

# Kombinierte Optimierung für diskontinuierliche Produktion mit nicht definierten Qualitätskriterium

Thomas Schulz<sup>1</sup>, Ivan Nekrasov, Ph.D.<sup>2</sup>

## Zusammenfassung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit einem realen Fall der Chargenproduktion aus der pharmazeutischen Industrie. Das in der Untersuchung betrachtete Problem liegt im Bereich der Optimierung der Chargenqualität und der Minimierung des Ausschusses unter der Gegebenheit, dass die entsprechenden Qualitätsparameter im Unternehmenssteuerungssystem nicht gemessen werden. Die in dieser Arbeit vorgeschlagene Technik führt ein virtuelles Qualitätskriterium ein, das für jede der Chargen angewendet wird, basierend auf dem beschränkten Wissen der Anwender, welche Charge als optimale Charge (auch Golden Batch bezeichnet) betrachtet werden kann und somit als Referenz für die aktuell in Produktion befindliche Charge verwendet werden kann. Zu diesem Zweck verwenden wir das klassische integrale Leistungskriterium, das in der Theorie der optimalen Steuerung dynamischer Systeme weit verbreitet ist, um zu messen, wie weit der aktuelle Zustand des Systems vom 'optimalen' Punkt entfernt ist. Mit Hilfe der beschriebenen Technologie, die aus der genannten Nachbardisziplin stammt, waren wir in der Lage, die Qualität jeder Charge als ein kontinuierliches Messverhältnis zu quantifizieren, was uns erlaubte, mehrere effiziente kontinuierliche Analysetechniken für diesen anfänglichen Chargenproduktionsfall zu verwenden.

## Stichwörter

Analytik, Machine Learning, Künstliche Intelligenz

## 1 Einführung

Effizienz gilt als zentrales Merkmal, das die moderne Managementstrategie eines jeden Unternehmens in jedem Bereich der Industrie definiert [1]. Diese steht folgerichtig und selbstverständlich im Fokus digitaler Lösungen, die zur Steuerung des Unternehmens auf verschiedenen Ebenen seiner Hierarchie eingesetzt werden. Moderne Ausgaben klassischer Industrielösungen wie z.B. Manufacturing Execution Systems (MES) führen messbare Leistungsparameter (sog. KPIs) ein, die das erwähnte allgemeine Verständnis von Effizienz formalisieren und in eine Reihe lokaler Steuerungsziele aufspalten [1, 2]. Diese Ziele sind in vielen Fällen nicht so einfach zu erreichen, weshalb die Formalisierung und Lösung von lokalen Steuerungsproblemen in der heutigen Zeit einen erheblichen Aufwand erfordert und fortgeschrittene mathematische Werkzeuge erfordert.

Dieser Beitrag befasst sich mit der Optimierung der Endproduktqualität. In den meisten Fällen handelt es sich bei der Qualitätskennzahl um ein Merkmal, das entweder direkt gemessen werden kann (z. B.

---

<sup>1</sup> GE Intelligent Platforms GmbH, Augsburg, Deutschland

<sup>2</sup> Russische Plechanow-Wirtschaftsuniversität, Moskau, Russland

die rheologischen Eigenschaften eines Kraftstoffes oder die Druckfestigkeit von Beton) oder als komplexer Wert berechnet wird (z. B. wird die chemische Aktivität einer Substanz auf der Grundlage der Geschwindigkeit ihrer Reaktion mit im Labor definierten Standardprüfkörpern berechnet). Bei diesen Produktionstypen wird das Ziel der Qualitätsoptimierung mathematisch als eine Zielfunktion eines Minimierungs-/Maximierungsproblems formalisiert, das mit geeigneten mathematischen Methoden erfolgreich gelöst werden kann [3].

In einigen Produktionsbereichen wird die Qualität jedoch nicht in einem einzigen messbaren Parameter zusammengefasst, sondern durch eine Sammlung von binären Prüfzeichen dargestellt, die jeweils die Tatsache widerspiegeln, dass das Endprodukt gegen eine Reihe von Anforderungen getestet wurde und diese Tests erfolgreich bestanden hat [4]. Das Fehlen einer kontinuierlichen Qualitätsfunktion (KPI) macht den oben genannten Optimierungsansatz nicht anwendbar. In diesem Beitrag untersuchen wir einen solchen Fall und schlagen eine Technik vor, wie man das ursprüngliche binäre Qualitätskennzeichnungsproblem erweitern kann, um effiziente und in der Praxis bewährte kontinuierliche Optimierungsmethoden zu seiner Lösung heranzuziehen.

## 2 Problemstellung der Chargenproduktion

Chargenorientierte Prozesse nehmen einen der bedeutendsten Anteile in der Industrie ein. Als Charge wird eine bestimmte Menge von Gütern bezeichnet, die die gleichen Eigenschaften aufweisen und in einem zusammenhängenden Prozess nach streng nacheinander abgearbeiteten Phasen gemeinsam verarbeitet werden. Im Sinne der Industrie 4.0-Standardarchitektur [5], die auf die Beschreibung der Produktion hochkomplexer Einheiten ausgerichtet ist, können die chargenartigen Prozesse als untergeordnete Vorgänge betrachtet werden, die einfachere Komponenten des endgültigen Hightech-Produkts bilden. Fast alle Produktionsprozesse beinhalten Elemente der Chargenbildung sowohl in der diskreten als auch in der kontinuierlichen Industrie. In der diskreten Produktionstechnik wird eine Charge als Los bezeichnet und ist als eine Gruppe von hergestellten Waren definiert.

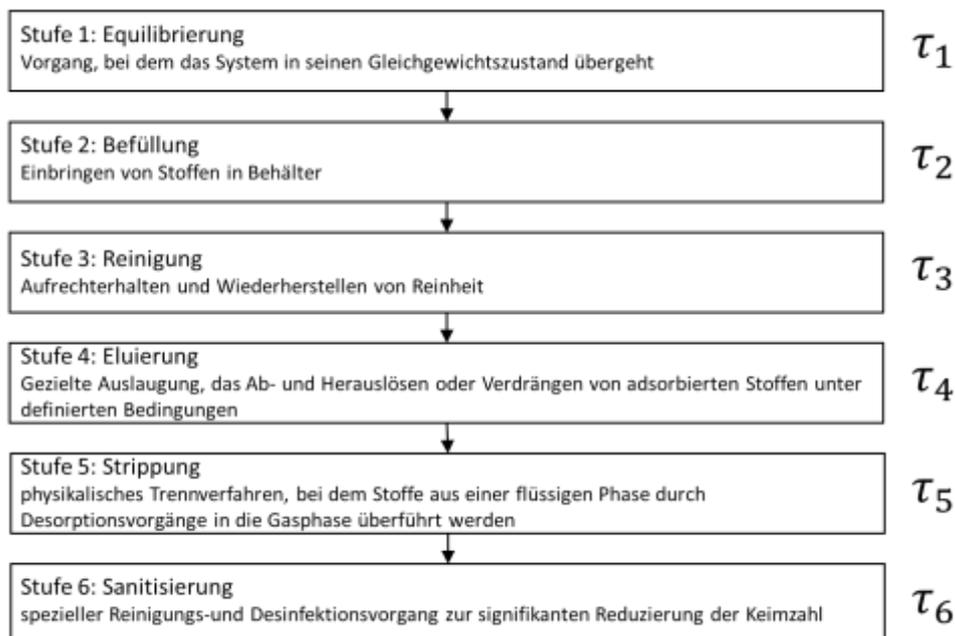


Bild 1: Produktionsstufen (Phasen)

Die Menge des Loses wird durch den Umfang der Produktion und der Prozesswiederholung diktiert: von der Einzelproduktion, über die Serienproduktion und Sortenproduktion bis hin zur Massenproduktion. In ähnlicher Weise wird die Charge in der kontinuierlichen Industrie durch eine bestimmte Menge des Endprodukts repräsentiert (z.B. ein Fass Öl). In diesem Fall wird der Begriff Qualität nicht auf einen einzelnen diskreten Artikel und nicht als kontinuierliche zeitbasierte Funktion angewandt, sondern als eine Eigenschaft der bestimmten Produktmenge, die zu einer Charge aggregiert wird. Innerhalb jeder Charge kann die Qualität kontinuierlich oder periodisch gemessen werden, die resultierende Qualität der Charge ist jedoch ein aggregiertes Verhältnis, das auf diesen Messungen basiert. Darüber hinaus kann jede Phase des Produktionsprozesses lokale, untergeordnete Qualitätsmessungen haben, die alle nachfolgenden Phasen und die gesamte Charge beeinflussen (siehe Bild 1).

### 3 Implizite Definition von Qualitätskriterien

Die optimale Charge (Golden Batch) Optimierung und die kontinuierliche Optimierung sind zwei effiziente Ansätze zur Verbesserung der Produktionsqualität. Die wichtigste Einschränkung bei der Optimierung besteht darin, dass sie einige gemessene oder berechnete KPI erfordert, die wir minimieren oder maximieren wollen. Das Golden-Batch-Konzept wird zum Vergleich von Chargen verwendet und dient als Untersuchungsgrundlage für den Fall, dass die Qualität aus irgendeinem Grund gesunken ist. Im Folgenden untersuchen wir den Fall, dass der Qualitäts-KPI nicht verfügbar ist. Wir verwenden jedoch die optimale Charge (Golden Batch), um eine Qualitätszielfunktion einzuführen, die für die Minimierung gilt und die Qualität auf ein erreichbares Optimum bringt.

#### 3.1 Integrale Zielfunktionen im Zustandsraum

Betrachten wir einen praktischen Fall von Qualitätsmanagement in der pharmazeutischen Industrie. Wie in Bild 2 dargestellt, besteht der Prozess aus sechs aufeinanderfolgenden Phasen, wobei jede Phase eine bestimmte Dauer von  $\tau_k$ ,  $k = 1, \dots, 6$  hat. Der Produktionsprozess ist charakterisiert durch vier gemessene technische Parameter  $x_n(t)$ ,  $n = 1, \dots, 4$ .

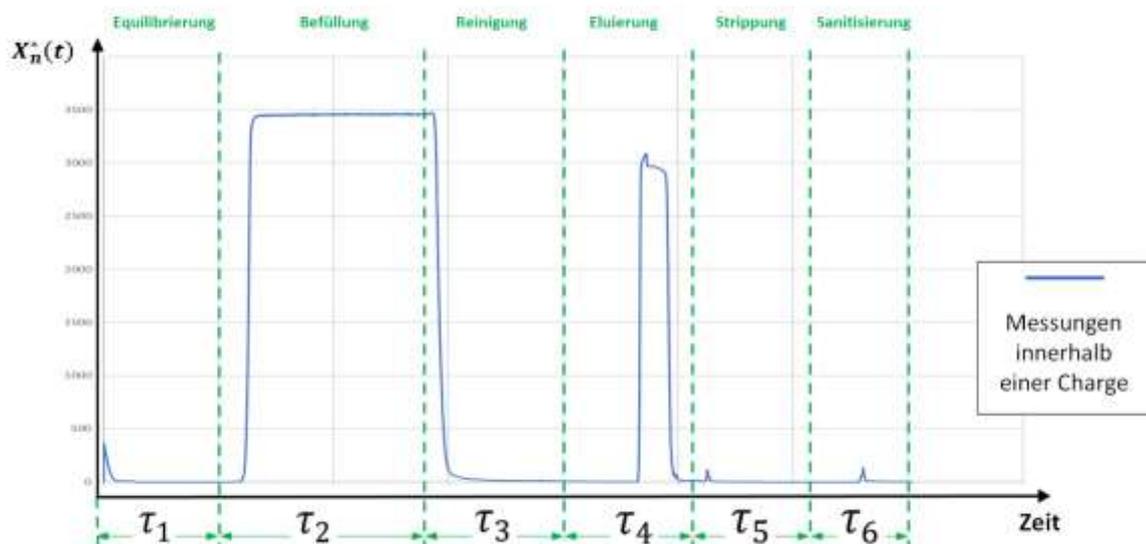


Bild 2: Produktionsstufen (Phasen) und das Profil der optimalen Charge (Golden Batch)

Die Gesamtqualität der Charge wird normalerweise durch die Kennzahl  $Q$  charakterisiert, die in Bezug auf die Prozessphasen kumuliert ist

$$Q = \sum_{k=1}^K Q_k \quad (1)$$

wobei  $k = 1, \dots, K$  – Nummer der Stufe (Phase) des Prozesses; für den betrachteten Fall  $K=6$  ist.

Das Problem bei dem untersuchten Fall ist, dass die Qualität  $Q$  und  $Q_k$  nicht direkt gemessen oder berechnet wird, sondern dass stattdessen jede Charge im Labor getestet und binär mit "bestanden/nicht bestanden" bewertet wird. und wird binär mit der Note "bestanden/nicht bestanden" bewertet.

$$Pass(m) = \begin{cases} 1, & \text{Test bestanden} \\ 0, & \text{Test nicht bestanden} \end{cases} \quad (2)$$

wobei  $m = 1, \dots, M$  – Nummer der Charge ist.

Es liegt auf der Hand, dass ein derartiges "postfaktisches" binäres Testlabel wie  $Pass(m)$  nicht als ein hervorragender Qualitätsparameter angesehen werden kann, und diese Situation führt dazu, dass die oben erwähnten Analyse- und Optimierungstechniken nicht anwendbar sind. Positiv ist, dass wir ein explizit aufgezeichnetes Profil aller Parameter des optimale Charge (Golden Batch) in der historischen Datenbank haben. Nachfolgend stellen wir ein Verfahren zur Umgehung des Problems vor, mit dem eine künstliche kontinuierliche Qualitätsfunktion auf der Grundlage der diskreten Pass-Fail-Statistiken und der Trends der optimale Charge (Golden Batch), die wir besitzen, eingeführt werden kann. Dies ermöglicht es, die Leistungsfähigkeit kontinuierlicher Methoden auf den untersuchten Fall anzuwenden.

### 3.2 Integrale Zielfunktionen im Zustandsraums

Die Zustandsraumtheorie ist ein weit verbreiteter Ansatz für die Analyse multivariabler dynamischer Systeme [6]. Die zentrale Bestimmung dieser Theorie ist die Darstellung des aktuellen Zustands des Systems als Vektor oder Punkt in einem mehrdimensionalen euklidischen Raum (siehe Bild 3). Die Achsen des genannten Raums entsprechen den gemessenen Parametern des Systems  $x_n$ ,  $n = 1, \dots, N$  und während sich diese Parameter in der Zeit ändern, ändert der reflektierende Punkt seine Position in diesem Zustandsraum. Die Spur seiner Bewegung wird gewöhnlich als "Phasentrajektorie" bezeichnet (siehe Abb. 3), wobei davon ausgegangen wird, dass der Zustand des Systems auch als Phase des Systems betrachtet werden kann [6].

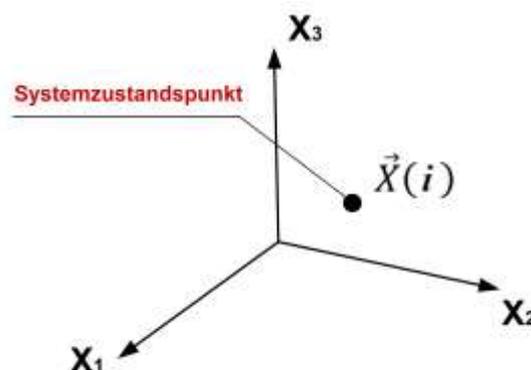


Bild 3: Produktionszustand des industriellen Anwendungsfalles

Da es unendlich viele Varianten gibt, wie sich der Zustandspunkt des Systems im Zustandsraum bewegen kann, könnte der Forscher aus bestimmten Gründen eine von ihnen bevorzugen. In diesem Fall kann die entsprechende Phasentrajektorie als optimal in Bezug auf ein formalisiertes Kriterium  $Q$

angesehen werden [7]. Wenn man die optimale Phasentrajektorie als ideale Spur des Systems verwendet, kann man messen, wie weit das System zu jedem Zeitpunkt von diesem Referenzverlauf entfernt ist (siehe Bild 4).

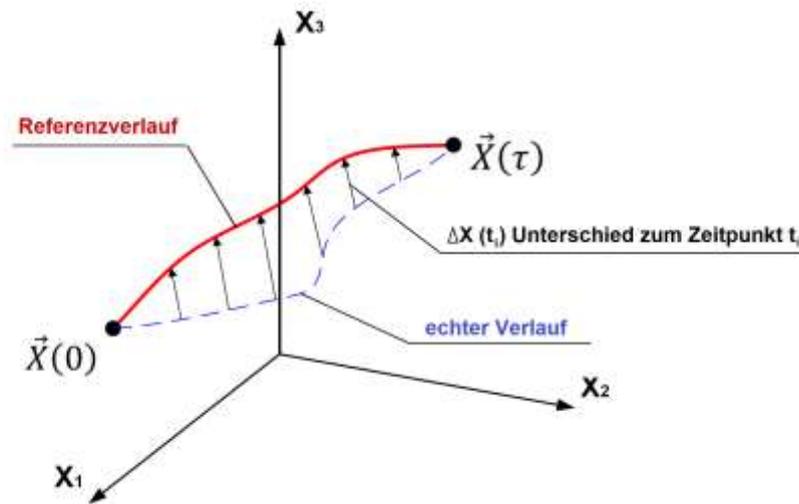


Bild 4: Produktionsstufen des industriellen Anwendungsfalles

Wie in Bild 4 dargestellt, wird dieser Abstand einfach als Differenzvektor zwischen dem Referenzzustand und dem echten Zustand des Systems zu jedem Zeitpunkt dargestellt:

$$\Delta \vec{X}(i) = \vec{X}^*(i) - \vec{X}(i) \quad (3)$$

Der Abstand selbst wird als euklidische Norm des Differenzvektors berechnet.

$$|\Delta \vec{X}(i)| = \sqrt{\sum_{n=1}^N \Delta x_n^2(i)} \quad (4)$$

Zeitlich kumuliert können wir diese Differenzvektoren zu einer einzigen Funktion aggregieren, die uns Aufschluss darüber gibt, wie nahe der tatsächliche Pfad des Systems an der Referenzphasenbahn lag. Mathematisch gesehen ist das Aggregieren von Funktionen in der Zeit gleichbedeutend mit dem Integrieren, was uns die Formel für die Funktion der "kumulativen Differenz" liefert - das Äquivalent einer integralen Zielfunktion aus der klassischen Theorie der optimalen Steuerung [7].

$$D = \int_0^{\tau} |\Delta \vec{X}(t)| dt = \int_0^{\tau} \sqrt{\sum_{n=1}^N \Delta x_n^2(t)} dt \quad (5)$$

Zeitlich kumuliert können wir diese Differenzvektoren zu einer einzigen Funktion aggregieren, die uns Aufschluss darüber gibt, wie nahe der tatsächliche Pfad des Systems an der Referenzphasenbahn lag. Mathematisch gesehen ist das Aggregieren von Funktionen in der Zeit gleichbedeutend mit dem Integrieren, was uns die Formel für die Funktion der "kumulativen Differenz" liefert - das Äquivalent einer integralen Zielfunktion aus der klassischen Theorie der optimalen Steuerung [7].

$$Q = D^2 = \sum_{i=1}^I \sum_{n=1}^N [x_n^*(i) - x_n(i)]^2 \quad (6)$$

wobei  $x_n(i)$  – zeitdiskrete Messungen der verfügbaren Parameter,  
 $n = 1, \dots, N$  – Index der Messgröße,  
 $i = 1, \dots, I$  – Zeitmarken der zeitdiskreten Messung sind.

### 3.3 Abweichung vom Golden Batch als integrale Zielfunktion

Um auf unseren industriellen Anwendungsfall zurückzukommen, können wir die oben erwähnte Argumentation leicht auf das Konzept des "Golden Batch" anwenden. Lassen Sie uns zu diesem Zweck die folgenden Entsprechungen in der Terminologie und in den Begriffen aufführen:

Nr.	Mathematische Einheit	Industrielles Äquivalent
1.	Zustandsvariable	Gemessene Parameter des Systems
2.	Zustandsvektor	Datensammlung der im System gemessenen Parameter
3.	Referenz-Phasen-Trajektorie (Pfad)	Datensammlung der Trends der gemessenen Parameter im Zusammenhang mit dem Golden Batch
4.	Projektion der Referenztrajektorie auf jede Zustandsvariable	Trend eines einzelnen gemessenen Parameters in Verbindung mit dem Golden Batch
5.	Abstandsvektor	Abweichung vom Golden-Batch-Trend, berechnet durch alle gemessenen Parameter
6.	Abstandsprojektion auf jede Zustandsvariable	Abweichung vom Golden-Batch-Trend für einen einzelnen gemessenen Parameter
7.	Kumulatives Abstandsintegralkriterium	Zeitintegrierte Abweichung vom Golden Batch

Tabelle 1: Korrespondenz von Terminologie und Begriffe

Mit dem gemessenen zeitlichen Profil des Golden Batch durch jeden gemessenen Parameter  $x_n^*(t)$ ,  $t \in [0, \dots, \tau_{batch}]$  aus der historischen Datenbank (dem explizit angegebenen Golden Batch - siehe Bild 4) können wir die integrale Abweichungscharakteristik einführen, die mit den Formeln (5)-(6) identisch ist und für jede Phase des Prozesses  $\tau_k$ ,  $k = 1, \dots, K$  (in unserem Fall  $K = 6$ ,  $\tau_6 = \tau_{batch}$ ) gilt:

$$Q_k = \int_0^{\tau_k} \left[ \sum_{n=1}^N (x_n^*(t) - x_n(t))^2 \right] dt \quad (7)$$

Dabei sind  $x_n^*(t)$  die Profilverläufe des Golden Batch für jeden  $n$ -ten gemessenen Parameter,  $x_n(t)$  sind die Profilverläufe der aktuellen Charge. Auf der diskreten Zeitskala sieht die integrale Abweichung wie folgt aus:

$$Q_k = \sum_{i=1}^{I_k} \sum_{n=1}^N [x_n^*(i) - x_n(i)]^2 \quad (8)$$

Summiert man die integrale Abweichung durch alle Phasen des Prozesses, so erhält man die endgültige Formel:

$$Q = \sum_{k=1}^K Q_k = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{I_k} \sum_{n=1}^N [x_n^*(i) - x_n(i)]^2 \quad (9)$$

wobei  $n = 1, \dots, N$  – Index der Messgröße,

$k = 1, \dots, K$  – Index der Projektphase,

$i = 1, \dots, I_k$  – Zeitmarken der zeitdiskreten Messung innerhalb jeder  $k$ -ten Phase durch den  $n$ -ten gemessenen Parameter sind.

## 4 Implizite Qualitätsoptimierung für die Pharmaindustrie als Anwendungsfall

Nachdem wir eine "künstliche" kontinuierliche Qualitätsfunktion (9) für das ursprünglich binäre Problem der Chargenverwaltung auf MES-Ebene eingeführt haben, sind wir in der Lage, das gesamte Portfolio der in Tabelle 1 aufgelisteten Methoden zu nutzen. Die Hauptaufgabe besteht darin, die Ursachen für schlechte Qualität unter den verfügbaren Chargenstatistiken zu finden. Die verfügbaren Chargenstatistiken sind wie folgt:

Nr.	Parameter	Wert
1.	Anzahl der erfassten Chargen	$M = 42$
2.	Anzahl der Chargen mit schlechter Qualität	5
3.	Anzahl der in jeder Charge gemessenen Parameter	$N = 4$
4.	Anzahl der Phasen (Stufen) im Produktionsprozess	$K = 6$

Tabelle 2: Verfügbare Statistiken der Chargen

Für die weitere Analyse in dieser Arbeit wird die Software Proficy CSense verwendet [8]. Proficy CSense ist ein Software-Framework, das speziell für die Anwendung fortgeschrittener mathematischer Methoden in industriellen Systemen entwickelt wurde. Die von uns durchgeführten Verfahren gehören zu seiner Standardfunktionalität.

### 4.1 Berechnung des integralen Kriteriums für Chargen und Definition der Grenzqualität

Durch das Kopieren des Golden Batch Chargentrends und der Trends für jede der  $M = 42$  Chargen erhalten wir ein ideales Profil des Prozesses für alle 42 in der Statistik verfügbaren Chargen (siehe Bild 5).

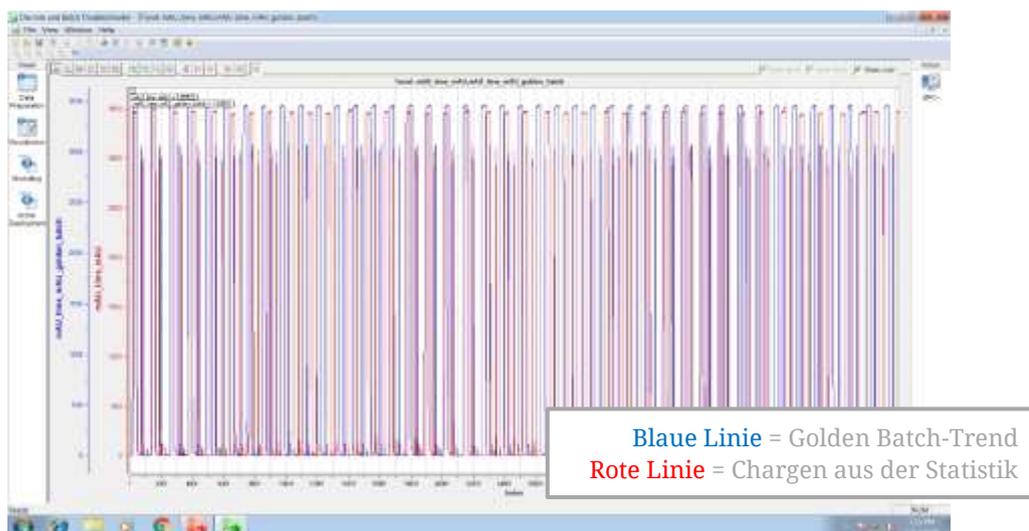


Bild 5: Golden Batch Profil im Vergleich zu allen 42 statistischen Chargen

Mit zwei Profilen - einem für die Konsistenz der 42-mal wiederholten optimalen Charge (Golden Batch, blaue Linie in Bild 5) und einem für die wirklichen Verläufe der 42 Chargen (rote Linie in Bild 5) - und

unter Verwendung der Formel (9) können wir das kumulative Abweichungsverhältnis für alle 42 Chargen berechnen. Das Ergebnis der Berechnung ist in Bild 6 dargestellt.

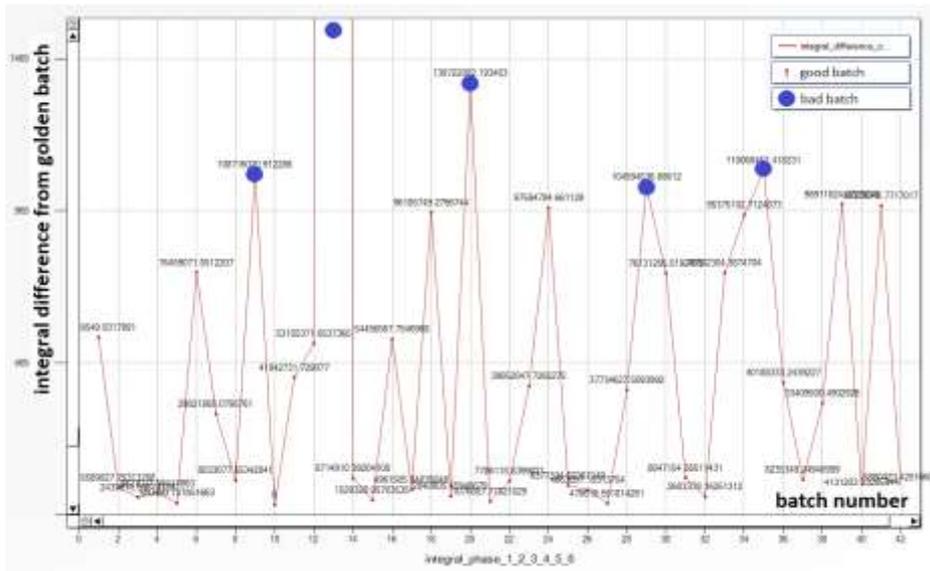


Bild 6: Kumulierte Abweichung für alle statistischen Chargen

Die oben genannten schlechten Chargen sind in Abb. 6 durch blaue Kreise gekennzeichnet. Diese fünf schlechten Chargen entsprechen den fünf Punkten mit dem höchsten Wert des kumulativen Abweichungskriteriums  $Q$ . Wie in Bild 6 zu sehen ist, lauten die Nummern schlechten Chargen: **9, 13, 20, 29 und 33**. Anhand dieses Diagramms können wir zwei wichtige Grenzwerte für das Kriterium der kumulativen Abweichung definieren, das auf die Chargen angewendet wird:

- Maximale bekannte Abweichung für Chargen guter Qualität

$$Q_{max}^{good} = \max [Q(m)] \mid Pass(m) = 1 \tag{10}$$

wobei  $m = 1, \dots, M$  – Index der aufgezeichneten Charge ist.

- Minimale bekannte Abweichung für Chargen mit schlechter Qualität

$$Q_{min}^{bad} = \min [Q(m)] \mid Pass(m) = 0 \tag{11}$$

wobei  $m = 1, \dots, M$  – Index der aufgezeichneten Charge ist.

Wie in Bild 7 dargestellt bilden die beiden Werte  $Q_{max}^{good}$  und  $Q_{min}^{bad}$  bilden die Grenzen zwischen qualitativ schlechten und guten Chargen. Im grünen Bereich sind die garantiert guten Chargen enthalten, der gelbe Bereich enthält die garantiert schlechten Chargen. Man beachte, dass die Werte  $Q_{max}^{good}$  und  $Q_{min}^{bad}$  nie gleich sind, woraus sich ein Unsicherheitsbereich des Qualitätskriteriums ableiten lässt (grauer Bereich in Bild 7). Das bedeutet, dass für den Fall, dass die kumulative Differenz  $Q(m)$  zwischen diesen beiden Grenzwerten liegt

$$Q_{max}^{good} < Q(m) < Q_{min}^{bad}$$

unser statistisches Modell nicht bestimmen kann, ob die  $m$ -te Charge den Qualitätstest erfolgreich bestehen kann. Der Unsicherheitsbereich wird explizit von den uns zur Verfügung gestellten Chargenstatistiken geerbt, schrumpft aber wiederum erheblich, wenn wir Testergebnisse von mehr Chargen akkumulieren. Asymptotisch verschwindet der Unsicherheitsbereich mit zunehmender Anzahl der Chargen

$$\lim_{m \rightarrow \infty} [Q_{min}^{bad} - Q_{max}^{good}] = 0 \tag{12}$$

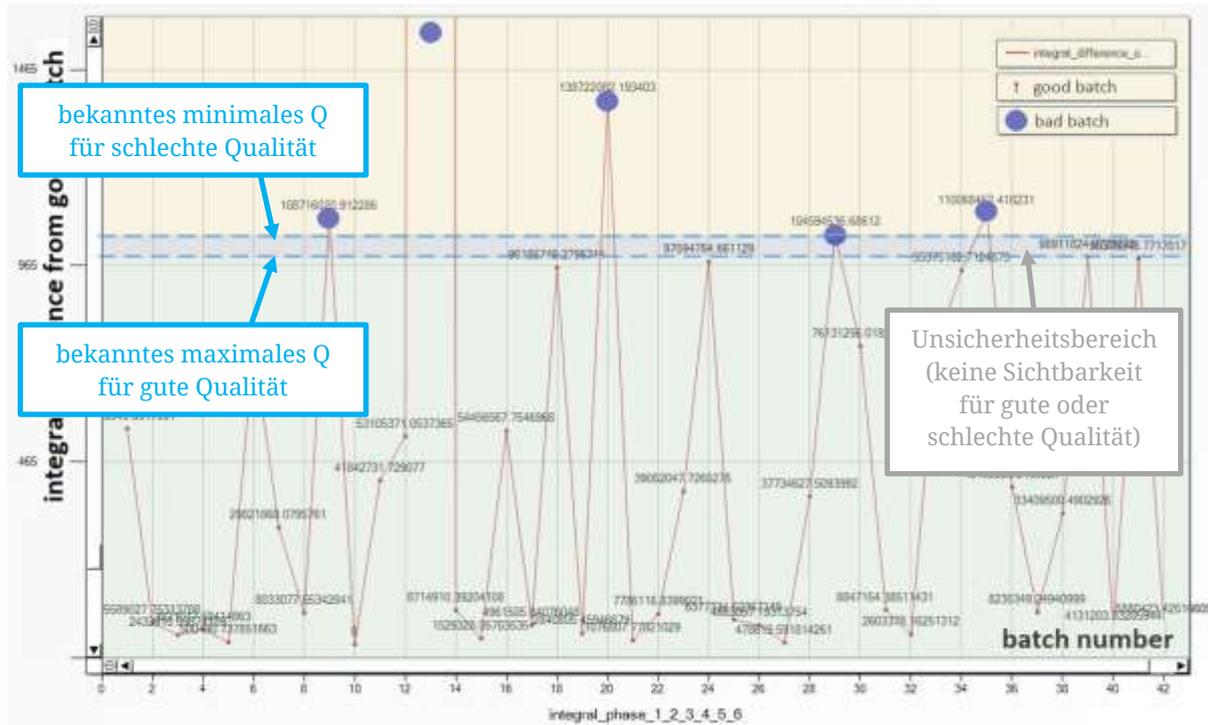


Bild 7: Grenzwerte der Qualität für garantiert schlechte und gute Chargen

## 4.2 Abgrenzung der Prozessstufen nach dem Einfluss der Endqualität

Wenn man bedenkt, dass sich die kumulative Differenz  $Q$  auf den gesamten Prozess der Herstellung der Charge bezieht und als Summe der Abweichungen in jeder Phase gebildet wird (siehe Formeln 1 und 9), kann man die Teilabweichungen jeder  $k$ -ten Phase jeder  $m$ -ten Charge berechnen (siehe Formel 8)

$$Q_k(m) = \sum_{i=1}^I \sum_{n=1}^N [x_n^*(i) - x_n(i)]^2 \quad (13)$$

Auf dieselbe Weise können wir die Grenzen  $Q_{max_k}^{good}$  und  $Q_{min_k}^{bad}$  für jede Phase definieren. Darüber hinaus ist es möglich, die Korrelation zwischen der Endqualität und der Abweichung innerhalb jeder  $k$ -ten Phase des Prozesses zu berechnen (Kehrwert der Formel 1):

$$cor(Q_k, Q) = \frac{\sum_{m=1}^M [(Q_k(m) - \bar{Q}_k) \cdot (Q(m) - \bar{Q})]}{\sqrt{\sum_{m=1}^M (Q_k(m) - \bar{Q}_k)^2 \cdot \sum_{m=1}^M (Q(m) - \bar{Q})^2}} \quad (14)$$

wobei  $m = 1, \dots, M$  – Index der aufgezeichneten Charge,  
 $k = 1, \dots, K$  – Index der Phase des Projekts sind.

Die Ergebnisse der Korrelationsberechnung sind in Bild 8 dargestellt. Wie wir daraus ersehen können, sind die Phasen 3, 4 und 5 die am stärksten beeinflussenden Phasen, was uns automatisch hilft, die Ursachen für schlechte Qualität zu finden, indem wir diese Phasen untersuchen. In diesem Beitrag gehen wir nicht näher auf mögliche Optimierungs- und Steuerungsprobleme ein, die wir dank der vorgestellten Technik des kumulativen Abweichungskriteriums zu lösen in der Lage sind. Es wird lediglich ein grundlegender Qualitätsvorhersagealgorithmus als Beispiel betrachtet.

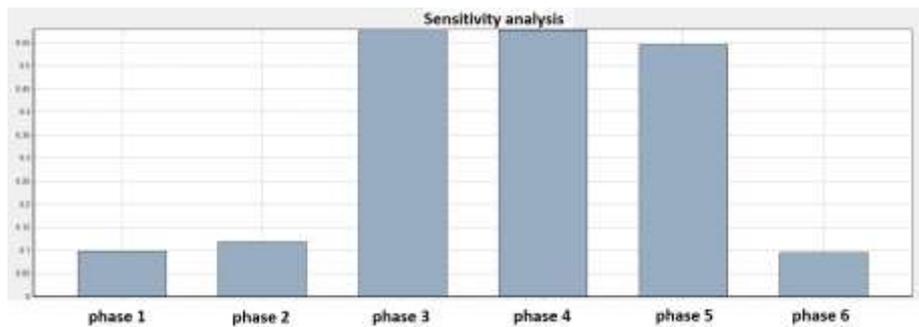


Bild 8: Sensitivitätsanalyse auf der Grundlage von Korrelationskoeffizienten

## 5 Schlussfolgerung

In dieser Arbeit haben wir die Annahme bestätigt, dass ein effektives Qualitätsmanagement nur dann möglich ist, wenn es eine kontinuierlich gemessene oder berechnete Qualitätsfunktion gibt. Zunächst haben wir die Annahme bestätigt, dass ein effektives Qualitätsmanagement nur dann möglich ist, wenn es eine kontinuierlich gemessene oder berechnete Qualitätsfunktion gibt. Wir haben Anwendungsfälle aufgedeckt, in denen es keine solche Funktion gibt und demonstriert, wie man solche Fälle in klassische kontinuierliche Optimierungsprobleme umwandeln kann. Ein solches Ergebnis wurde durch die Einführung der integralen Zielfunktion "kumulative Golden Batch Abweichung" erzielt, die aus der Theorie der dynamischen Zustandsraumsteuerung übernommen wurde. Die Einführung einer solchen Kriteriumsfunction ermöglichte es uns, alle verfügbaren Analyse- und Optimierungsmethoden für reale Produktionsfälle zu nutzen, bei denen die Qualität nicht direkt gemessen wurde. Insbesondere waren wir in der Lage, die auf das vorgeschlagene Kriterium angewandte Faktorenanalyse durchzuführen und die Hauptgründe für schlechte Charenqualität zu finden, die periodisch auftraten. Darüber hinaus definierten wir für jede Phase des Prozesses die kleinste Obergrenze für Chargen mit guter Qualität und die größte Untergrenze für Chargen mit schlechter Qualität. Dieses dient zukünftig als Grundlage der Erstellung eines Online-Vorhersagetools für die Prozessqualität. Potenziell bietet der entwickelte Ansatz eine Grundlage zur Implementierung verschiedener intelligenter Steuerungsalgorithmen, einschließlich einiger Elemente der künstlichen Intelligenz [9].

## 6 Literatur

- [1] Peter D. Mauch. Quality management: Theory and Application. CRC Press (Taylor & Francis Group). 2010. London - New York. Seite 143.
- [2] Heiko Meyer, Franz Fuchs, Klaus Thiel. Manufacturing Execution Systems: Optimal Design, Planning, and Deployment. McGraw-Hill Companies. 2009. New York. Seite 248.
- [3] Stephen Boyd, Lieven Vandenberghhe. Convex Optimization. Cambridge University Press. 2004. Cambridge. Seite 716.
- [4] CCSA 2009 SA/2009/12/Add.1. Guidelines for the implementation of quality assurance frameworks for international and supranational organisations compiling statistics. 2009. Prepared by Eurostat. Seite 28.
- [5] Thomas Schulz [Hrsg.]. Industrie 4.0: Potenziale erkennen und umsetzen. Vogel Business Media. 2017. Würzburg. Seite 57 ff.
- [6] Frederick W. Fairman. Linear Control Theory: The State Space Approach. John Wiley & Sons Ltd. 1998. West Sussex. Seite 315.
- [7] Richard Vinter. Optimal Control. Springer Science+Business Media LLC (Birkhäuser). 2000. Boston. 507p.
- [8] Proficy CSense 8.5 from GE Digital. GE Digital LLC, August 2021, San Ramon: [https://www.ge.com/digital/sites/default/files/download\\_assets/proficy-csense-from-ge-digital.pdf](https://www.ge.com/digital/sites/default/files/download_assets/proficy-csense-from-ge-digital.pdf) (abgerufen am 08.12.2021).
- [9] Jos M.F.ten Berge. Least Squares Optimization in Multivariate Analysis. DSWO Press. 1993. Leiden. Seite 88.