewinne und hohe Lieferbereitschaft. Dies entspricht dem Verfahren der T-Summe oder der T-Summe (schnell).

| Parameter               | 1    | 2    | 3    | 4    |
|-------------------------|------|------|------|------|
| 1-a Proportional-Anteil | 0.84 | 0.89 | 0.92 | 0.93 |
| a Integral-Anteil       | 0.16 | 0.11 | 0.08 | 0.07 |
| b Differential-Anteil   | 0.50 | 0.10 | 0.00 | 0.00 |
| c Sicherheitsbestand    | 20   | 40   | 60   | 80   |

Tabelle 2. Die Reglerparameter a, b und c aus experimenteller Optimierung mittels Simulationsläufen für definierte Eingangssignale mit Trends für die vier Glieder der Beschaffungskette ( 1 = Detailhändler, 4 = Hersteller).

Das Eingangssignal basiert auf einer Veränderung pro Zyklus.: Min. = -5, Ø = 0, Max. = +5,  $\sigma = 2.41$ . Dies ist die mathematische Formulierung für zwei Würfel: Ein „grüner Würfel“ gibt die Plus-Zahlen vor, ein „roter Würfel“ zeigt die Minus-Zahlen. Aus der Differenz ergibt sich die neue Bestellmenge des Kunden, abgeleitet aus der vorhergehenden Bestellmenge (Steinegger 2009) [8].

### 3 Systems Engineering

Eine Optimierung nach dem Systems Engineering (Haberfellner 2012) [9] zeigt in der Simulation eine klare Rangfolge für die Wirksamkeit der Eingriffe:

- 1) Eine Verkürzung der Lieferkette bedeutet eine tiefgreifende, strukturelle Vereinfachung. Sie ist deshalb die wirkungsvollste Massnahme, um im BDG den finanziellen Erfolg zu erhöhen und gleichzeitig die Lieferbereitschaft zu gewährleisten.
- 2) An zweiter Stelle steht die Verminderung der Verzögerungseffekte (kürzere Lieferzeiten) und damit die Verminderung der Rückkoppelungseffekte.
- 3) Schliesslich leistet auch der durchgängige Informationsfluss ("open books") im Sinne des SCM einen Beitrag zur Optimierung der Gewinne. Diese Simulation bestätigt die Ergebnisse von Dejonckheere (2004) [10].

Die folgenden Abbildungen zeigen die Sprungantworten für optimierte Systeme und Regler im Vergleich.

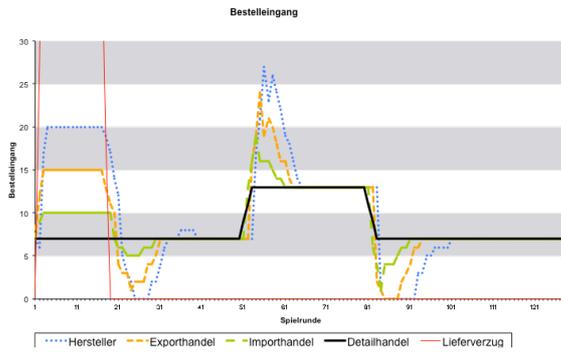


Abbildung 10. Klassische Spielanlage.

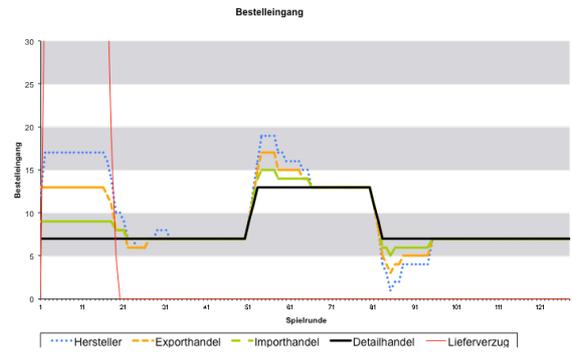


Abbildung 11. "Open Books" (SCM).

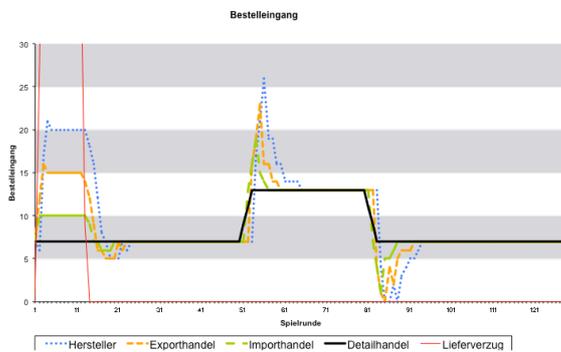


Abbildung 12. Verkürzte Lieferzeiten (2 statt 4).

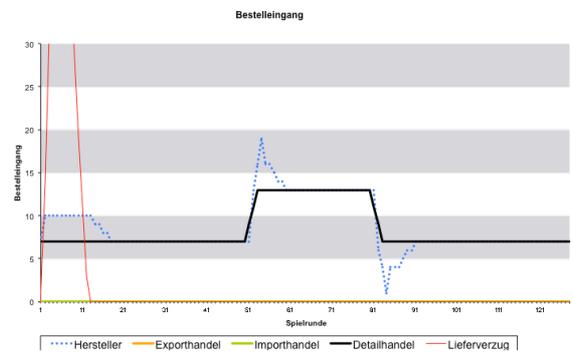


Abbildung 13. Verkürzte Lieferkette (2 statt 4).

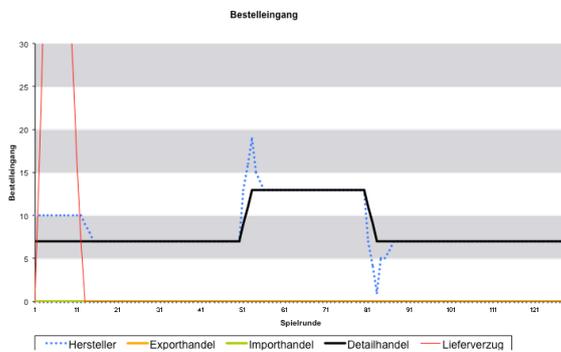


Abbildung 14. Verkürzte Kette und "Open Books".

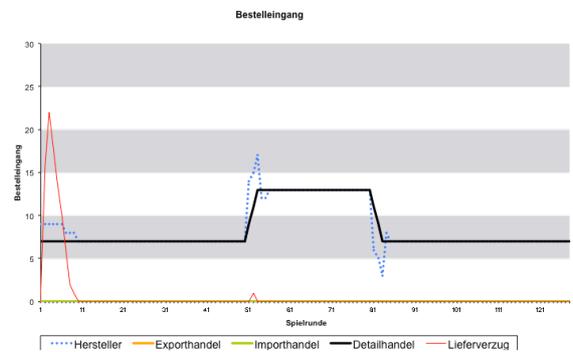


Abbildung 15. Verkürzte Kette, Lieferzeiten und "Open Books".

## 4 Vergleich von Modell und Realität

### 4.1 Lineare Lieferantenkette vs. Lieferantennetzwerk

Der definierten, linearen Kette aus gleichartigen Elementen mit einem Produkt (Bier) stehen in der Realität vielfältige, dynamische Beschaffungsketten mit verschiedenen Elementen und Beziehungen für mehrere Produkte mit verschiedenen Charakteristiken gegenüber. Das System ist zwar in beiden Fällen komplex, im Modell aber ist es abgeschlossen sowie

durch konstante Systemeigenschaften und Randbedingungen definiert (statt offen und veränderlich).

### 4.2 Lagerkosten vs. Transportkosten

Die hohen Lagerkosten und die fehlenden Transportkosten geben einen klaren Anreiz, um häufig zu bestellen (Bestellzyklus 1, also PID-Regler). In der Realität hängen Lagergröße und Bestellzyklen und damit der Entscheid für die "richtige" Beschaffungsstrategie vom Verhältnis von Lager- zu Transportkosten ab (u.a.). Damit im Zusammenhang stehen

selbstverständlich auch die Sicherheitsbestände und die Lieferbereitschaft, resp. die Lieferverzugskosten und die "lost sales".

### 4.3 Bestandpunktverfahren und Bestellrhythmusverfahren

Bei den bekannten Beschaffungsstrategien aus der Logistik werden Trends bewältigt, indem bei jeder Bestellung die Bestellparameter neu berechnet werden (z.B. Sicherheitsbestand, Bestellmenge, oder Bestellrhythmus) (Hosang 2009) [11].

Diese Strategien schneiden im BDG im Vergleich zum PID-Regler verhältnismässig schlecht ab, weil ab dem 3. Glied in der Beschaffungskette der "Ausnahmestandard" herrscht. Durch die streng lineare Struktur der Kette hat jedes Glied nur genau einen Abnehmer, was zu sehr hohen Lagerkosten führt.

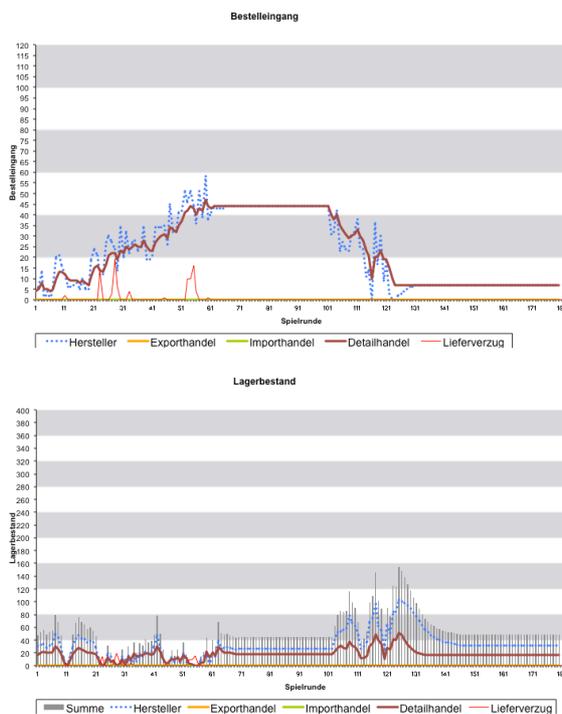


Abbildung 16. Trendverhalten für PID-Regler: Bestelleingang und Lagerbestand.

In diesem Fall hängt die Wahl der besten Strategie vom Verhältnis der Stückkosten zu den Logistikkosten und vom Verhältnis der Lager- zu den Transportkosten ab.

### 4.4 Eingangssignal

Das Eingangssignal (Kundenbestellmenge) wird in der Regel für die ganze Kette mehr oder weniger gleichmässig angenommen, d.h. jedes Glied in der

In der Realität hätte jedes Glied eine mehr oder weniger ausgeglichene Bestellreihe zu bewältigen, weil sich die Einzelbestellungen mehrere Abnehmer zu einem "Rauschen" überlagern. Ein sinnvoller Vergleich zwischen den Strategien betrachtet deshalb lediglich eine Beschaffungskette mit zwei Gliedern, was als "Direktimport" vom Detailhändler beim Hersteller interpretiert werden kann.

Die folgende Gegenüberstellung zeigt ein optimiertes System mit verkürzter Lieferkette, verkürzter Lieferverzögerung und "open books" (SCM). Auffallend sind die hohen Lagerkosten bei der klassischen Beschaffungsstrategie. Dies ist der Modellannahme im BDG geschuldet.

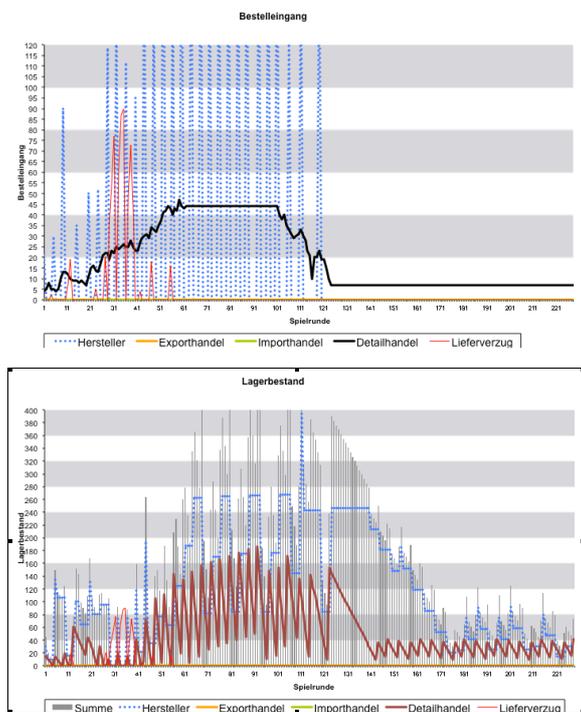


Abbildung 17. Trendverhalten für Bestellpunktverfahren (Mindestzyklusdauer = 4 Runden).

Beschaffungskette hat eine breite Kundschaft, sodass durch Überlagerung der Kundenbestellreihen eine statistische Verteilung entsteht (keine grossen Einzelbestellungen, die sich mit Phasen ohne jeden Bestelleingang abwechseln wie in den hinteren Gliedern der Beschaffungskette des BDG, wenn die klassischen Beschaffungsstrategien angewendet werden).

In der Realität dürfte ein um einen Mittelwert schwankendes Eingangssignal den Normalfall darstellen, d.h. die Kundenbestellreihe entspricht einem "Rauschen". Damit wird das Signal mathematisch eindeutig beschreibbar (mit statistischen Methoden). Trends dürften eher die Ausnahme bilden.

Ebenso ist das deterministische (= konstante) Inputsignal mit singulärer Irregularität (einmalige Änderung) aus der Spielanlage eine Modellannahme, die verhältnismässig weit von der Realität weg ist. Sie eignet sich aber sehr gut für die Veranschaulichung des Bullwhipeffektes und der Notwendigkeit für ein Reglerdesign sowie dessen Einstellung - und sie entspricht genau der Idee der Sprunganwort zur Optimierung des Führungsverhaltens.

#### 4.5 "Nur Varietät kann Varietät absorbieren"

Das BDG dient also insgesamt als nützliches Modell für das Verständnis der "Realität". Es zeigt sich, dass es mehrere Modelle braucht, um die mannigfaltigen Aspekte der Realität zu erklären und zu verstehen. Wiegand (2005) [12] spitzt hierzu das Gesetz von Ashby wie folgt zu: "Nur Varietät kann Varietät absorbieren." - will heissen: Man kann ein Problem mit gegebener Komplexität nur mit Hilfe eines mindestens ebenso komplexen „Werkzeugkastens“ gut beschreiben und lösen.

## 5 References

- [1] Werner, Hartmut (2008, 3. vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage): Supply Chain Management – Grundlagen, Strategien, Instrumente und Controlling. Gabler Deutschland. (S. 38f)
- [2] Forrester, Jay (1975): Industrial Dynamics: A Major Breakthrough for Decisions Makers. In: Collected Papers of Jay W. Forrester. Wright-Allen Press, Inc. (Seite 23) Erstmals publiziert in Harvard Business Review 36, no. 4 (July-August 1958), pp 37-66.
- [3] Haberfellner, Reinhard (Hrsg., 2012): Systems Engineering, 12. durchgesehene Auflage. Orell Füssli, Verlage industrielle Organisation Zürich. (S. 38)
- [4] Gomes / Probst (1999, 3. Auflage): Die Praxis des ganzheitlichen Problemlösens - vernetzt denken, unternehmerisch handeln, persönlich überzeugen. Haupt Berne. (S. 72ff)
- [5] Dejonckheere, J. et al (2003): Measuring and avoiding the bullwhip effect: A control theoretic approach. European Journal of Operational Research 147 (2003) 567–590.
- [6] Mann, Heinz et al (2009, 11. neu bearbeitete Auflage): Einführung in die Regelungstechnik - analoge und digitale, Fuzzy-Regler, Regler-Realisierung, Software. Carl Hanser Verlag München. (S. 13)
- [7] Mann, Heinz et al (2009, 11. neu bearbeitete Auflage): Einführung in die Regelungstechnik - analoge und digitale, Fuzzy-Regler, Regler-Realisierung, Software. Carl Hanser Verlag München. (S. 210ff)
- [8] Steinegger, Rolf (2009): Spielstrategien für die Simulation einer Lieferantenkette aus der Logistik ("Bierspiel"). Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften.
- [9] Haberfellner, Reinhard (Hrsg., 2012): Systems Engineering, 12. durchgesehene Auflage. Orell Füssli, Verlage industrielle Organisation Zürich. (S. 41ff)
- [10] Dejonckheere, J. et al (2004): The impact of information enrichment on the Bullwhip effect in supply chains: A control engineering perspective. European Journal of Operational Research 153 (2004) 727–750.
- [11] Hosang, Jürg (2009): Supply Chain Management. Skript zur Vorlesung Ökonomische und Soziale Systeme 2. Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften. (S. 16ff).
- [12] Wiegand, Jürgen (2005): Handbuch Planungserfolg - Methoden, Zusammenarbeit und Management als integraler Prozess. vdf Hochschulverlag ETH Zürich. (S. 205)