

Optimierung von Steuergerätevarianten unter Berücksichtigung der Kundenbestellungen

Optimization of Variants of Electronic Control Units under Consideration of Customer Orders

Dipl.-Ing. (FH) **B. Hardung**, Dr. techn. **A. Krüger**, MBA, AUDI AG, Ingolstadt;

Th. Kollert, TU Darmstadt, Darmstadt;

PD Dr.-Ing. **G. Kókai**, Friedrich-Alexander-Universität, Erlangen

Kurzfassung

In modernen Fahrzeugen wird eine Vielzahl von Funktionen auf einzelnen Steuergeräten integriert. Bei einigen dieser Funktionen handelt es sich um vom Kunden optional bestellbare Ausstattungen. Um Kosten zu reduzieren, gibt es Varianten dieser Steuergeräte, die sich in Hardware und Software unterscheiden. Die Varianten werden zum Beispiel gebildet, indem Teile der Platine nicht bestückt werden. Jede zusätzliche Variante verursacht Kosten für Logistik und Entwicklung. Heute ist der Prozess der Bestimmung der Varianten nicht automatisiert. Nicht-technische Abhängigkeiten, wie Ausstattungspakete oder häufig miteinander bestellte Ausstattungen können nur mit großem Aufwand berücksichtigt werden. In diesem Artikel wird das Problem der Variantenoptimierung erläutert und gezeigt, wie existierende Informationen auf Seiten des Fahrzeugherstellers als Basis für eine Optimierung der Varianten genutzt werden können. Weiterhin wird erklärt, wie das Variantenoptimierungsproblem in ein einfaches Standortproblem transformiert und gelöst werden kann. Abschließend wird das Einsparpotential anhand eines realen Beispiels aufgezeigt.

Abstract

In modern cars, an increasing number of functions is integrated together in single control units. Some of the functions can be ordered as optional equipment by the customer. To reduce costs, variants of the control units are created that differ in hardware and software. The variants are created for instance by not populating sections of the circuit board. Each additional variant of a control unit causes expenses for logistics and development. Today the process for the determination of the variants is not automated. Non-technical dependencies, like packages of equipment or common ordered combinations of equipment can only partially taken into account. In this article we formulate this problem and show how existing

information on the manufacturer's side can serve as a base for an optimization of the variants. We also show, how the problem can be transformed into a warehouse location problem and solved. Finally the results of an application example are shown.

1. Einleitung

Heutige Fahrzeuge besitzen komplexe verteilte Systeme von Steuergeräten, die über verschiedene Bussysteme vernetzt sind. Bis zu 80 Netzknoten befinden sich in einem einzigen Fahrzeug. Um dem weiterhin ungebrochenen Trend zu mehr Funktionen sowie dem Kostendruck in der Elektronik zu begegnen, werden mehr und mehr Funktionen gemeinsam in einzelne Steuergeräte integriert.

Von diesen vielen Funktionen können einige vom Kunden optional bestellt werden. Diese werden dann häufig von Steuergeräten erfüllt, die in jedem Fahrzeug verbaut werden müssen. Um Kosten zu sparen, werden von solchen Steuergeräten Varianten gebildet.

Jede zusätzliche Variante verursacht sowohl auf Seiten des Zulieferers wie auch des Fahrzeugherstellers hohen Aufwand für Logistik und Entwicklung. Aus diesem Grund ist es meist nicht möglich, für jede in Frage kommende Kundenbestellung eine maßgeschneiderte Variante eines Steuergeräts zu verbauen. Vielmehr wird die günstigste verfügbare Variante benutzt, die als Mindestanforderung alle bestellten Funktionen ausführen kann.

Dieser Artikel beschreibt, wie reale Produktionsdaten aktueller Fahrzeugmodelle als Prognose für die Kundenbestellungen in der Zukunft verwendet werden können. Es wird gezeigt, wie diese Daten berücksichtigt werden können, um die Konfiguration der Varianten eines Steuergeräts zu optimieren. Ziel ist dabei eine Minimierung der durchschnittlichen Kosten pro Fahrzeug.

Nach heutigem Stand werden für die Bestimmung der Steuergerätevarianten die Bestellraten einzelner Ausstattungen sowie technische Zusammenhänge zugrunde gelegt. Die Bestimmung der Varianten eines Steuergeräts erfolgt in einem nicht automatisierten, aufwändigen Abstimmungsprozess. Nicht-technische Abhängigkeiten, wie zum Beispiel Ausstattungspakete oder durch Kunden häufig kombinierte Ausstattungen können nur teilweise berücksichtigt werden.

In diesem Artikel wird zunächst das Problem ausführlich beschrieben (Kapitel 2) und in Kapitel 3 ein Optimierungsverfahren vorgestellt, mit dem das Optimum unter detaillierter Berücksichtigung der Kundenbestellungen bestimmt werden kann.

Anschließend wird in Kapitel 4 ein reales Anwendungsbeispiel vorgestellt. Dabei wird aufgezeigt, dass im Vergleich zu einer manuellen Bestimmung der Varianten ein Einsparpotential von bis zu 1 € pro Fahrzeug für ein Steuergerät erzielt werden kann. Abschließend werden die Ergebnisse in Kapitel 5 zusammengefasst.

2. Beschreibung des Variantenoptimierungsproblems

In diesem Kapitel wird erklärt, wie Varianten eines Steuergeräts entstehen und welche Voraussetzungen erfüllt sein müssen, damit Varianten überhaupt gebildet werden können. Weiterhin werden Begriffe eingeführt, die im weiteren Verlauf des Artikels verwendet werden. Abschließend wird erläutert, welche Eingangsdaten benutzt werden und was bei ihrer Benutzung zu beachten ist.

2.1 Varianten eines Steuergerätes

Dem stetigen Trend zu erhöhter Funktionalität wird durch eine steigende Anzahl von integrierten Funktionen auf einzelnen Steuergeräten begegnet. Dabei müssen Steuergeräte oft die Funktionalität von vielen Mehrausstattungen ausführen.

Von solchen Steuergeräten werden Varianten gebildet, die sich in Hardware und Software unterscheiden. Was Hardware betrifft werden zum Beispiel je nach Kundenbestellung bestimmte Teile der Platine in einer Variante nicht bestückt. Eine weiterführende Möglichkeit ist es, sogar verschiedene Gehäuse- und/oder Platinengrößen zu verbauen, um bei Varianten mit wenig Funktionalität weitere Einsparungen zu erzielen.

Da die größten Einsparungen auf Seiten der Hardware zu erwarten sind, wird häufig eine einzige Software erstellt, die für alle Varianten gleich ist. Um Fehlermeldungen bei fehlender Rückmeldung durch die Hardware vorzubeugen, wird diese Software durch Codierung entsprechend parametrisiert.

2.2 Begriffsdefinitionen

Im Folgenden werden Begriffe definiert, die im weiteren Verlauf für das Verständnis notwendig sind.

- M-Ausstattung: Eine Mehrausstattung (M-Ausstattung) ist eine Funktion, die nicht in jedem Fahrzeug verbaut werden muss. Dies kann davon kommen, dass sie optional ist oder dass sie in verschiedenen Ländern unterschiedlich realisiert werden muss.
- Kundenkonfiguration: Als Kundenkonfiguration wird im Weiteren eine Kombination von M-Ausstattungen bezeichnet, die ein Kunde für sein Fahrzeug gewählt hat.
- Komponente: Eine Komponente ist eine technische Einheit, die die Funktionalität einer oder mehrerer M-Ausstattungen unterstützt. Bei der Variantenoptimierung werden nur die Komponenten betrachtet, die sich auf dem Steuergerät selbst befinden. Sensoren und Aktuatoren werden in der Regel sowieso nur verbaut, wenn auch die zugehörige M-Ausstattung bestellt wird. Ein Beispiel für eine Komponente ist die Ansteuerung für das Heckrollo.
- Steuergerätevariante: Mit dem eben eingeführten Begriff der Komponente kann der Begriff Steuergerätevariante präzisiert werden: Jede Steuergerätevariante ist definiert sich über eine Menge von Komponenten und unterscheidet sich von anderen in der Menge ihrer Komponenten.
- Mindestvariante: Als Mindestvariante wird im Weiteren eine Menge von Komponenten bezeichnet, die mindestens in einer Steuergerätevariante enthalten sein muss, damit die Steuergerätevariante alle M-Ausstattungen einer Kundenkonfiguration unterstützt.

2.3 Prozessschritte der Optimierung

Dieser Abschnitt beschreibt, welche Prozessschritte für eine Optimierung durchzuführen sind. In Bild 1 ist eine Übersicht über die einzelnen Prozessschritte zu sehen. Zunächst müssen die Komponenten identifiziert werden. Anschließend wird eine Prognose der zukünftigen Bestellungen erstellt, um daraus Mindestvarianten ableiten zu können. Ein weiterer Eingangsparameter sind die Kosten, die eine zusätzliche Steuergerätevariante hervorruft.

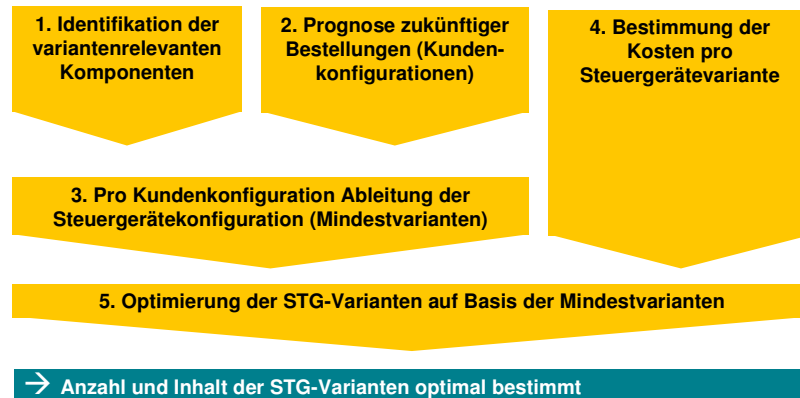


Bild 1: Prozessschritte zur Bestimmung der optimalen Steuergerätevarianten / Process for the determination of the optimal variants of electronic control units

2.3.1 Identifikation der Komponenten

Zunächst werden die variantenrelevanten Komponenten identifiziert. Unterschiedliche Komponenten auf einem Steuergerät sollten sich für die Variantenoptimierung immer in den M-Ausstattungen unterscheiden, deren Funktion sie erfüllen. Beispiel: Es macht keinen Sinn zwei Komponenten "Fensterheber hinten links" und "Fensterheber hinten rechts" zu definieren, wenn diese beiden Funktionen durch ein Steuergerät ausgeführt werden, da sie immer als eine Einheit in einer Variante enthalten sind oder nicht. In diesem Fall sollte eine Komponente "Fensterheber hinten" definiert werden.

2.3.2 Prognose zukünftiger Kundenkonfigurationen

Weiterhin müssen zukünftige Bestellungen prognostiziert werden. Bisher werden für die Bestimmung der Varianten nur die Bestellsraten einzelner M-Ausstattungen herangezogen. Kombinierte Bestellsraten werden nicht berücksichtigt. Die hier vorgestellte Methode verwendet Prognosen in Form einer Tabelle. Jede Kundenkonfiguration wird mit der Anzahl der Fahrzeuge verknüpft, die mit dieser Konfiguration gebaut werden müssen. Ein Beispiel ist in Bild 2 zu sehen, wobei dort die Kombination von M-Ausstattung 2, 24 und 25 von Kunden 2738 Mal bestellt wurde. Hier gibt es 742 unterschiedliche Kundenkonfigurationen.

Als Prognose für zukünftige Kundenkonfigurationen können aktuelle Produktionsdaten verwendet werden. Dieses Vorgehen hat den Nachteil, dass M-Ausstattungen, die in aktuellen Fahrzeugen noch nicht vorhanden sind, auch in aktuellen Produktionsdaten fehlen. Diese können jedoch anhand einer Prognose ihrer Bestellrate hinzugefügt werden. Falls diese M-Ausstattung schon zuvor in einem anderen Modell bestellbar war, könnten auch entsprechend diese genaueren Informationen verwendet werden.

Bei Kenntnis dieser Abhängigkeiten können aus den Kundenkonfigurationen automatisiert die Mindestvarianten bestimmt werden. In Bild 3 sind die Mindestvarianten aus den Kundenkonfigurationen von Bild 2 abgeleitet worden. Durch die Abhängigkeiten wurden im Beispiel die 742 unterschiedlichen Kundenkonfigurationen auf lediglich 72 unterschiedliche Mindestkonfigurationen reduziert.

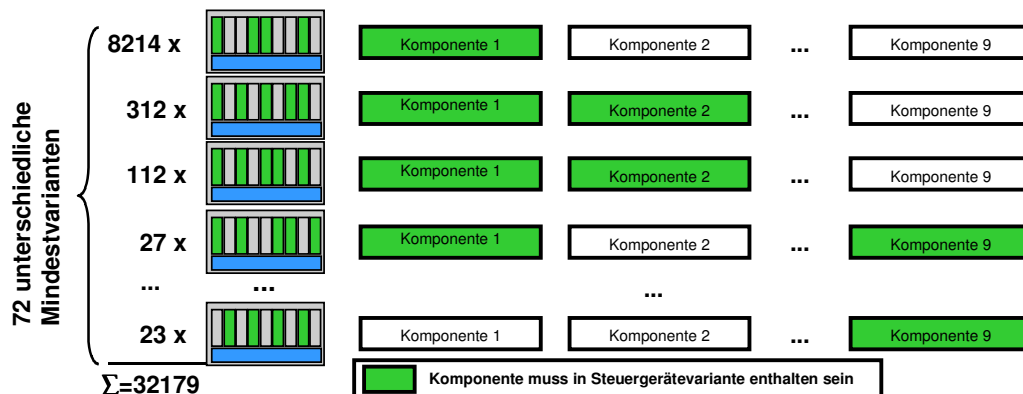


Bild 3: Beispiel für Mindestvarianten / Example for minimum variants

2.3.4 Bestimmung der Kosten pro Steuergerätevariante

Die Bestimmung der Kosten pro zusätzlicher Steuergerätevariante erfordert die Beachtung verschiedener Parameter. Es treten Kosten sowohl beim Zulieferer als auch beim Hersteller auf. Die Kosten rühren hauptsächlich von erhöhtem Entwicklungs-, Logistik- und Produktionsaufwand her.

Dabei sind beim Hersteller vor allem in der Produktion Kostensprünge festzustellen. Ab einer bestimmten Anzahl von Varianten muss zum Beispiel eine Just-In-Time-Anlieferung der Teile zur Produktion eingerichtet werden.

2.4 Formulierung des Variantenoptimierungsproblems

Eine Lösung des Variantenoptimierungsproblems liefert die genaue Anzahl und Konfiguration der Steuergerätevarianten, die kostenoptimal sind. Eingangsgrößen sind die unterschiedlichen Mindestvarianten mit ihrer jeweiligen Häufigkeit. Zusätzlich muss ein Parameter Kosten pro zusätzlicher Variante betrachtet werden.

Es werden zunächst alle potentiellen Steuergerätevarianten gebildet. Dies können bei naiver Betrachtung zunächst alle Kombinationen von Komponenten sein. Die der möglichen Varianten kann etwas reduziert werden, indem Informationen wie zum Beispiel gegenseitiger

Ausschluss von Komponenten mit berücksichtigt werden. Aus dieser Menge werden im Optimierungsschritt die optimalen Varianten bestimmt.

Um die Komplexität des Problems zu zeigen, kann folgende Beispielrechnung angestellt werden: Angenommen, es gibt auf einem Steuergerät 10 Komponenten, dann resultieren daraus 1024 (2^{10}) mögliche Varianten. Daraus ergeben sich wiederum 2^{1024} Möglichkeiten, eine Kombination von Varianten auszuwählen, da jede Variante gewählt oder nicht gewählt werden kann. Dies zeigt, dass ein Probieren aller Möglichkeiten aus Zeitgründen ausgeschlossen ist.

3. Algorithmus zur Bestimmung der kostenoptimalen Variantenkombination

In diesem Kapitel wird zunächst das einfache Standortproblem (Warehouse Location Problem WLP) beschrieben. Anschließend wird gezeigt, wie das Variantenoptimierungsproblem als WLP formuliert und gelöst werden kann.

3.1 Beschreibung des einfachen Standortproblems

Das Standortproblem ist ein seit Jahrzehnten untersuchtes Problem. In einem WLP haben Kunden bestimmte Bedarfe für ein homogenes Produkt. Die für die Auslieferung benötigten Lagerhäuser sind noch nicht gebaut. Es existiert jedoch eine Menge von Standorten, an denen die Lagerhäuser errichtet werden könnten. Für jeden Standort sind die Kosten für die Eröffnung eines Lagerhauses bekannt. Weiterhin stehen die einzelnen Kostenwerte für den Transport von den potentiellen Standorten zu den Kunden zur Verfügung.

Die zu beantwortende Frage ist, wie viele Lagerhäuser an welchen Standorten errichtet werden müssen, um alle Kunden kostenoptimal versorgen zu können.

3.2 Formulierung des Variantenoptimierungsproblems als Standortproblem

Das Variantenoptimierungsproblem kann als WLP dargestellt werden. Dazu müssen folgende Transformationen vorgenommen werden:

- Jede Mindestvariante entspricht einem Kunden
- Jede mögliche Steuergerätevariante entspricht einem Lagerhaus
- Die Bestellhäufigkeit einer Mindestvariante entspricht dem Bedarf des Kunden
- Der Preis eines Exemplars einer Steuergerätevariante entspricht den Kosten für den Transport einer Einheit zu den Kunden.

3.3 Algorithmen zu Lösung von einfachen Standortproblemen

Die Algorithmen für die Lösung von WLPs können in zwei Kategorien eingeteilt werden. Zum einen in Verfahren, die eine optimale Lösung erreichen und zum anderen Verfahren, die nicht zwingend zu einer optimalen (aber zumindest zu einer sehr guten) Lösung führen (Approximationsverfahren). Die zweite Kategorie kann für Problemgrößen angewandt werden, bei denen optimale Verfahren aufgrund der Rechenzeit nicht mehr anwendbar sind.

3.3.1 Optimales Verfahren

Ein optimales Verfahren zur Lösung von WLPs wird in [3] vorgestellt. Dabei handelt es sich um ein sogenanntes Branch & Bound Verfahren.

In dem Verfahren werden an jeder Verzweigungsstelle immer weitere Varianten endgültig in die Lösung mit einbezogen oder weggelassen. Die Anzahl der Blätter (mögliche Lösungen) des gesamten Baums ergibt sich somit aus zwei hoch der Anzahl der Varianten (vgl. Abschnitt 2.4).

Nach jeder solchen Entscheidung wird eine Abschätzung der Güte der Lösung getätigt, die gleichzeitig eine untere Schranke für die Güte darstellt, die unter Annahme der getroffenen Entscheidungen bestenfalls gefunden werden kann. Die Betrachtung aller Äste, deren untere Schranke größer ist als die Güte einer gültigen Lösung, kann abgebrochen werden. Sobald die kleinste untere Schranke gleich oder größer einer gültigen Lösung ist, endet somit das Verfahren.

3.3.2 Approximationsverfahren

Verfahren, die nicht zwingend eine optimale Lösung erbringen, sind meist Heuristiken. So gibt es diverse Verfahren wie z. B. Evolutionäre Algorithmen [5], Simulated Annealing [1], Ameisensysteme [2] oder Tabu Search [4], die bereits auf das Problem angewandt wurden [6]. Da schon eine Abweichung des Ergebnisses um 0,1 Prozent eine große kostenmäßige Differenz ausmachen kann, sollten diese Verfahren nur verwendet werden, wenn die Rechenzeit eine Anwendung der optimalen Verfahren nicht erlaubt.

3.4 Grenzen der derzeitigen Algorithmen

Bei der Darstellung jeder möglichen Variante als Standort ergibt sich sehr schnell eine große Anzahl von Orten. In der Literatur sind bis jetzt nur WLPs mit Größen bis zu 1000 Standorten zu finden. Jedoch schon bei 15 Komponenten würde sich ein WLP mit 32768 Standorten ergeben.

Aus diesem Grund ist die Grenze der Berechenbarkeit auf einem normalen PC's bei der Anwendung des optimalen Verfahrens relativ schnell erreicht. Experimente haben gezeigt, dass bereits bei einer Komponentenanzahl von 14 auf einem normalen Arbeitsplatz-PC die Rechenzeit auf einem Pentium-Prozessor mit 1 GHz unter Windows 2000 bei unserer Implementierung in Java mehr als drei Tage betragen kann.

Approximationsverfahren untersuchen oft Nachbarlösungen der aktuell behandelten Lösung. Im Falle von Steuergerätevarianten ist dies schwierig, weil die Veränderung nur einer Variante (oder Standortes) oft dazu führt, dass die Lösung ungültig wird. So kann das Entfernen von nur einer Komponente aus einer Variante zur Folge haben, dass zu einer Mindestvariante keine gültige Steuergerätevariante mehr existiert. Deshalb laufen auch diese Verfahren bei derartigen Problemgrößen relativ langsam [6].

Für die praxisrelevanten Beispiele war die maximale Anzahl bisher noch bei 10 Komponenten. Dabei war die Rechenzeit auch auf dem oben angesprochenen Arbeitsplatz-PC kein Problem (im Sekundenbereich). Zukünftige Anwendungen werden jedoch eine Weiterentwicklung der Algorithmen bedingen. Eine weitere Möglichkeit für größere Probleme wäre die Anwendung von Parallelisierung.

4. Ergebnisse in realen Anwendungsbeispielen

Der in Abschnitt 0 vorgestellte Algorithmus wurde in Java implementiert und in einem realen Anwendungsbeispiel angewandt.

In dem Beispiel handelte es sich um 9 Komponenten, die von 25 optionalen M-Ausstattungen zur Realisierung benötigt wurden.

In Bild 4 ist ein Vergleich der Verbraurate von manuell erstellten Varianten mit den optimierten Varianten zu sehen. Zu den manuell bestimmten Varianten gehören zwei, für die eine sehr geringe Verbraurate prognostiziert wird. Diese entfallen nach der Optimierung. Eine andere relativ teure Variante kann durch zwei günstigere ersetzt werden.

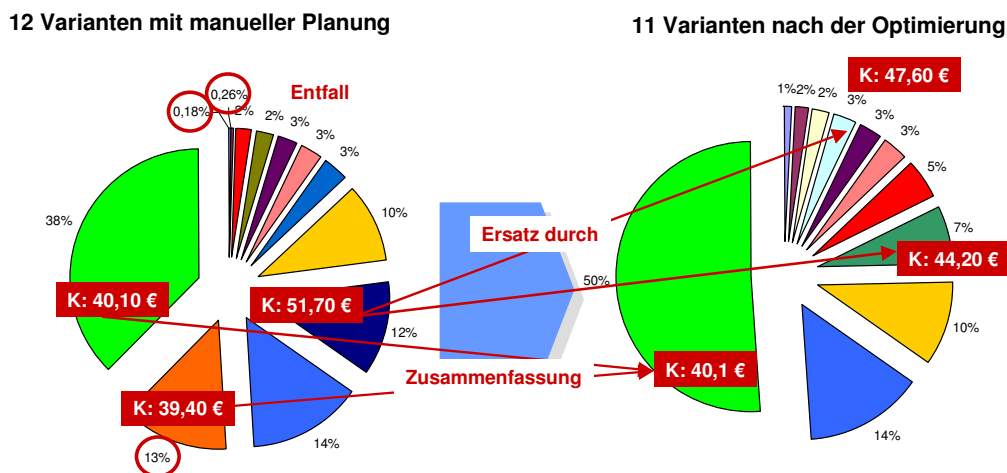


Bild 4: Prognose der Verbauraten von Steuergerätevarianten mit manueller und automatisierter Optimierung / Forecast of installation rates with manual and automatic optimization

Insgesamt konnte in dem Beispiel für den Fall eines Zutreffens der Prognose ein Einsparpotential von durchschnittlich ca. 1 € pro Fahrzeug ermittelt werden. Es stellt sich die Frage, wie stabil die Ergebnisse sind, wenn die Prognose nicht exakt zutrifft. Sind bei Nichteintreffen der Prognose die ermittelten Varianten so falsch, dass es zu einer deutlichen Verschlechterung des Ergebnisse führt?

Zur Überprüfung dieser Frage wurden zur Prognose zusätzlich Daten von relativ gut bzw. schlecht ausgestatteten Fahrzeugen hinzugefügt. Es kann damit gezeigt werden, dass sich die Differenz zwischen dem alten Optimum und den manuell bestimmten Varianten weiterhin in der gleichen Größenordnung befindet. Zudem ist auffällig, dass sich die durch die Optimierung bestimmten Varianten in den Beispielen gar nicht oder nur marginal unterscheiden. Dies kann als Indiz dafür gesehen werden, dass die Ergebnisse auch bei nicht genauem Eintreffen der Bestellprognosen einen großen Fortschritt darstellen.

5. Zusammenfassung und Ausblick

In dem vorgestellten Artikel wurde gezeigt, wie die Varianten von Steuergeräten mit mehreren M-Ausstattungen unter Berücksichtigung der Kundenbestellungen optimiert werden können. Dazu wurde das Variantenoptimierungsproblem in ein Standortproblem transformiert. Ein Algorithmus zur Bestimmung der optimalen Varianten wurde vorgestellt und die Ergebnisse anhand eines realen Anwendungsbeispiels aufgezeigt. Die erzielbaren Einsparungen machen eine Anwendung des Verfahrens bei allen Steuergeräten mit

mehreren M-Ausstattungen sinnvoll, falls die Hardware/Software-Architektur dies zulässt. Zudem ist es wichtig zu erwähnen, dass die Einsparungen ohne Einfluss auf die Qualität erzielt werden können. Dabei kommt auch der Zusammenarbeit zwischen Zulieferer und Hersteller eine große Bedeutung zu, da die Kosten der Steuergeräte auf Komponenten aufgeschlüsselt werden müssen. Zukünftig soll ebenfalls die Zuordnung von Funktionen zu Steuergeräten berücksichtigt werden, um weiteres Einsparpotential zu erschließen.

Literatur

- [1] Aydin, M., Yigit, V., Fogarty, T.: *A Parallel Simulated Annealing Implementation for Uncapacitated Facility Location Problems*. In Books of Abstracts of ECCO XV, Lugano, Schweiz (30.Mai - 1. Juni 2002)
- [2] Coloni, A., Dorigo, M., Maniezzo, V.: *Distributed optimization by ant colonies*. In Proceedings of the European Conference on Artificial Life, Seiten 134–142, Paris, Frankreich (1991)
- [3] Domschke, W., Drexl, A.: *Logistik - Standorte*. 4th edn. Volume 3. Oldenbourg, München - Wien (1996)
- [4] Glover F., Laguna M.: *Tabu Search, in Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems*. C.R. Reeves, John Wiley & Sons, Inc (1993)
- [5] Jaramillo, J., Bhadury, J., Batta, R.: *On the Use of Genetic Algorithms to Solve Location Problems*. In Computer & Operations Research 29, Seiten 761–779, Elsevier Science (2002)
- [6] Körkel, M.: *Effiziente Verfahren zur Lösung unkapazitiver Standort-Probleme*. 1. Aufl. VWF, Berlin (1999)