



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

# Flächenauswahlprozess und dynamische Optimierung zur Ermittlung von wertstromdurchgängigen Autoidentifikationstechnologien

Andreas Wank, Jon Krüger, Justus Stähle, Joachim Metternich



2018

wank@ptw.tu-darmstadt.de

---

---

## Inhaltsverzeichnis

---

Inhaltsverzeichnis .....	ii
Abkürzungsverzeichnis .....	iv
1 Einleitung .....	1
2 Entwicklung eines Flächenauswahlmodells .....	2
3 Dynamische Optimierung.....	6
4 Zusammenfassung.....	13
5 Literaturverzeichnis .....	vii

Veröffentlicht unter CC BY-ND



---

---

## Abkürzungsverzeichnis

---

Auto-ID-Technologie	Autoidentifikationstechnologien
AK	Anschaffungskosten
BO	Bellman'sches Optimalitätsprinzip
DO	Dynamische Optimierung
FTAG	Fuzzy TOPSIS mit AHP Gewichtungsfaktoren
HF	High Frequency
LF	Low Frequency
OC	Optische Codes
OCR	Optical Character Recognition
KLT	Kleinladungsträger
PTW	Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen
RFID	Radio Frequency Identification
TNW	Teilnutzwert
TP	Teilprozess
UHF	Ultra High Frequency
WE	Wareneingang
WE/WA	Wareneingang und -ausgang
ZF	Zielfunktionswert

---

## 1 Einleitung

---

Eine wesentliche Voraussetzung intelligenter und vernetzter Produktionssysteme sind Bauteile als Informationsträger, welche in der Lage sind mit den Produktionsressourcen zu kommunizieren. Die Plattform Industrie 4.0 spricht von Industrie 4.0 Komponenten.<sup>1</sup> Die Kommunikation zwischen den Produktionsressourcen und den Bauteilen kann sowohl passiv als auch aktiv erfolgen. Im Rahmen dieser Arbeit wird die passive Kommunikation betrachtet, d.h. die Erfassung der Werkstücke über eine eindeutige Identifikation mit Hilfe von Autoidentifikationstechnologien (Auto-ID-Technologie). Darunter werden optische Verfahren, z.B. ein lasergravierter Data Matrix-Code, oder funkbasierte Auto-ID-Technologien, z.B. RFID, verstanden. Die Zuordnung zu dem jeweiligen Bauteil soll dabei über den gesamten Wertstrom nicht verloren gehen.

### **Problemstellung und Zielsetzung**

Die Liste der Auto-ID-Systeme umfasst eine Vielzahl unterschiedlicher Technologien mit verschiedenen Eigenschaften. Damit ist nicht jede Technologie gleichermaßen für alle Fertigungsprozesse geeignet. Zur Auswahl einer optimalen Auto-ID-Technologie für bestimmte Teilprozesse wurde bereits ein Entscheidungsmodell (FTAG-Methode) entwickelt.<sup>2</sup> Das Ziel des vorliegenden Beitrags ist zum einen das Aufzeigen einer Methode zum Auffinden geeigneter Markierungsflächen (Kapitel 2). Zum anderen wird eine Erweiterung der FTAG-Methode vorgestellt. Hierbei wird die Maximierung des Gesamtnutzwertes über alle Teilprozesse mit Hilfe des Bellman'schen Optimalitätsprinzip (BO) mathematisch modelliert (Kapitel 3). Diese Erweiterung ist notwendig, um die optimale Markierungsstrategie wertstromdurchgängig zu realisieren.

---

<sup>1</sup> Vgl. VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA) 2014, S. 15ff.

<sup>2</sup> Vgl. Wank et al. 2017.

---

---

## 2 Entwicklung eines Flächenauswahlmodells

---

Für die Auswahl der optimalen Markierungsfläche gibt es zwei verschiedene Lösungswege. Entweder kann dies durch die Bewertung der Flächen aus prozesstechnischer Sicht erfolgen und zum anderen durch die Bewertung der flächentechnischen Eigenschaften (z.B. Größe der Fläche).

### **Bewertung der Flächen aus prozesstechnischer Sicht**

Die prozesstechnischen Unterscheidungsmerkmale beziehen sich auf die **Anzahl der Entkopplungspunkte** und die **Anzahl der Markierungsvorgänge** in einem Bauteilwertstrom. Das Ziel ist die Minimierung der Anzahl der Entkopplungspunkte oder der Markierungsvorgänge im Wertstrom. Als **Entkopplungspunkte** werden Punkte in einem Wertstrom bezeichnet, an denen eine Markierung am Bauteil bzw. an einer einzelnen Bauteilfläche nicht möglich ist bzw. zerstört wird. Das kann z.B. ein Fräsprozess sein, der eine aufgebrauchte Markierung zerstört. Entkopplungspunkte können für ein ganzes Bauteil (**totaler Entkopplungspunkt**) oder nur für einzelne Fläche (**partieller Entkopplungspunkt**) gelten. Bei totalen Entkopplungspunkten ist zunächst keine durchgängige Bauteilrückverfolgung möglich. Bei einer partiellen Entkopplung kann auf weitere mögliche Flächen ausgewichen werden. Dieser Flächenwechsel garantiert eine lückenlose Erfassung, jedoch müssen Kosten für den erneuten Markierungsvorgang und die höheren Prozesszeiten berücksichtigt werden. Als **Markierungsvorgang** wird der Prozess der Bauteilmarkierung mit einer Auto-ID-Technologie bezeichnet. Ein Markierungsvorgang ist z.B. das Aufbringen eines nadelmarkierten QR-Codes oder das Kleben von RFID-Transpondern. Im Optimalfall erfolgt der Markierungsvorgang nur einmal während des Bauteilwertstroms. Dies ist aber nur bei Wertströmen ohne totalen Entkopplungspunkt möglich. Beim Auftreten von totalen Entkopplungspunkten im Wertstrom sind erneut Markierungsvorgänge durchzuführen, um die Zuordnung zum Bauteil nicht zu verlieren. Im Falle eines partiellen Entkopplungspunktes sollte der erneute Markierungsvorgang vor Zerstörung der bestehenden Markierung auf eine weitere Markierungsfläche erfolgen. Somit wird die wertstromdurchgängige Erfassung des Bauteils, trotz partiellen Entkopplungspunktes, gewährleistet.

Die Voraussetzung für den Start des Flächenauswahlmodells ist eine Analyse der Prozesse und Bauteile. In dieser werden alle nötigen Informationen für die Bestimmung der optimalen Markierungsfläche aufgenommen und zusammengetragen. Die notwendigen Informationen aus dieser Methode werden hier vorausgesetzt. Die Darstellung des Bauteilwertstroms zur Flächenauswahl erfolgt zunächst in Form eines Prozessdiagramms. In Abbildung 1 ist ein

beispielhafter Prozess abgebildet. Auf dieser Basis können die im Folgenden dargestellten Szenarien für Markierungsflächen abgeleitet werden.

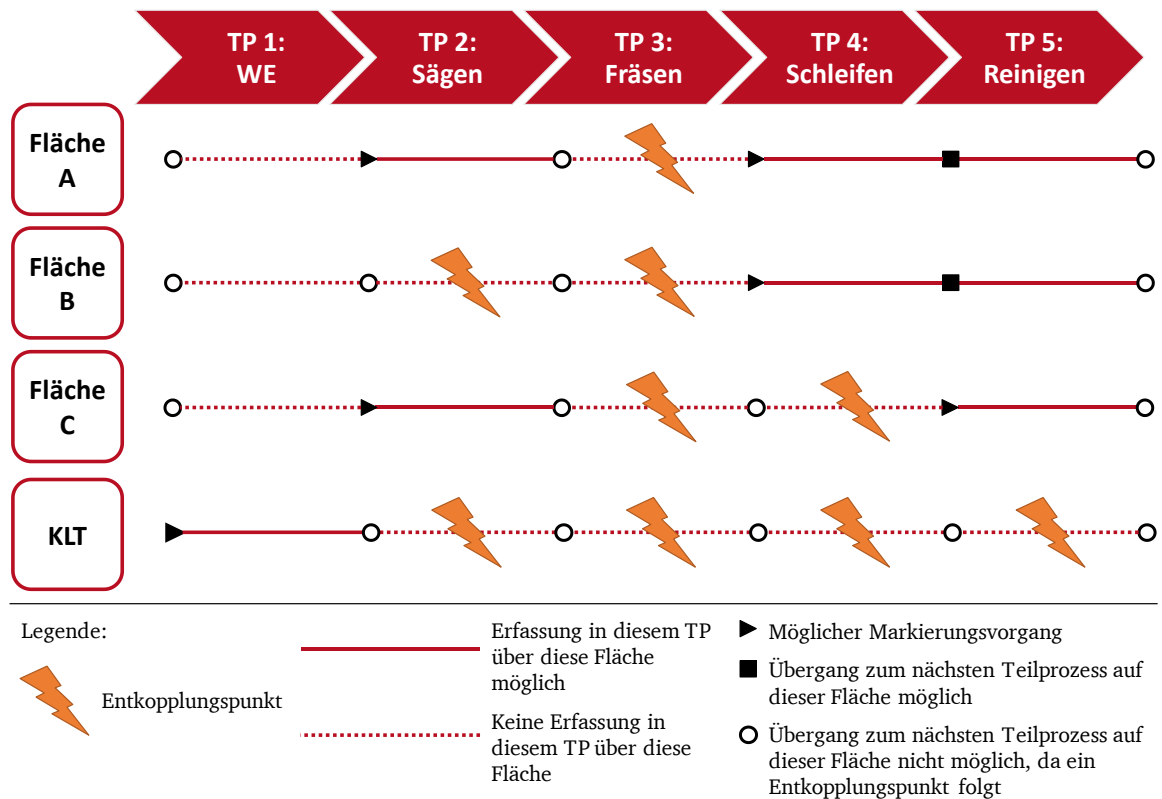


Abbildung 1: Beispielhaftes Prozessdiagramm - gemischte Entkopplungspunkte (Quelle: Eigene Darstellung)

Zunächst ist der Wertstrom des Bauteils auf markierbare wertstromdurchgängige Flächen zu untersuchen. Im Fall einer wertstromdurchgängigen Fläche (**Szenario a**) ist die Auswahl unkompliziert. Bei mehreren Flächen werden die Flächenkriterien einer Rangfolgenbewertung (vgl. Tabelle 1) genutzt und die am besten bewertete Fläche ausgewählt. Die Flächenauswahl ist abgeschlossen.

Im Falle von Entkopplungspunkten ist die Art des Entkopplungspunkts entscheidend (**Szenario b**). Die Unterscheidung erfolgt in Wertströme mit ausschließlich totalen Entkopplungspunkten (**Szenario b.1**), ausschließlich partiellen Entkopplungspunkten (**Szenario b.2**) sowie gemischten Entkopplungspunkten (**Szenario b.3**).

Bei ausschließlich totalen Entkopplungspunkten (**Szenario b.1**) wird eine Rangfolgenbewertung der Flächen benötigt. Da nur totale Entkopplungspunkte vorhanden sind, ist die Anzahl der Entkopplungspunkte und Markierungsvorgänge für alle Flächen identisch.

Bei ausschließlich partiellen Entkopplungspunkten (**Szenario b.2**) ist eine wertstromdurchgängige Erfassung möglich, obwohl es keine wertstromdurchgängige Fläche

---

gibt. Dazu wird die Markierungsfläche während des Wertstroms gewechselt, was mit Markierungs- und Prozesskosten verbunden ist. An dieser Stelle wird das Prozessdiagramm betrachtet und der Markierungspfad mit der minimalen Anzahl an Markierungsvorgängen ermittelt. Bei mehreren prozesstechnisch gleichwertigen Markierungspfaden sind erneut die Flächen zu bewerten.

In **Szenario b.3** existiert eine Kombination von totalen und partiellen Entkopplungspunkten. In diesem Szenario wird ebenfalls der Markierungspfad mit der minimalen Anzahl der Markierungsvorgänge gesucht und bei Gleichwertigkeit die Rangfolgenbewertung zur Auswahl herangezogen. Die besten Flächen der Markierungspfade werden identifiziert und ausgewählt.

Zusammenfassend können die folgenden Entscheidungsregeln für die Auswahl der optimalen Markierungsfläche formuliert werden:

- Bei **wertstromdurchgängigen Flächen (a)** und **totalen Entkopplungspunkten (b.1)**:
  - ➔ „Minimiere die Anzahl der Entkopplungspunkte. Eine wertstromdurchgängige Fläche ist zu jedem Zeitpunkt allen anderen Flächen mit Entkopplungspunkt vorzuziehen.“
- Bei **partiellen (b.2)** und **gemischten (b.3)** Entkopplungspunkten:
  - ➔ „Minimiere die Anzahl der Markierungsvorgänge in einem Wertstrom.“

### Bewertung der flächentechnischen Eigenschaften

Bei **prozesstechnischer Gleichwertigkeit**, d.h. sofern keine Unterscheidung aufgrund von prozesstechnischen Kriterien (z.B. Entkopplungspunkten) möglich ist, erfolgt eine Rangfolgenbewertung anhand flächenspezifischer Kriterien. Diese bewerten eine Fläche hinsichtlich ihrer allgemeinen Tauglichkeit für eine Markierung und haben einen universellen Charakter, sodass sie auf jede Fläche anwendbar sind. Die Prüfkriterien setzen sich aus geometrischen und technischen Eigenschaften zusammen.

Tabelle 1: Flächenkriterien zur Rangfolgenbewertung von Markierungsflächen (Quelle: Eigene Darstellung)

Reihenfolge der Prüfung	Prüfkriterium	Optimale Ausprägung
1.	Geometrie	plan
2.	Größe der Fläche	groß
3.	Oberflächengüte	fein



---

Die Prüfkriterien werden dabei nicht quantitativ erfasst, sondern durch eine Sichtprüfung bewertet. So werden die Flächen an erster Stelle durch ihre Flächengeometrie bewertet. Die Flächengeometrie ist dann optimal, wenn eine Fläche plan bzw. eben ist. An zweiter Stelle wird die Größe der Fläche bewertet, hier gilt: Je größer die Fläche, desto besser. Zuletzt wird die Oberflächenbeschaffenheit der Fläche geprüft und es gilt: Je feiner die Fläche, desto besser. Aus diesen drei Kriterien ergibt sich eine Rangfolge.

---

### 3 Dynamische Optimierung

---

Im Folgenden ist eine Erweiterung der zuvor erwähnten FTAG-Methode dargestellt. Die FTAG-Methode bewertet die Auto-ID-Technologien für die einzelnen Teilprozesse des Wertstroms anhand vorher festgelegter Zielgrößen (z.B. Lesegeschwindigkeit, Einfluss durch Nässe hinsichtlich der Anwendbarkeit).<sup>3</sup> Diese Methode wird im Folgenden zur Findung einer wertstromdurchgängigen Lösung über alle Teilprozesse erweitert. Folgende Anforderungen werden an das Modell gestellt:

Das Modell muss

- die Fähigkeit besitzen, den Gesamtnutzwert unter Beachtung aller Teilnutzwerte der Nebenbedingungen sowie der Korrelationen zwischen den Teilnutzwerten (dynamische Abhängigkeiten) zu maximieren,
- die Berücksichtigung und Gewichtung der Präferenzen eines Entscheidungsträgers ermöglichen,
- eine möglichst geringe Komplexität aufweisen, um auch für ungeschulte Anwender (mittleres Management eines kleinen oder mittelständischen Unternehmens (KMU)) anwendbar zu bleiben,
- einen geringen Aufwand bei der Herbeiführung der Entscheidung aufweisen (effiziente Vorgehensweise),
- qualitativ hochwertige Ergebnisse liefern, die belastbar bzw. zuverlässig sind,
- im Ergebnis eine vollständige Rangordnung darstellen, welche die Kombinationen der Auto-ID-Technologien für die jeweiligen Teilprozesse enthält,
- der Modellcharakterisierung entsprechen, welche für eine systematische Untersuchung<sup>4</sup> aufzustellen ist (siehe Tabelle 2).

Zur Lösung des dargestellten Problems werden Methoden zur Entscheidungsunterstützung aus dem Bereich der Operations Research auf Eignung untersucht. Auf Basis der Anforderungen können bereits im Vorfeld einige Teilgebiete ausgeschlossen werden. So können die lineare und nichtlineare Optimierung ausgeschlossen werden, weil diese keine dynamischen Abhängigkeiten abbilden. Lagerhaltungs- und Warteschlangenmodelle kommen aufgrund ihrer hohen Spezialisierung nicht in Frage. Weiter ist die Spieltheorie

---

<sup>3</sup> Vgl. Wank et al. 2017.

<sup>4</sup> Vgl. Domschke et al. 2015, 4 ff.; vgl. Domschke und Scholl 2008, 30 ff.; vgl. Adam 1997, 81 ff.; vgl. Adam und Witte 1976, 1 ff.; vgl. Rommelfanger und Eickemeier 2002, 25 f.

ebenfalls auszuschließen, da sie gegen die Anforderung der Anzahl der Entscheidungsträger verstößt. Zuletzt werden Simulationen ausgeschlossen, da die vorliegende Problemstellung nicht zeitabhängig ist und eine Simulation auch aufgrund des hohen Aufwandes bei der Erstellung nicht in Frage kommt.

Tabelle 2: Die Charakterisierungs-Kriterien und Ausprägungen des Modells

<b>Anzahl der Ziele</b>	Einkriterielles Modell (Maximierung des Gesamtnutzwertes)
<b>Einsatzzweck</b>	Optimierungs- / Entscheidungsmodell
<b>Anzahl der Entscheidungsträger</b>	Einzelner Entscheidungsträger
<b>Art der Abstraktion</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nicht-zeitübergreifendes (statisches) Modell</li> <li>• Geschlossenes Modell (sowohl bzgl. Entscheidungsverhalten als auch bzgl. Zeitablaufbezogenheit)</li> <li>• Partialmodell</li> </ul>
<b>Typ der Zielfunktion</b>	Bestimmt durch Entscheidungsmodell selbst
<b>Informationsgrad</b>	Deterministisches Modell (Informationen über Umwelteinflüsse und Konsequenzen der Technologien sind sicher)
<b>Art der Information</b>	Quantitative Informationen (messbare Daten)
<b>Darstellungsform</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mathematische Darstellungsform</li> <li>• evtl. grafische Darstellung der Ergebnisse</li> </ul>

Die FTAG-Methode, das Standort-, Transport- und Knapsack-Problem können dynamische Abhängigkeiten nur mit großem Mehraufwand abbilden. So müsste entweder unter hohem Aufwand jeder Teilnutzwert aller Technologiekombinationen vor dem Einsatz der Methode berechnet werden oder die Methoden müssten schrittweise durchgeführt werden.

Das Travelling-Salesman-Problem ist ungeeignet den Gesamtnutzwert zu maximieren. Die Struktur des Problems zielt darauf ab, dass alle Alternativen in die Lösung aufgenommen werden. Dies steht aber im Widerspruch zur vorliegenden Problemstellung, die lediglich maximale Alternativen in die Lösungsmenge aufnehmen möchte.

Einen ebenfalls zu hohen Aufwand stellt die vollständige Enumeration dar, da sie den maximalen Gesamtnutzwert des Prozesses durch die Berechnung aller Technologiekombinationen ermittelt.

Das Branch&Bound-Verfahren stellt grundsätzlich einen möglichen Lösungsweg bereit, jedoch ist dieser auch nur umsetzbar, wenn das Modell einigen Modifikationen unterzogen wird. Die Schrankenbedingungen müssten angepasst oder vernachlässigt werden. Da keine stetige Optimierung stattfindet, können diese nicht genutzt werden.

Die dynamische Optimierung (DO) bietet mit dem Bellman'schen Optimalitätsprinzip eine gute Möglichkeit mit verhältnismäßigem Aufwand zu einer Lösung zu gelangen. Durch die schrittweise Vorgehensweise ist es möglich, die dynamischen Abhängigkeiten abzubilden. Bei sehr umfangreichen Problemen, also einem Prozess, der aus mehreren Teilprozessen mit Technologiealternativen besteht, ist die Unterstützung durch eine Software zu empfehlen.

---

## Optimalitätsprinzip von Bellman

Die DO ist ein Teilgebiet des Operations Research und ein direktes Anwendungsgebiet der kombinatorischen Optimierung.<sup>5</sup> Probleme der kombinatorischen Optimierung behandeln die Auswahl von Lösungen aus einer abzählbaren Lösungsmenge, wobei während des Auswahlprozesses eine Gütefunktion minimiert oder maximiert wird.<sup>6 7</sup> Mit der DO können zustandsabhängige Entscheidungen berücksichtigt werden. Dazu wird das Problem zunächst in einzelne Teilprobleme zerlegt und über die optimale Lösung der Teilprobleme das Gesamtproblem optimiert. Die abhängige Entscheidung ist eine Entscheidung über die Auswahl der Auto-ID-Technologie in Teilprozess (TP)  $k$ , abhängig von der Auswahlentscheidung in TP  $k - 1$ . Es handelt sich folglich um ein sequentielles Lösungsverfahren bzw. um ein Lösungsprinzip und weniger um einem Algorithmus, bei dem auf jeder Stufe eine neue abhängige Entscheidung getroffen wird.<sup>8 9</sup> Der Begriff „Dynamik“ bezeichnet hierbei keine zeitliche Abfolge von Teilentscheidungen, sondern die Dynamik des Prozesses durch Teilentscheidung.<sup>10</sup> Dieses Lösungsprinzip wurde von R. E. Bellman entwickelt und wird als Bellman'sches Optimalitätsprinzip bezeichnet:

*„An optimal policy has the property that whatever the initial state and initial decision are, the remaining decisions must constitute an optimal policy with regard to the state resulting from the first decision.”<sup>11</sup>*

Das Prinzip besagt, dass ungeachtet des Anfangszustandes die verbleibende Entscheidungspolitik eine optimale Folge von Entscheidungen ist, die aus der ersten Entscheidung und dessen Zustand resultiert. In Bezug auf den vorliegenden Beitrag bedeutet dies, dass die Entscheidung auf einer beliebigen Stufe des Wertstroms nur von der Entscheidung der vorherigen Stufe abhängt. Auf Basis des Optimalitätsprinzips von Bellman wird bei einer DO die optimale Entscheidungspolitik durch eine Vorwärts- oder

---

<sup>5</sup> Papageorgiou et al. 2012, S. 337.

<sup>6</sup> Papageorgiou et al. 2012, S. 161.

<sup>7</sup> Domschke et al. 2015, S. 166.

<sup>8</sup> Domschke et al. 2015, 165f.

<sup>9</sup> Domschke et al. 2015, S. 165.

<sup>10</sup> Zimmermann 2008, S. 233.

<sup>11</sup> Bellman 1957, S. 83.

Rückwärtsrekursion ermittelt, die auf die Bellman'sche Funktionsgleichung führt.<sup>12</sup> Im Folgenden wird die allgemeine Form anhand einer Maximierungsfunktion dargestellt und am Beispiel des Auswahlproblems der Auto-ID-Technologien erklärt.

$$\text{Maximiere } F(x_1 \dots x_n) = \sum_{k=1}^n f_k(z_{k-1}, x_k)$$

unter den Nebenbedingungen

$$z_k = t_k(z_{k-1}, x_k) \quad \forall k = 1, \dots, n$$

$$z_0 = \alpha$$

$$z_k \in Z_k \quad \forall k = 1, \dots, n$$

$$x_k \in X_k(z_{k-1},) \quad \forall k = 1, \dots, n$$

Die verwendeten Beziehungen sind wie folgt definiert:

- $n$       **Anzahl der Stufen (Teilprobleme)**, in die der Entscheidungsprozess (Gesamtproblem) unterteilt wird. Dies ist die Anzahl der TP innerhalb des Bauteilwertstroms.
- $z_k$       **Zustandsvariable** zur Beschreibung des Zustands, in dem sich das vorliegende Problem oder System nach der Entscheidung  $x_k$  am Ende der Stufe  $k$  befindet. Beispielsweise die ausgewählte Auto-ID-Technologie am Ende eines TP, wie z.B. eine Lasermarkierung in Form eines Data Matrix Codes am Ende des TP 1.
- $Z_k$       **Zustandsmenge** oder **-bereich**: Bezeichnet die Menge aller Zustände, in dem das Problem oder System am Ende der Stufe  $k$  vorliegen kann. Damit sind alle möglichen Auto-ID-Technologien am Ende jedes TP gemeint.
- $z_0 = \alpha$       **Anfangszustand** (in Stufe 0): In Bezug auf das Auswahlproblem stellt der Anfangszustand die Auswahl der Technologie nach dem Initialisierungsprozess der FTAG-Methode dar. Die Auto-ID-Technologie mit dem höchsten Nutzwert wird ausgewählt und damit der Anfangszustand  $z_0$  in Stufe 0 bestimmt.
- $Z_n$       Menge möglicher oder vorgegebener **Endzustände** (am Ende von Stufe  $n$ ). Diese Größe kann im Auswahlproblem identisch mit der Variable  $Z_k$  sein. Es

---

<sup>12</sup> Domschke et al. 2015, S. 171.

	sei denn eine Auto-ID-Technologie kann für den letzten TP nicht mehr ausgewählt werden, weil sie sich nicht für den TP eignet.
$x_k$	<b>Entscheidungsvariable</b> des Modells: Bezeichnet eine Entscheidung in Stufe $k$ aus der Entscheidungsmenge. Im Auswahlproblem kann die Entscheidungsvariable grundsätzlich eine der möglichen Auto-ID-Technologien, wie z.B. $x_1 = RFID (HF)$ , annehmen.
$X_k(z_{k-1})$	<b>Entscheidungsmenge</b> oder <b>-bereich</b> : Bezeichnet die Menge aller Entscheidungen, aus denen in Stufe $k$ ausgehend vom Zustand $z_{k-1}$ , gewählt werden kann. Je nach TP können das verschiedene Auto-ID-Technologien sein, da nicht alle Technologien für jeden TP geeignet sind. Damit variiert diese Entscheidungsmenge.
$t_k(z_{k-1}, x_k)$	<b>Transformationsfunktion</b> : Die Funktion beschreibt die Zustandsänderung des Systems, wenn der Zustand $z_{k-1}$ in Stufe $k-1$ unter der Berücksichtigung der Entscheidung $x_k$ in den Zustand $z_k$ übergeht. Im Auswahlproblem beschreibt die Transformationsfunktion die mögliche Änderung der Auto-ID-Technologie zwischen den TP. Die Funktion kann wie folgt aussehen: $z_1 = x_1 = RFID (HF)$ . Die Zustandsvariable nimmt den Zustand der aktuellen Auswahlentscheidung in Stufe 1 an.
$f_k(z_{k-1}, x_k)$	<b>Stufen- bzw. periodenbezogene Zielfunktion</b> : Die Zielfunktion beschreibt den Einfluss auf den Zielfunktionswert, den die Entscheidung $x_k$ unter Berücksichtigung des Zustands $z_{k-1}$ besitzt. Die Schreibweise bringt zum Ausdruck, dass $f_k$ lediglich von $z_{k-1}$ und $x_k$ , nicht aber von vorherigen Zuständen, die das System einmal angenommen hat, oder von nachfolgenden Zuständen, die es einmal einnehmen wird, abhängt. Genau diese bereits o.g. Eigenschaft müssen alle mit DO lösbaren Probleme besitzen. Im Sinne des Auswahlproblems berechnet die stufenbezogene Zielfunktion auf jeder Stufe den Nutzen einer Auto-ID-Technologie. Die Zielfunktion für eine Auto-ID-Technologie $i$ auf der Stufe $k$ kann z.B. lauten: $f_{k,i} = TNW(x_{k,i})$ . Die stufenweise Zielfunktion für den Initiierungsprozess lautet $f(x_{0,i,j}) = \max\{TNW(z_0; x_{0,i,j})\}$ . Dieser gibt den maximalen Teilnutzwert über alle Teilprozesse $j$ wieder. $z_0$ beschreibt den Anfangszustand zur Stufe 0 mit der Entscheidung $x_{0,i,j}$ .

An der letztgenannten stufenbezogenen Zielfunktion wird der Vorteil der DO deutlich. Die Funktion berücksichtigt, welcher Zustand  $z_{k-1}$  in der vorherigen Stufe vorherrscht und auf

---

dessen Basis wird eine Entscheidung für die folgende Stufe getroffen. Als dynamische Abhängigkeit wird die Abhängigkeit von Zielgrößen zwischen verschiedenen Stufen des Wertstroms bezeichnet. Wird eine Entscheidung zugunsten einer beliebigen Technologie getroffen, verändern sich verschiedene Teilnutzwerte (TNW) der Zielgrößen dieser Technologie für die restlichen TP. Die Veränderungen der TNW können Auswirkungen auf die verbleibende Entscheidungspolitik haben, weil eine Technologie aufgrund vorheriger Entscheidungen zum Beispiel eine bessere Zielerfüllung aufweist, als zunächst angenommen. An dieser Stelle werden drei dynamische Abhängigkeiten berücksichtigt. Dazu zählen die monetäre Zielgröße „Anschaffungskosten“ und die nicht-monetären Zielgrößen „Faktor Mensch“ sowie „Markierzeit“. Die drei Abhängigkeiten werden nachfolgend beschrieben.

### **Anschaffungskosten**

Wird eine Auto-ID-Technologie für einen TP ausgewählt, müssen entsprechende Geräte für den Markierungsvorgang angeschafft werden. Die Anschaffungskosten für das Markiergerät werden nur einmalig fällig, wenn Markierungen späterer Teilprozesse über das selbe Markierungsgerät erfolgen. Der monetäre Nutzwert für die ausgewählte Markierungstechnologie verbessert sich in den Stufen, in denen das Markierungsgerät ebenfalls verwendet wird.

### **Prozesszeit für den Markierungsvorgang („zusätzliche Anbringungszeit“)**

Eine weitere Abhängigkeit stellt die zusätzliche Prozesszeit durch erneute Markierungsvorgänge dar. Ein erneuter Markierungsvorgang liegt dann vor, wenn ein Entkopplungspunkt im Wertstrom vorhanden ist und das Bauteil aufgrund dessen erneut markiert wird. Die Prozesszeit wird durch die Anzahl der Markierungsmaschinen, die Transportzeit zu einer Markierungsmaschine und der Bearbeitungszeit des Markierungsvorgangs beeinflusst. Es wird vorausgesetzt, dass nur ein Markiergerät bei gleicher Kennzeichnungstechnologie über alle TP, mit Ausnahme von RFID-Markiergeräten, angeschafft wird. Hierdurch werden jedoch längere Transportwege ausgelöst. Die Markierzeit wird als „zusätzliche Anbringungszeit“ bezeichnet. Sie hat einen negativen Einfluss auf den TNW der ausgewählten Markierungstechnologie.

### **Faktor Mensch**

Unter der dynamischen Abhängigkeit „Faktor Mensch“ werden alle Einflüsse von menschlichen Faktoren bei der Einführung einer zweiten Auto-ID-Technologie im Wertstrom verstanden. Darunter ist z.B. der Anstieg von menschlichen Fehlern bei der Verwendung von verschiedenen Technologien zu verstehen. Wird die erste Markierungstechnologie im

---

Initialisierungsprozess der FTAG-Methode ausgewählt, so hat der „Faktor Mensch“ einen positiven Einfluss auf den TNW der ausgewählten Technologie. Der Nutzwert der Zielgröße „Faktor Mensch“ erhöht sich für die ausgewählte Technologie, während dieser sich für die noch nicht ausgewählten Technologien verringert.



---

---

## 4 Zusammenfassung

---

Das Ziel des vorliegenden Beitrags ist die Vorstellung von Methoden zur Identifizierung optimaler Markierungsflächen und optimaler Technologien über verschiedene Teilprozesse für die Bauteilrückverfolgung. Dabei wird zum einen ein Vorgehen aufgezeigt mit welchem unter der Berücksichtigung von totalen, partiellen oder gemischten Entkopplungspunkten geeignete Markierungsflächen auf Bauteilen identifizierbar sind. Zum anderen ist eine Erweiterung eines bestehenden Entscheidungsmodells zur Identifizierung der optimalen Auto-ID-Technologie für Teilprozesse dargestellt. Mittels der Erweiterung kann wertstromübergreifend und damit über alle Teilprozesse unter Berücksichtigung dynamischer Abhängigkeiten eine optimale Lösung gefunden werden. Zu den dynamischen Abhängigkeiten zählen die monetäre Zielgröße „Anschaffungskosten“ und die nicht-monetären Zielgrößen „Faktor Mensch“ sowie „Markierzeit“. Die zwei Methoden sind dabei Arbeitspakete einer Methodik zur Wertstromintegration aktiver Traceability in diskrete Fertigungsprozesse. Im Folgenden gilt es die Methoden zu einer Gesamtmethodik zu verknüpfen und durch Anwendungen zu validieren.

---

---

## 5 Literaturverzeichnis

---

- Bellman, Richard (1957): *Dynamic Programming*. New Jersey: Princeton University Press.
- Domschke, Wolfgang; Drexl, Andreas; Klein, Robert; Scholl, Armin (2015): *Einführung in Operations Research*. 9., überarbeitete und verbesserte Auflage 2015. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-48216-2>.
- Krüger, Jon (2018): *Modellierung und Anwendung eines Entscheidungsmodells zur wertstromübergreifenden Technologieauswahl von Autoidentifikationstechnologien im Kontext Industrie 4.0*. Studienarbeit. Technische Universität Darmstadt. PTW.
- Papageorgiou, Markos; Leibold, Marion; Buss, Martin (2012): *Optimierung. Statische, dynamische, stochastische Verfahren für die Anwendung*. 3., neu bearb. u. erg. Aufl. 2012. Berlin, Heidelberg: Springer. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-34013-3>.
- Stähle, Justus (2017): *Modellierung und Anwendung eines Entscheidungsproblems zur wertstromübergreifenden Technologieauswahl von Autoidentifikationstechnologien im Kontext 4.0*. Studienarbeit. Technische Universität, Darmstadt. PTW.
- VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA) (Hg.) (2014): *Industrie 4.0. Gegenstände, Entitäten, Komponenten. Statusreport*. Online verfügbar unter [https://www.vdi.de/fileadmin/vdi\\_de/redakteur\\_dateien/sk\\_dateien/VDI\\_Industrie\\_4.0\\_Komponenten\\_2014.pdf](https://www.vdi.de/fileadmin/vdi_de/redakteur_dateien/sk_dateien/VDI_Industrie_4.0_Komponenten_2014.pdf), zuletzt geprüft am 05.07.2016.
- Wank, A.; Paul, P.; Metternich, J. (2017): *Decision model for technical value-stream integration of active component traceability*. In: *DEStech Transactions on Engineering and Technology Research (icpr)*, S. 645–651. Online verfügbar unter <http://dpi-proceedings.com/index.php/dtetr/article/view/17685/17191>, zuletzt geprüft am 26.01.2018.
- Zimmermann, Hans-Jürgen (2008): *Operations Research. Methoden und Modelle. Für Wirtschaftsingenieure, Betriebswirte, Informatiker*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.