



Georg-August-Universität
Göttingen
Zentrum für Informatik

ISSN 1612-6793
Nummer ZAI-BSC-2013-05

Bachelorarbeit

im Studiengang "Angewandte Informatik"

Stochastische Bestellmengen- optimierung von Blutkonserven

Cay Garbrecht

am Institut für
Numerische und Angewandte Mathematik

Bachelor- und Masterarbeiten
des Zentrums für Informatik
an der Georg-August-Universität Göttingen

21. März 2013

Georg-August-Universität Göttingen
Zentrum für Informatik

Goldschmidtstraße 7
37077 Göttingen
Germany

Tel. +49 (5 51) 39-1 72 000

Fax +49 (5 51) 39-1 44 03

Email office@informatik.uni-goettingen.de

WWW www.informatik.uni-goettingen.de

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

Göttingen, den 21. März 2013

Bachelorarbeit

Stochastische Bestellmengenoptimierung von Blutkonserven

Cay Garbrecht

21. März 2013

Betreut durch Jun.-Prof. Dr. S. Westphal und Dipl.-Math. M. Bender
Institut für Numerische und Angewandte Mathematik
Georg-August-Universität Göttingen

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	4
1.1. Motivation	4
1.2. Grundlagen	4
1.2.1. Blutprodukte	4
1.2.2. Transfusion	5
1.2.3. Ereignis	6
1.3. Stochastische Optimierung	6
1.3.1. Zweistufiges stochastisches Optimierungsprogramm mit Rekurs	8
1.4. Frage- und Aufgabenstellung	10
2. Entwurf	11
2.1. Ausgangssituation	11
2.2. Simulator	11
2.3. Modellierung der Ausgangssituation	12
2.3.1. Stochastische Bestellmengenoptimierung	12
2.3.2. LagerModell	16
3. Datenauswertung	17
4. Implementierung	18
4.1. Simulator	18
4.2. Strategien	19
4.2.1. Bestellmodelle	20
5. Auswertung	24
5.1. Simulation	24
5.1.1. Ergebnisse der Simulation	25
5.2. Einfluss der Umstellung der chirurgischen Abteilung auf den Verfall	28
5.2.1. Vergleich der Simulatorkonfigurationen	30
5.3. Änderung der Lagerkonstanten	30
6. Fazit und Ausblick	33

Inhaltsverzeichnis

A. Daten	34
A.1. Simulator	34
Literaturverzeichnis	37

1. Einleitung

1.1. Motivation

Blutprodukte sind nicht nur für Unfallopfer mit Blutverlust lebenswichtige Lebensretter. Sie werden auch zur Behandlung von Krebspatienten und Erkrankungen des Herzens, des Magens und des Darms eingesetzt (vgl. [2]). Da es noch keine Möglichkeit gibt, Blut(-bestandteile) künstlich herzustellen und Blutprodukte nicht dauerhaft lagerbar sind, ist alles andere als eine effiziente Nutzung von Blutprodukten ethisch nicht vertretbar. Ausgangspunkt dieser Arbeit war, dass das Klinikum Emden beobachtet hat, dass in den letzten Jahren zunehmend mehr Blutprodukte im Klinikum verfallen sind. Deshalb soll in Zusammenarbeit mit der Göttinger Universität untersucht werden, ob mit Hilfe mathematischer Verfahren der Verfall von Blutprodukten, insbesondere von Erythrozyten-Konzentraten, verringert werden kann.

1.2. Grundlagen

In diesem Abschnitt sollen wichtige Begriffe der Transfusionsmedizin und der stochastischen Optimierung erklärt werden.

1.2.1. Blutprodukte

Vollblut

Enthält als Hauptbestandteile Erythrozyten, Leukozyten, Thrombozyten und Blutplasma.

Erythrozyten-Konzentrate(EK)

Erythrozyten sind die roten Blutbestandteile im Blut. Diese können entweder direkt vom Spender gewonnen werden, oder aus einer Vollblutspende extrahiert werden. Zusammen mit einer Stabilisatorlösung bilden sie das Konzentrat. Die Konzentrate haben eine maximale Haltbarkeit von 42 Tagen. Bis ein Konzentrat ausgeliefert werden kann, können jedoch mehrere Tage vergehen, was die Haltbarkeit zusätzlich senkt.

Bestrahlte Erythrozyten-Konzentrate

Die Erythrozyten-Konzentrate wurden mit mindestens 25Gy bestrahlt, um einer Graft-versus-Host-Erkrankung vorzubeugen. Die Bestrahlung kann nur vom Blutspendedienst durchgeführt werden und verringert die Haltbarkeit auf 14 Tage nach Bestrahlung.

1.2.2. Transfusion

Blutgruppengleiche Transfusion

Hierbei haben Blutprodukt und Empfänger im AB0 System die gleichen Antigene. Zusätzlich sollten Rhesus positive Empfänger nur Blut von Rhesus positiven Spendern und Rhesus negative Empfänger nur Blut von Rhesus negativen Spendern transfundiert bekommen. Dies stellt den Regelfall dar und wird auch bei der Simulation angenommen.

Blutuntergruppengleiche Transfusion

Bei der blutuntergruppengleichen Transfusion werden zusätzlich zur Blutgruppengleichen Transfusion noch die Rhesus Antigene C,c,E,e, sowie Kell und weitere Faktoren berücksichtigt. Dies stellt bei Mädchen und Frauen im gebärfähigen Alter den Regelfall dar.

Blutgruppenkompatible Transfusion

In lebensbedrohlichen Notfallsituationen können Blutprodukt und Empfänger ungleiche Blutgruppen aufweisen. Hierbei muss sichergestellt werden, dass es beim Patienten zu keiner Antigen-Antikörper-Reaktion kommt.

Bluteigenschaften

Als Bluteigenschaften werde ich für die Transfusionsmedizin relevante Eigenschaften wie Blutgruppe(AB0-System), Rhesusfaktor(D,d,C,c,E,e), Kell bezeichnen.

Blutgruppenverteilung

Verteilung der Blutgruppen in der deutschen Bevölkerung nach Angaben des DRK [1].

0+	0-	A+	A-	B+	B-	AB+	AB-
0.35	0.06	0.37	0.06	0.09	0.02	0.04	0.01

Tabelle 1.1.: Verteilung der Blutgruppen in der deutschen Bevölkerung

1.2.3. Ereignis

Als Ereignis werde ich alles bezeichnen, wofür potentiell Erythrozyten-Konzentrate benötigt werden, wie Operationen, Therapien, Behandlungsmethoden. Jedem Ereignis steht ein Patient pro Tag gegenüber, d.h. Blutkonserven, die für dieses Ereignis gebraucht werden, müssen die gleichen Bluteigenschaften haben. Wird an einem anderen Tag Blut für denselben Patienten angefordert, gilt dies als neues Ereignis. Die erhobenen Daten und Verteilungen des Simulators werden auf Ereignissen, also Patienten pro Tag, basieren.

1.3. Stochastische Optimierung

In diesem Abschnitt halte ich mich weitestgehend an die Bücher [5] und [7]

Als allgemeines Anwendungsbeispiel soll "The News Vendor Problem" aus [7] die Problematik der Optimierung unter Unsicherheit verdeutlichen.

Es muss eine Menge x mit Stückkosten $c > 0$ bestellt werden, um einen Bedarf d zu erfüllen. Falls zu wenig bestellt wurde, kann zu Stückkosten $b > c$ die Menge $d - x$ nachbestellt werden. Falls zu viel bestellt wurde, kommen Lagerkosten von $h > 0$ dazu. Die absoluten Kosten betragen dann:

$$F(x, d) = cx + b[d - x]_+ + h[x - d]_+ \quad (1.1)$$

Das Ziel ist es die Kosten zu minimieren, so dass das entsprechende Optimierungsproblem wie folgt formuliert werden kann.

$$\underset{x \geq 0}{\text{Min}} F(x, d) \quad (1.2)$$

Falls der Bedarf d bereits bekannt ist, ist die optimale Lösung $x = d$.

Angenommen der Bedarf d ist zum Entscheidungszeitpunkt nicht bekannt, dann könnte man den Bedarf durch die Zufallsvariable D ersetzen. Weiter wird angenommen, dass die Verteilung der Zufallsvariable D bekannt ist. Dies muss nicht immer der Fall sein, bei sich wiederholenden Prozessen, kann man aber beispielsweise die Verteilung aus historischen Daten schätzen. Das dazugehörige Optimierungsproblem kann dann wie folgt geschrieben werden:

$$\underset{x \geq 0}{\text{Min}} \{f(x) := \mathbb{E}[F(x, D)]\} \quad (1.3)$$

Wiederholt sich dieser Prozess, konvergiert das arithmetische Mittel der Kosten, laut dem Gesetz der großen Zahlen [6], gegen $\mathbb{E}[F(x, D)]$ und wären damit im Erwartungswert optimal.

An dem Beispiel lässt sich eine typische Struktur der stochastischen Optimierung erkennen. Man kann es in 2 Stufen unterteilen:

1. Stufe Es muss eine Entscheidung getroffen werden, bspw. wie viel bestellt wird, um einen noch unbekanntem Bedarf zu decken.
2. Stufe (auch Rekursstufe genannt) Nachdem eine Realisierung des Bedarfs eingetreten ist, muss entweder der Überschuss gelagert oder für höhere Kosten nachbestellt werden.

Die Abbildungen 1.1 und 1.2 stellen Szenarienbäume dar. Jeder Knoten steht für ein Szenario. Die Kanten verbinden die möglichen Folgeszenarien. Stochastische Optimierungs-

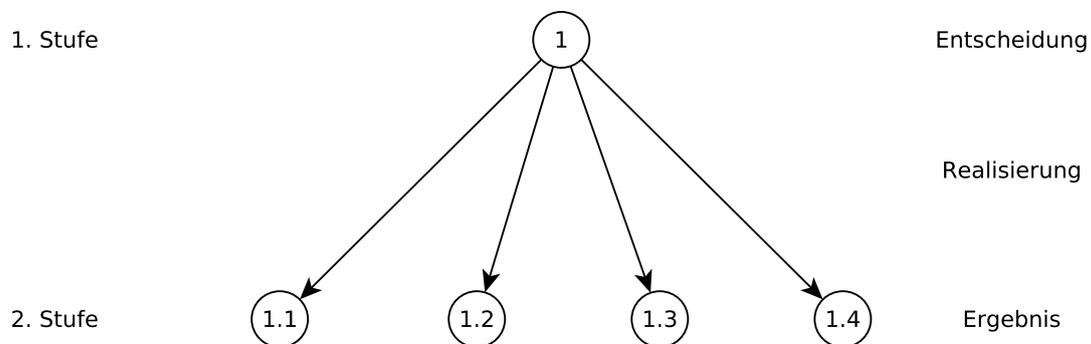


Abbildung 1.1.: Zweistufiger Szenarienbaum mit 4 möglichen Ergebnissen.

probleme sind nicht auf 2 Stufen beschränkt. Kann nach einer Realisierung eines Teils der Parameter wieder eine Entscheidung getroffen werden, so kann das Problem in mehrere Stufen aufgeteilt werden.

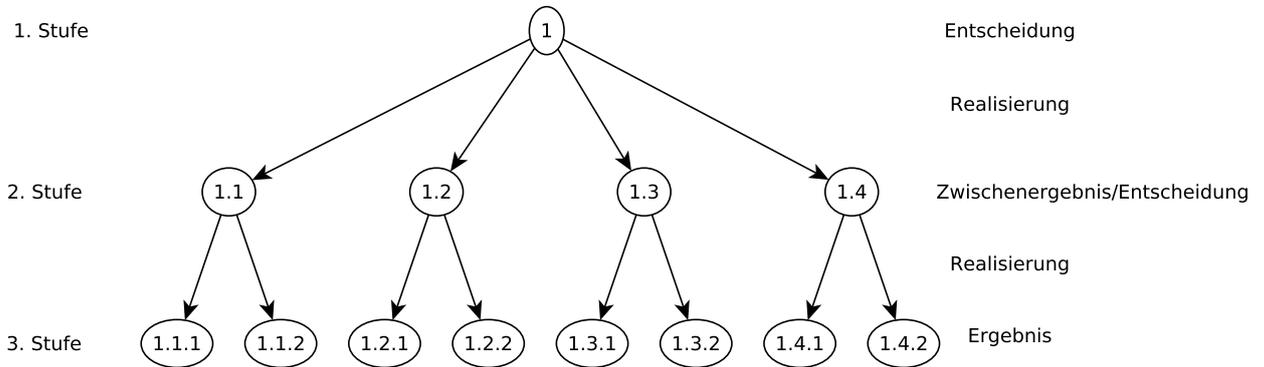


Abbildung 1.2.: Mehrstufiger Szenarienbaum

1.3.1. Zweistufiges stochastisches Optimierungsprogramm mit Rekurs

Das folgende Modell ist aus dem Buch [5].

Ein lineares zweistufiges stochastisches Optimierungsprogramm ist gegeben durch:

$$\begin{aligned} \min \quad & c^T x + \mathcal{Q}(x) \\ \text{s.t.} \quad & Ax = b \\ & x \geq 0, \end{aligned} \tag{1.4}$$

wobei

$$\mathcal{Q}(x) = IE[Q(x, \xi)] \tag{1.5}$$

und

$$Q(x, \xi) = \min \{ q(\xi)^T y \mid W(\xi)y = h(\xi) - T(\xi)x, y \geq 0 \}. \tag{1.6}$$

Wie bei einem deterministischen Optimierungsprogramm steht c für den Kostenvektor der Zielfunktion und $Ax = b$ für die Nebenbedingungen. $Q(x, \xi)$ ist die Rekursfunktion, die auch einem Optimierungsprogramm entspricht. Wobei die Kosten der Zielfunktion $q(\xi)$ und die Matrizen $W(\xi)$ und $T(\xi)$ sowie der Vektor $h(\xi)$ der Nebenbedingung $W(\xi)y = h(\xi) - T(\xi)x$ von der Zufallsvariable ξ abhängen können. \mathcal{Q} ist die erwartete Rekursfunktion.

Unter der Bedingung, dass die Zufallsvariable ξ einer diskreten Verteilung folgt und es eine endliche Menge S von Szenarien gibt, kann der Erwartungswert 1.5 als Summe geschrieben werden

$$IE[Q(x, \xi)] = \sum_{s \in S} p_s Q(x, \xi^s), \tag{1.7}$$

wobei ζ^s die Realisierung der Zufallsvariable ζ ist, dass Szenario s mit der Wahrscheinlichkeit p_s eingetreten ist. Beide Stufen lassen sich dann zusammenfassen, indem für jedes Szenario jede Variable aus der zweiten Stufe vervielfacht wird und die Nebenbedingungen für alle Szenarien erfüllt werden. Dadurch entsteht für das 2 stufige stochastische Programm ein äquivalentes deterministisches Programm, welches durch einen Solver gelöst werden kann.

1.4. Frage- und Aufgabenstellung

Aufgabe dieser Arbeit ist es ein Simulationswerkzeug zu erstellen, um mit Hilfe dessen empirisch feststellen zu können, ob man mittels stochastischer Bestellmengenoptimierung den Verfall von Blutkonserven insbesondere von Erythrozyten Konzentraten verhindern bzw. verringern kann. Desweiteren soll überprüft werden, warum der Verfall im Klinikum in den letzten Jahren stark angestiegen ist. Um einen realitätsnahen Simulator zu erstellen wurden Laborlisten über verwendete Blutprodukte aus den Jahren 2008 bis 2012 bereitgestellt. Folgende Fragen sollen dadurch beantwortet werden:

1. Lässt sich ein Verfall von Blutprodukten komplett vermeiden?
2. Hat die Bestellmethode Einfluss auf die Verfallsrate?
3. Hat die Umstellung vom 01.09.2010 in der chirurgischen Abteilung Einfluss auf die Verfallsrate?

2. Entwurf

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Modellierung der Ausgangssituation, des Simulators und der Bestellstrategien.

2.1. Ausgangssituation

Anforderung von Blutkonserven

Steht für einen Patienten ein Ereignis an, werden Untersuchungen bzgl. der Bluteigenschaften durchgeführt. Der behandelnde Arzt fordert dann eine bestimmte Anzahl Blutkonserven vom Labor an. Dies bedeutet nicht, dass diese Blutkonserven auch alle transfundiert werden. Es dient als Vorsichtsmaßnahme. Im Labor werden daraufhin Blutkonserven auf Verträglichkeit geprüft und bereitgelegt. Die geprüften Blutkonserven dürfen anschließend 3 Tage nach einer Prüfung transfundiert werden. Wird die Blutkonserve in diesen 3 Tagen nicht transfundiert, aber besteht weiterhin Bedarf, muss diese Blutkonserve erneut auf Verträglichkeit geprüft werden. Eine erneute Prüfung von Blutkonserven wird wieder als neues Ereignis betrachtet.

Bestellmöglichkeiten

Es gibt 2 Möglichkeiten Blutkonserven zu bestellen. Die Normalbestellung wird morgens zwischen 6:45 Uhr und 10:00 Uhr aufgegeben und kommt am selben Tag zur Mittagszeit im Klinikum an. In dringenden Fällen kann zu jeder Uhrzeit per Express bestellt werden. Die Lieferung trifft einige Zeit später im Klinikum ein. Es entstehen dadurch Mehrkosten von 5 € pro Blutkonserve und Fahrtkosten von durchschnittlich 195 € pro Bestellung.

Eine detailliertere Beschreibung aller notwendigen Maßnahmen befindet sich in [8].

2.2. Simulator

Auf Grundlage der Datenauswertung soll der Simulator die Ausgangssituation abbilden und ähnliche Häufigkeiten von geprüften und transfundierten Blutkonserven erzeugen. Bei den Blutkonserven soll es sich um normale Erythrozyten-Konzentrate handeln. Bestrahlte Erythrozyten-Konzentrate machen nur einen sehr kleinen Teil der Blutkonserven-

menge aus und weisen dabei unterdurchschnittlich niedrige Verfallsraten auf. Da täglich Blutkonserven angefordert, bestellt und transfundiert werden können, gilt ein Tag als eine Runde. Pro Runde soll eine zufällige Zahl von Ereignissen bestimmt werden. Jedes Ereignis wird einer Fachrichtung zugeordnet, da je Fachrichtung andere Werte bzgl. Bedarf und Transfusionswahrscheinlichkeit gelten. Die Werte dazu werden aus den bereitgestellten Daten ermittelt und sind im Anhang A abgedruckt. Der Simulator soll ausschließlich zur Erzeugung von Ereignissen und dem Generieren des zufälligen Verbrauchs dienen.

2.3. Modellierung der Ausgangssituation

Für alle Modelle soll ein einheitlicher Ablauf gelten. Wie in Abschnitt 2.2 beschrieben, gilt ein Tag als eine Runde. In einer Runde werden die einzelnen Aktionen für alle Ereignisse gesammelt durchgeführt.

Die Abbildung 2.1 zeigt den Ablauf als Flussdiagramm:

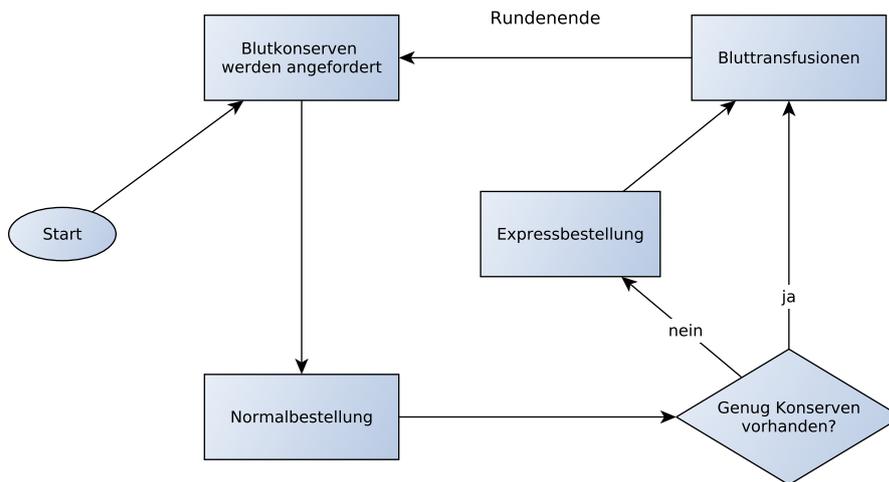


Abbildung 2.1.: Allgemeiner Ablauf

2.3.1. Stochastische Bestellmengenoptimierung

Die Idee bei der stochastisch optimierten Bestellstrategie ist, möglichst wenig Blutkonserven auf Lager zu haben. Das bedeutet man bestellt im Idealfall genau so viele Blutkonserven, wie am nächsten Tag auch tatsächlich transfundiert werden. Es muss möglich sein,

angeforderte Blutkonserven noch per Normalbestellung bestellen zu können, so dass überhaupt bedarfsorientiert bestellt werden kann. Desweiteren wird für jede der 8 Blutgruppen die Bestellung unabhängig voneinander ermittelt, da nur blutgruppengleich transfundiert und bestellt werden soll.

Zweistufiges Stochastisches Programm

Für ein erstes Modell wird angenommen, dass nach der Bestellung für ein Ereignis die genaue Anzahl von Blutkonserven, die an den 3 Folgetagen transfundiert werden sollen, bekannt ist. Ist diese Bedingung erfüllt, kann man den Ablauf 2.1 wieder in 2 Stufen aufteilen. Die Abbildung 2.2 zeigt die Aufteilung in Stufen.

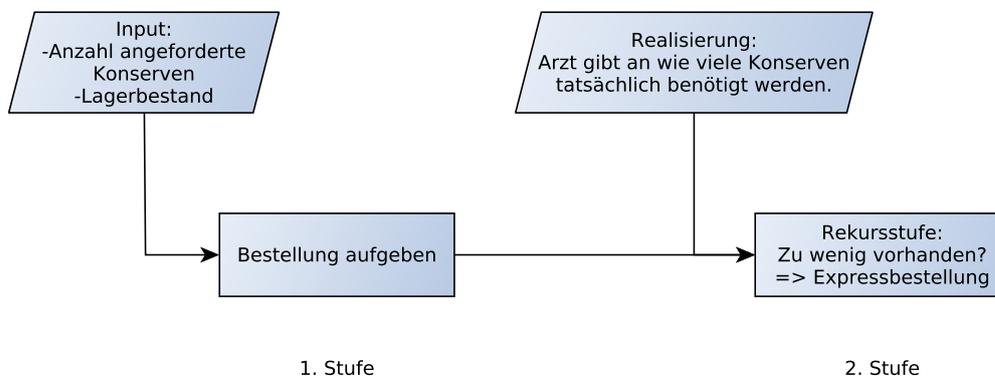


Abbildung 2.2.: Aufteilung des Ablaufs in 2 Stufen

In Worten zusammengefasst ergibt sich damit folgende Situation:

Es wird eine Menge von K Blutkonserven angefordert. Es liegen L Blutkonserven im Lager. Das bedeutet, in der nächsten Runde können maximal K Konserven transfundiert werden, wovon man höchstens $K - L$ Konserven noch bestellen muss. Man entscheidet sich $0 \leq x \leq K - L$ Blutkonserven zu bestellen. Von den K möglichen Blutkonserven sollen nun k transfundiert werden. Im Fall $k < x + L$ sind genug Blutkonserven vorhanden und der Überschuss von $k - (x + L)$ kommt ins Lager. Im Fall $k > x + L$ müssen per Express noch $ex = x + L - k$ Blutkonserven für Mehrkosten von q nachbestellt werden. Im Optimalfall $k = x + L$ muss nichts getan werden.

Daraus lässt sich folgendes zweistufiges Stochastisches Programm ableiten:

$$\begin{aligned}
 \min \quad & x + \mathcal{Q}(x) \\
 \text{s.t.} \quad & x \in \mathbb{N}_0,
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

wobei

$$\mathcal{Q}(x) = \sum_{k=0}^K p_k Q(x, k) \quad (2.2)$$

mit

$$Q(x, k) = \min\{q \cdot ex \mid x + ex + L \geq k, ex \in \mathbb{N}_0\} \quad (2.3)$$

Da eine endliche Zahl $K + 1$ von Szenarien existiert, kann das zweistufige Stochastische Optimierungsprogramm in ein deterministisches Optimierungsprogramm umgewandelt werden.

$$\begin{aligned} \min \quad & x + q \cdot \sum_{k=0}^K p_k ex_k \\ \text{s.t.} \quad & x + ex_k + L \geq k \quad \forall k = 0, \dots, K \\ & x, ex_k \in \mathbb{N}_0 \quad \forall k = 0, \dots, K \end{aligned} \quad (2.4)$$

Ich belasse die Kosten c für die Bestellung x bei 1, da nicht blutgruppenübergreifend transfundiert wird. Die Mehrkosten q entsprechen nicht den beschriebenen Kosten für Expressbestellungen aus Abschnitt 2.1, da nicht über die Kosten sondern über die Anzahl der Blutkonserven optimiert werden soll. Sie dienen dazu den Anteil der Expressbestellungen zu steuern. Die absoluten Kosten können später unabhängig von der Bestellstrategie berechnet werden. Es gibt insgesamt $K + 1$ Nebenbedingungen, so dass für alle Szenarien durch die normale Bestellung, das vorhandene Lager und mögliche Expressbestellungen der Bedarf von k Blutkonserven gedeckt ist. Es können nur nicht negative ganzzahlige Bestellungen x bzw. ex_k aufgegeben werden.

Mehrstufiges Stochastisches Programm

In diesem Abschnitt soll das zweistufige Modell weiterentwickelt werden. Dazu werden wieder nur die Ereignisse des nächsten Tages betrachtet. Es soll aber der Fakt mit einbezogen werden, dass die angeforderten Blutkonserven an jedem der nächsten 3 Tage transfundiert werden können. An jedem Tag kann auch wieder eine neue Entscheidung getroffen werden, ob per Normalbestellung für den nächsten Tag bestellt wird bzw. ob per Expressbestellung nachbestellt werden muss. Die Abbildung 2.3 zeigt die Aufteilung in vier Stufen:

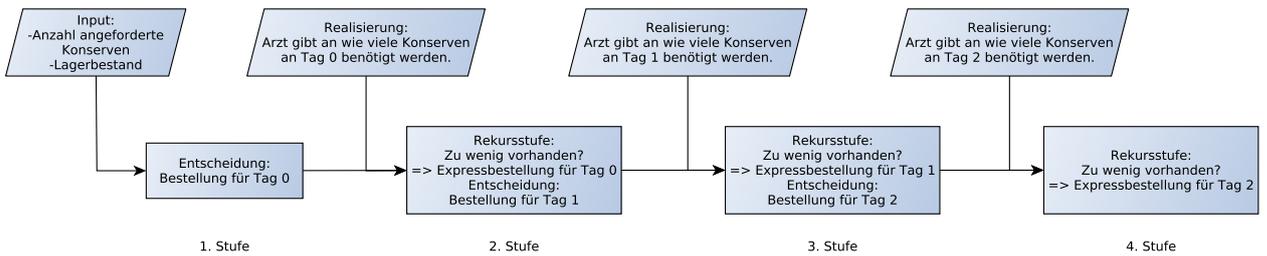


Abbildung 2.3.: Aufteilung des Ablaufs in 4 Stufen

Das deterministische Programm sieht dazu wie folgt aus:

$$\begin{aligned}
 \min \quad & x_0 + x_1 + x_2 + q \cdot \sum_{k=0}^K p_k [ex_k + \sum_{i=0}^{K-k} p_{ki} [ex_{ki} + \sum_{j=0}^{K-(k+i)} p_{kij} ex_{kij}]] \\
 \text{s.t.} \quad & x_0 + ex_k + L \geq k, \forall k \in \{0, \dots, K\} \\
 & x_0 + x_1 + ex_k + ex_{ki} + L \geq k + i, \forall k \in \{0, \dots, K\}, \forall i \in \{0, \dots, K - k\} \\
 & x_0 + x_1 + x_2 + ex_k + ex_{ki} + ex_{kij} + L \geq k + i + j, \forall k \in \{0, \dots, K\}, \forall i \in \{0, \dots, K - k\}, \forall j \in \{0, \dots, K - k - i\} \\
 & x_0, x_1, x_2, ex_k, ex_{ki}, ex_{kij} \in \mathbb{N}_0, \forall k \in \{0, \dots, K\}, \forall i \in \{0, \dots, K - k\}, \forall j \in \{0, \dots, K - k - i\}
 \end{aligned} \tag{2.5}$$

Auch hier bleiben die Kosten für die normalen Bestellungen x_0, x_1 und x_2 bei 1. Die Mehrkosten q haben die selbe Funktion, wie beim zweistufigen Programm. x_i entspricht der Bestellung für den i -ten Tag. Die p_k sind die Wahrscheinlichkeiten für die Szenarien der 2-ten Stufe, p_{ki} sind die Wahrscheinlichkeiten für die Szenarien der 3-ten Stufe und p_{kij} sind die Wahrscheinlichkeiten für die Szenarien der 4-ten Stufe. Wie die Wahrscheinlichkeiten berechnet werden, wird im Kapitel 4.2.1 behandelt. Auch hier stellen die Nebenbedingungen sicher, dass der Bedarf in jedem Szenario gedeckt ist. Das bedeutet im einzelnen für

Szenario S_k und dessen Nachfolger S_{ki} und S_{kij} , dass durch $x_0, x_1, x_2, ex_k, ex_{ki}, ex_{kij}$ und L der Bedarf von jeweils $k, k + i$ und $k + i + j$ gedeckt ist.

2.3.2. LagerModell

Zum Vergleich soll die zur Zeit im Klinikum angewendete Methode implementiert werden. In diesem Fall ist es nicht möglich bedarfsorientiert Blutkonserven zu bestellen, da das Labor die Informationen zu den Bluteigenschaften der Patienten erst nach der normalen Bestellzeit erhält. Deshalb wird eine konstante Anzahl Blutkonserven pro Blutgruppe im Lager vorgehalten. Bei einer Bestellung wird das Lager auf die Werte aus Tabelle 2.1 aufgefüllt.

0+	0-	A+	A-	B+	B-	AB+	AB-
14	5	14	5	2-4	2	2	2-4

Tabelle 2.1.: Anzahl vorgehaltener Blutkonserven je Blutgruppe (Stand 04.02.2013)

Sollten nicht genügend Blutkonserven vorhanden sein, wird per Express nachbestellt. Vor der Umstellung galten folgende Werte als Lagerkonstanten:

0+	0-	A+	A-	B+	B-	AB+	AB-
20	6	20	4	4	2	3	2

Tabelle 2.2.: Anzahl vorgehaltener Blutkonserven je Blutgruppe (Zeitraum vor dem 01.09.2010)

3. Datenauswertung

Bezüglich der Aufgabenstellung soll der Simulator möglichst realistische Werte erzeugen. Dazu wurden vom Klinikum Laborlisten zur Auswertung bereitgestellt. Diese Listen beinhalten Informationen zu verwendeten Blutkonserven. Genauer sind die Listen aufgeteilt in Tabellen über verfallene, entsorgte, geprüfte und transfundierte Blutprodukte. Verknüpfen kann man die Tabellen nur über Patientennamen, Datum, Fachrichtung und Blutproduktnummer, wovon nur die Blutproduktnummer eindeutig ist. Patienten mit gleichem Namen, können nicht unterschieden werden.

Da der Verfall erst ab dem Jahr 2010 gestiegen ist, werden die Daten aufgeteilt in die Zeit vor und nach der Umstellung in der Chirurgie.

Für den Simulator sind folgende Daten wichtig:

- Anzahl Patienten pro Tag
- Verteilung der Patienten pro Tag auf die Fachrichtungen
- Transfusionswahrscheinlichkeiten der Fachrichtungen
- Verteilung der transfundierten Blutkonserven auf die 3 Tage nach der Prüfung
- Anzahl angeforderter Blutkonserven pro Patient, Tag und Fachrichtung
- Haltbarkeit der Blutkonserven

Die ermittelten Daten für den Simulator befinden sich in tabellarischer Form im Anhang. Daraus wurden 2 Konfigurationsdateien erstellt. Aus datenschutzrechtlichen Gründen können Daten zum Vergleich der Verfallsraten nicht genannt werden.

4. Implementierung

In diesem Kapitel werden alle erstellten Klassen und deren Verwendung beschrieben. Auf eine detaillierte Beschreibung des Codes wird an dieser Stelle verzichtet und auf den Quellcode auf der beiliegenden CD verwiesen. Der Quellcode ist in Python Version 2.7.3 [3] geschrieben. Als Entwicklungsumgebung wurde Eclipse mit dem PyDev Plugin benutzt. Als Optimierungswerkzeug wurde IBM ILOG CPLEX Optimization Studio V12.4 [4] mit der Python API `cplex` verwendet.

4.1. Simulator

Ereignis

Ein Ereignis speichert folgende Informationen: Blutgruppe, Blutbedarf, Prüfdatum, Transfusionswahrscheinlichkeit insgesamt und pro Tag. Jedes Ereignis hat für jede Bestellstrategie die sich beim Simulator registriert, eine Liste vom Verbrauch der nächsten 3 Tage. Das ist für das Transfundieren vom KonservenPool nötig (siehe Abschnitt 4.2). Blutkonserven, die für ein Ereignis geprüft wurden, bekommen eine Referenz auf das Ereignis.

EreignisFactory

Die EreignisFactory wird vom ZufallsSimulator initialisiert und dient zum Erzeugen von zufälligen Ereignissen. Als Parameter werden die Verteilung der Patienten auf Fachrichtungen, die Transfusionswahrscheinlichkeiten pro Fachrichtung, die Transfusionswahrscheinlichkeiten pro Tag und die Anzahl zu prüfender Blutkonserven je Fachrichtung übergeben. Es gibt eine Methode zur Erzeugung zufälliger Ereignisse.

ZufallsSimulator

Der ZufallsSimulator erzeugt eine Liste von Tagen an die mehrere Ereignisse je Tag angehängt werden. Die Ereignisse werden von der EreignisFactory erzeugt. Der Verbrauch wird zufällig nach den Transfusionswahrscheinlichkeiten bestimmt. Die Simulatorkonfigurationen können aus einer Datei eingelesen werden. Jede Strategie muss sich beim Simulator registrieren und bekommt eine ID. Es gibt noch eine Methode zur Bestimmung der Abstände zwischen zwei Ereignissen gleicher Blutgruppe für den Versuch 5.2.1 aus Kapitel 5.

Ablauf

Der Ablauf führt eine Simulation über einen bestimmten Zeitraum durch und speichert die Daten ab. Simulator und Strategien werden übergeben.

4.2. Strategien

Blutkonserve

Jede Blutkonserve wird mit Informationen zur Blutgruppe, dem Lieferdatum, dem Verfallsdatum und einer ID initialisiert. Wird eine Blutkonserve für ein Ereignis geprüft, wird ihr die Transfusionswahrscheinlichkeit des Ereignis zugewiesen, bekommt eine Referenz auf dieses Ereignis und ein Zähler wird gesetzt, der bestimmt wie lange die Prüfung dieser Konserve für dieses Ereignis bereits her ist (nicht negativer Zähler) oder wann die Konserve für dieses Ereignis geprüft werden soll (negativer Zähler). Jede Konserve ist gekennzeichnet, ob sie per Express oder Normalbestellung geliefert wurde. Per Express bestellte Blutkonserven werden folgend als Expresskonserven bezeichnet.

KonservenPool

Jede Strategie hat einen KonservenPool. Dieser führt Buch über die geprüften, transfundierten, verfallenen und lagernden Blutkonserven. Es werden Methoden zum Hinzufügen/Bestellen von Blutkonserven angeboten.

Je nach Modell gibt es verschiedene Methoden Blutkonserven zu prüfen und zu transfundieren. Für die optimierten Bestellmodelle gibt es in der Regel nicht genug Blutkonserven, um für jedes Ereignis den gesamten Bedarf eins zu eins auf die vorhandenen Blutkonserven abzubilden. Deshalb werden Platzhalter in Form von Expresskonserven in die Geprüft-Liste eingefügt. Bei dem LagerModell hingegen können direkt die Blutkonserven aus dem Lager geprüft werden. Sollten nicht genügend vorhanden sein, werden Expresskonserven geprüft.

Transfundiert werden bei den optimierten Bestellmethoden zuerst die Blutkonserven, die in der Lager-Liste geführt werden und bei Mangel erst die Expresskonserven aus der Geprüft-Liste. Bei dem LagerModell werden nur Blutkonserven aus der Geprüft-Liste transfundiert. Bei allen Varianten werden immer zuerst Blutkonserven mit kürzerer Haltbarkeit transfundiert.

Beim Rundenende werden Blutkonserven deren Verfallsdatum überschritten wird in die Verfallen-Liste eingefügt und aus der Lager-Liste gelöscht. Blutkonserven die länger als 3 Tage einem Ereignis zugewiesen waren und nicht transfundiert wurden, werden wieder in die Lager-Liste eingefügt. Dabei werden von der optimierten Bestellstrategie Expresskonserven ignoriert, weil diese nicht tatsächlich geliefert wurden.

4.2.1. Bestellmodelle

Die Bestellmodelle sind in mehrere Klassen aufgeteilt.

Bestellstrategie

Die Basisklasse `Bestellstrategie` implementiert die für alle Modelle notwendigen Funktionalitäten wie die Initialisierung des KonservenPools und des Simulators und stellt eine Methode zur Datenspeicherung bereit. Sie dient als Interface um sicherzustellen, dass abgeleitete Klassen dem einheitlichen Ablauf 2.1 entsprechen und von der Klasse `Ablauf` benutzt werden können.

LagerModell

Die Klasse `LagerModell` erbt von `Bestellstrategie` und füllt beim Bestellen das Lager auf konstante Mengen auf. Wie im Entwurf beschrieben, wird die Differenz zwischen Blutgruppenkonstanten und dem Lagerbestand bestellt. Geprüfte Konserven die noch nicht transfundiert wurden, werden nicht im Lagerbestand geführt.

OptimierteBestellstrategie

Die Klasse `OptimierteBestellstrategie` erbt von `Bestellstrategie` und implementiert Funktionalität zur Erstellung eines Optimierungsprogramms und zum Bestellen der Blutkonserven. Da nicht blutgruppenübergreifend transfundiert bzw. bestellt werden soll, wird die Bestellmenge für jede Blutgruppe einzeln durch ein ganzzahliges Optimierungsprogramm(IP) bestimmt.

Erstellung des Optimierungsprogramms

Das Verfahren zur Erstellung der ganzzahligen Optimierungsprogramme (IPs) für die 2 Modelle (Zweistufig/Mehrstufig) ist gleich. Zuerst werden die Variablen der Normalbestellung erzeugt und in das IP eingefügt. Danach werden die Wahrscheinlichkeiten für alle Szenarien bestimmt. Diese sind in einem Dictionary gespeichert, das als Schlüssel den Verbrauch entlang der Pfade im Szenarienbaum hat und dazu die Wahrscheinlichkeit speichert. Sortiert man die Schlüssel und iteriert über diese, entspricht das einer Tiefensuche im Szenarienbaum. Das sichert die Existenz aller Variablen die zur Erzeugung der Nebenbedingungen notwendig sind. In jeder Iteration kann dann die dem Szenario entsprechende Expressvariable erzeugt und die Nebenbedingung ins IP eingefügt werden.

Zweistufiges Modell

Die Klasse `Zweistufig` implementiert das zweistufige Modell 2.3.1 und erbt von `OptimierteBestellstrategie`.

Mehrstufiges Modell

Die Klasse `Mehrstufig` implementiert das mehrstufige Modell 2.3.1 und erbt von `OptimierteBestellstrategie`.

Berechnung der Wahrscheinlichkeiten

Wahrscheinlichkeiten für das zweistufige Programm

Sei p die Transfusionswahrscheinlichkeit einer Fachrichtung, dass eine Blutkonserve in den nächsten 3 Tagen transfundiert wird und X eine Bernoulliverteilte Zufallsvariable mit Erfolgswahrscheinlichkeit p , dann gibt X den Verbrauch eine Blutkonserve in den nächsten 3 Tagen an. Werden n Blutkonserven gleicher Transfusionswahrscheinlichkeit angefordert, dann gibt $P(Y = y) = \binom{n}{y} p^y (1-p)^{n-y}$ die Wahrscheinlichkeit an, dass genau y Konserven verbraucht werden, wobei $Y = \sum_{i=1}^n X_i$ ist. Der Verbrauch angeforderter Blutkonserven aus verschiedenen Fachrichtungen ist stochastisch unabhängig. Dadurch ist die Wahrscheinlichkeit $P(Z = n)$, dass n Blutkonserven aus f verschiedenen Fachrichtungen transfundiert werden gegeben durch

$$P(Z = n) = \sum_{y_1 + \dots + y_f = n} \prod_{i=1}^f P(Y_i = y_i). \quad (4.1)$$

Die hierfür implementierte Klasse `UnabhaengigieWahrscheinlichkeiten` liest die Anzahl angeforderter Blutkonserven aus der Geprüft-Liste des KonservenPools aus und berechnet die Wahrscheinlichkeiten wie in 4.1, indem über alle möglichen Permutationen des Verbrauchs aus diesen Fachrichtungen iteriert wird und die Wahrscheinlichkeiten aufsummiert werden.

Wahrscheinlichkeiten für das Mehrstufige Programm

Bedingte Wahrscheinlichkeiten

Zusätzlich zur Transfusionswahrscheinlichkeit p über 3 Tage lässt sich noch die Verteilung auf die einzelnen Tage bestimmen. Sei t_i die Wahrscheinlichkeit, dass die Transfusion der Blutkonserve auf den i -ten Tag fällt. Dann ergeben sich für eine Blutkonserve folgende 4 möglichen Ausgänge. Die Blutkonserve wird am ersten, zweiten oder dritten Tag oder gar nicht transfundiert. Diesen Verlauf kann man mit 3 Bernoulliverteilten Zufallsvariablen beschreiben. X gibt den Verbrauch am ersten Tag, Y gibt den Verbrauch am zweiten Tag und Z gibt den Verbrauch am dritten Tag an. Dass eine Blutkonserve am zweiten oder dritten Tag transfundiert werden kann, hängt hierbei davon ab, ob sie an den vorigen Tagen nicht transfundiert wurde. Es entsteht also eine Abhängigkeit zwischen den Zufallsvariablen.

4. Implementierung

Die Abbildung 4.1 zeigt den Verlauf mit den Wahrscheinlichkeiten als Szenarienbaum.

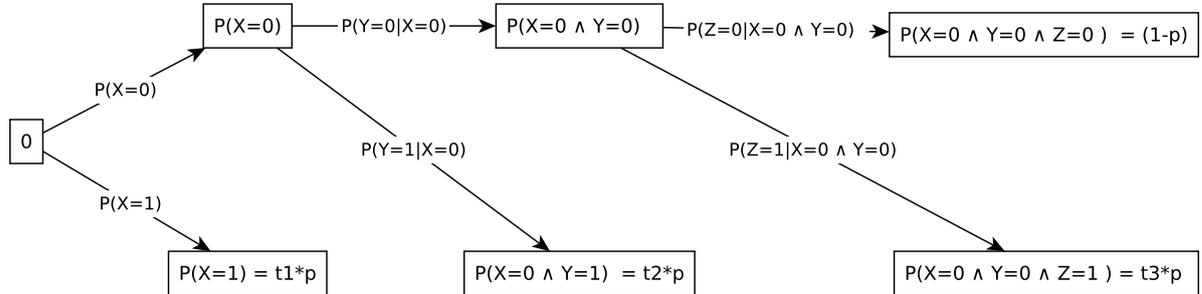


Abbildung 4.1.: Transfusionsverlauf einer Blutkonserve

Die Wahrscheinlichkeiten für die restlichen Szenarien, sowie für die bedingten Wahrscheinlichkeiten berechnen sich wie folgt:

$$\begin{aligned}
 (1 - p_1) &= P(X = 0) = (1 - (t_1 p)) \\
 P(X = 0 \wedge Y = 0) &= P(Z = 1 \wedge Y = 0 \wedge X = 0) + P(Z = 0 \wedge Y = 0 \wedge X = 0) \\
 p_2 &= P(Y = 1 | X = 0) = \frac{P(Y = 1 \wedge X = 0)}{P(X = 0)} \\
 P(Y = 0 | X = 0) &= \frac{P(Y = 0 \wedge X = 0)}{P(X = 0)} \tag{4.2} \\
 p_3 &= P(Z = 1 | X = 0 \wedge Y = 0) = \frac{P(Z = 1 \wedge Y = 0 \wedge X = 0)}{P(X = 0 \wedge Y = 0)} \\
 P(Z = 0 | X = 0 \wedge Y = 0) &= \frac{P(Z = 0 \wedge Y = 0 \wedge X = 0)}{P(X = 0 \wedge Y = 0)}
 \end{aligned}$$

Dann ergibt sich für das Szenario an dem am ersten Tag x , am zweiten Tag y und am dritten Tag z von insgesamt N angeforderten Blutkonserven transfundiert werden eine Wahrscheinlichkeit von:

$$\begin{aligned}
 P(X = x \wedge Y = y \wedge Z = z) &= \\
 \binom{N}{x} p_1^x (1 - p_1)^{N-x} \binom{N-x}{y} p_2^y (1 - p_2)^{N-x-y} \binom{N-x-y}{z} p_3^z (1 - p_3)^{N-x-y-z}, \tag{4.3}
 \end{aligned}$$

wobei hier X, Y und Z die binomialverteilten Zufallsvariablen sind. Auf f Fachrichtungen bezogen ergibt sich dann für das Szenario an dem am ersten Tag x , am zweiten Tag y und

am dritten Tag z von insgesamt $N = \sum_{i=1}^f N_i$ angeforderten Blutkonserven eine Wahrscheinlichkeit von:

$$P(X = x \wedge Y = y \wedge Z = z) = \sum_{x_1 + \dots + x_f = x} \sum_{y_1 + \dots + y_f = y} \sum_{z_1 + \dots + z_f = z} \prod_{i=1}^f P(X_i = x_i \wedge Y_i = y_i \wedge Z_i = z_i) \quad (4.4)$$

Die hierfür implementierte Klasse `BedingteWahrscheinlichkeiten` liest die Anzahl angeforderter Blutkonserven aus der Geprüft-Liste des KonservenPools aus und berechnet die Wahrscheinlichkeiten wie in 4.4, indem ein Baum aufgespannt wird der für alle möglichen Permutationen des Verbrauchs einen Knoten erzeugt und die bedingten Wahrscheinlichkeiten ausrechnet. Seien N_1, \dots, N_f die Anzahlen von Blutkonserven aus f Fachrichtungen die an diesem Szenario potentiell transfundiert werden könnten, dann werden für diesen Knoten insgesamt $\prod_{i=1}^f (N_i + 1)$ Kinder erzeugt.

Unabhängige Wahrscheinlichkeiten

Der Rechenaufwand zur Berechnung der bedingten Wahrscheinlichkeiten aus 4.2.1 ist sehr hoch. Für die Simulation soll eine einfachere und zeitsparendere Berechnungsmethode verwendet werden. Dazu wird angenommen, dass die Wahrscheinlichkeiten, dass eine Blutkonserve am ersten, zweiten oder dritten Tag transfundiert wird unabhängig sind und dass im Verlauf zuvor noch keine Blutkonserven transfundiert wurden. Es werden also die Wahrscheinlichkeit, $P(Y = y)$ anstelle $P(Y = y | X = x)$ bzw. $P(Z = z)$ anstelle $P(Z = z | X = x \wedge Y = y)$ verwendet. Dadurch sind die Wahrscheinlichkeiten der Szenarien der Stufe 2 die selben. Nur auf den Stufen 3 und 4 kommt es zu kleinen Abweichungen. Diese Abweichungen wurden für kleine Instanzen gemessen und stellten sich als gering heraus.

Die hierfür implementierte Klasse `UnabhengigieWahrscheinlichkeiten` liest die Anzahl angeforderter Blutkonserven aus der Geprüft-Liste des KonservenPools aus und berechnet die Wahrscheinlichkeiten für alle möglichen Szenarien wie folgt:

$$P(S_k) = \binom{n}{k} P(X = k)^k (1 - P(X = k))^{n-k} \quad (4.5)$$

$$P(S_{ki}) = P(S_k) \cdot \binom{n}{i} P(Y = i)^i (1 - P(Y = i))^{n-i} \quad (4.6)$$

$$P(S_{kij}) = P(S_k) \cdot P(S_{ki}) \cdot \binom{n}{j} P(Z = j)^j (1 - P(Z = j))^{n-j} \quad (4.7)$$

5. Auswertung

5.1. Simulation

Ziel der Simulation ist es die Frage zu beantworten, ob durch stochastische Bestellmengenoptimierung der Verfall von Blutkonserven vermieden werden kann. Dafür soll gelten, dass Blutkonserven eine Runde im Voraus angefordert werden. Es werden pro Durchlauf insgesamt 405 Runden durchlaufen, wobei die ersten 40 Runden als Vorlauf dienen, da dort noch keine Blutkonserven verfallen können. Die letzten 365 Runden repräsentieren ein Krankenhausjahr und nur aus den letzten 365 Runden werden auch Daten zur Auswertung verwendet. Da mehrere Bestellstrategien auf dem gleichen Simulator operieren, wird die Haltbarkeit der Blutkonserven konstant auf 27 Runden gesetzt, was dem abgerundetem Erwartungswert der Datenauswertung für den Zeitraum ab 09.2010 entspricht. Der Simulator ist auch auf den Zeitraum ab 09.2010 eingestellt. Es werden insgesamt 6 Bestellstrategien verwendet. In Klammern stehen die Bezeichner der Modelle.

1. LagerModell (LagerModell)
2. Zweistufiges Programm mit Expresskosten von 3 (Zweistufig3)
3. Zweistufiges Programm mit Expresskosten von ∞ (ZweistufigInfy)
4. Mehrstufiges Programm mit Expresskosten von 2 (Mehrstufig2)
5. Mehrstufiges Programm mit Expresskosten von 3 (Mehrstufig3)
6. Mehrstufiges Programm mit Expresskosten von ∞ (MehrstufigInfy)

Die Strategien mit Expresskosten von ∞ repräsentieren die Strategie, die alle angeforderten Blutkonserven bestellt. Es ist nochmals anzumerken, dass die Expresskosten nicht den beschriebenen Kosten für Expressbestellungen 2.1 entsprechen, sie dienen eher dazu den Anteil an Expressbestellungen zu steuern. Im Extremfall könnte man sonst einfach alles per Express bestellen und es würde in den entsprechenden Modellen kein Verfall mehr auftreten.

Boxplots

Zur Visualisierung der Daten werden Boxplots verwendet. Der Bereich der Box wird durch das untere Quartil von 25 % und das obere Quartil von 75 % der Daten begrenzt. Der Strich

kennzeichnet den Median. Die Länge der whiskers entspricht dem 1,5-Fachen Interquartilsabstand. Ausreißer werden durch ein + dargestellt.

5.1.1. Ergebnisse der Simulation

Insgesamt wurden 400 Durchläufe durchgeführt. Die wichtigsten Ergebnisse werden in der Tabelle 5.1, sowie den 2 Abbildungen 5.1 und 5.2 dargestellt. Zur besseren Übersicht sind die Daten des LagerModells in Abbildung 5.1 mit einer anderen Skala gedruckt. Es ist zu erkennen, dass die optimierten Modelle eine Verbesserung der Verfallsraten von über 1000 % erreichen. Selbst das Modell MehrstufigInfty, welches ohne Expressbestellungen auskommt, erreicht eine Verbesserung von über 200 %. Die Raten der Expressbestellungen sind nicht unmittelbar miteinander zu vergleichen. Das liegt daran, dass bei den optimierten Modellen erst auf Express zurückgegriffen wird, wenn die Blutkonserve auch transfundiert werden soll. Bei dem LagerModell hingegen wird bereits bei der Anforderung der Blutkonserven auf Expressbestellungen zurückgegriffen. Im Gegenzug bedeutet dies, dass nur in 5 % der Fälle nicht genügend Blutkonserven im Voraus bestellt wurden (Mehrstufig3).

Strategie	Verfall			Express		
	min	max	Mittelwert	min	max	Mittelwert
LagerModell	9.278	15.527	12.47	8.396	18.656	12.666
Zweistufig3	0.06	1.344	0.547	7.018	10.52	8.546
ZweistufigInfty	0.937	3.602	2.209	0.0	0.0	0.0
Mehrstufig2	0.0	0.654	0.304	9.119	13.813	11.435
Mehrstufig3	0.06	1.409	0.59	3.03	6.224	4.779
MehrstufigInfty	1.3	5.127	3.369	0.0	0.0	0.0

Tabelle 5.1.: Relative Simulationsergebnisse des Verfalls/Express der einzelnen Bestellstrategien aus 400 Durchläufen (gerundet).

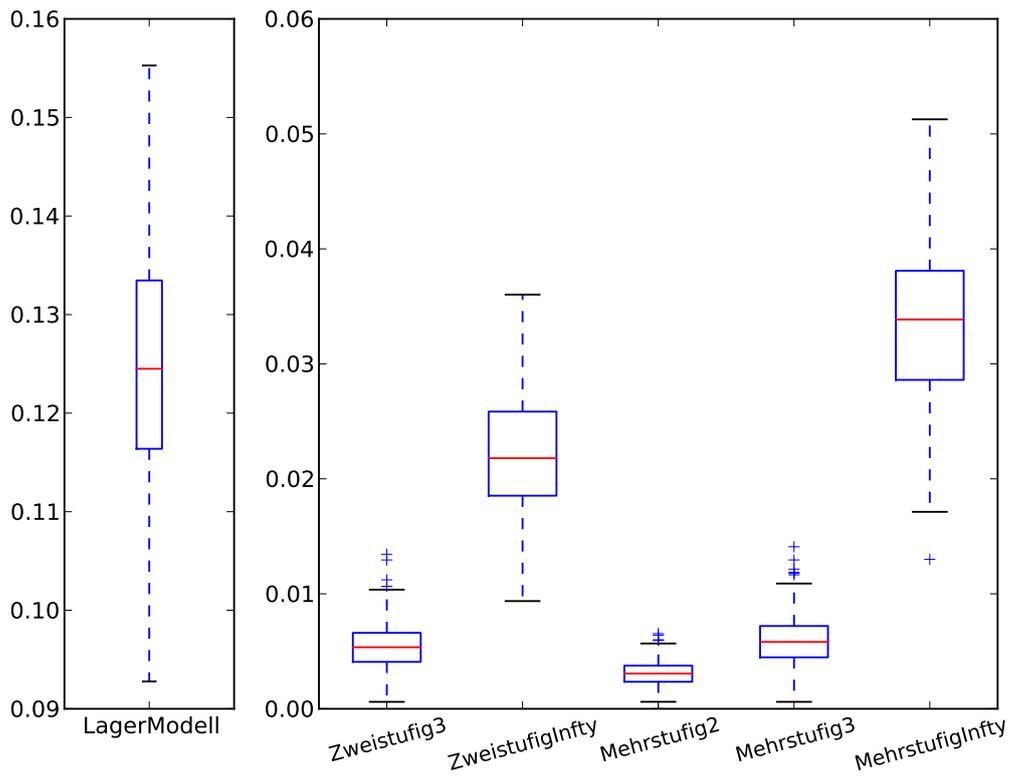


Abbildung 5.1.: Boxplots der Verfallsraten aller Strategien.

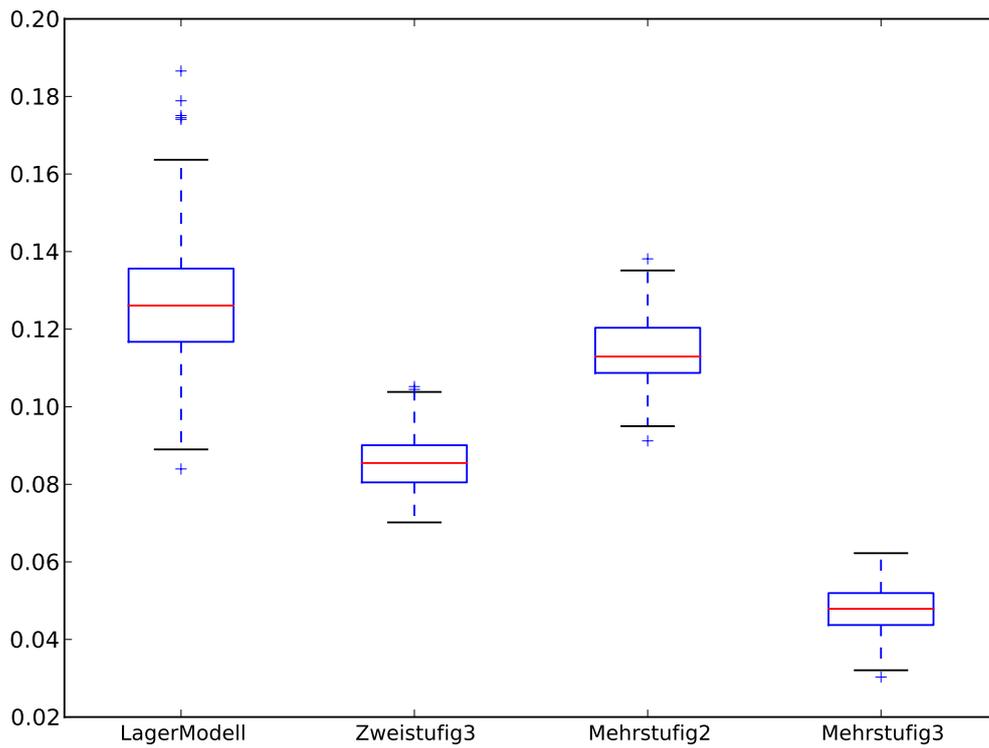


Abbildung 5.2.: Boxplots der Expressbestellungsraten aller Strategien.

5.2. Einfluss der Umstellung der chirurgischen Abteilung auf den Verfall

Wie im Anhang A in Tabelle A.2 zu erkennen ist, ist der Anteil der Ereignisse der chirurgischen Abteilung von 25,8 % vor dem 01.09.2010 auf nur noch 15,5 % nach dem 01.09.2010 gefallen. Einhergehend sank auch die erwartete Anzahl Patienten pro Tag in der chirurgischen Abteilung. In den anderen Abteilungen haben sich die Patientenzahlen pro Tag kaum geändert, so dass insgesamt weniger Patienten pro Tag mit Blutprodukten behandelt wurden. In Abbildung 5.3 sieht man die Verfallsrate über alle Blutgruppen. Abbildung 5.4 zeigt die Verfallsraten je Blutgruppe. Wie vom Klinikum beobachtet erzeugt die Testumgebung ein ähnliches Verhalten der Verfallsraten.

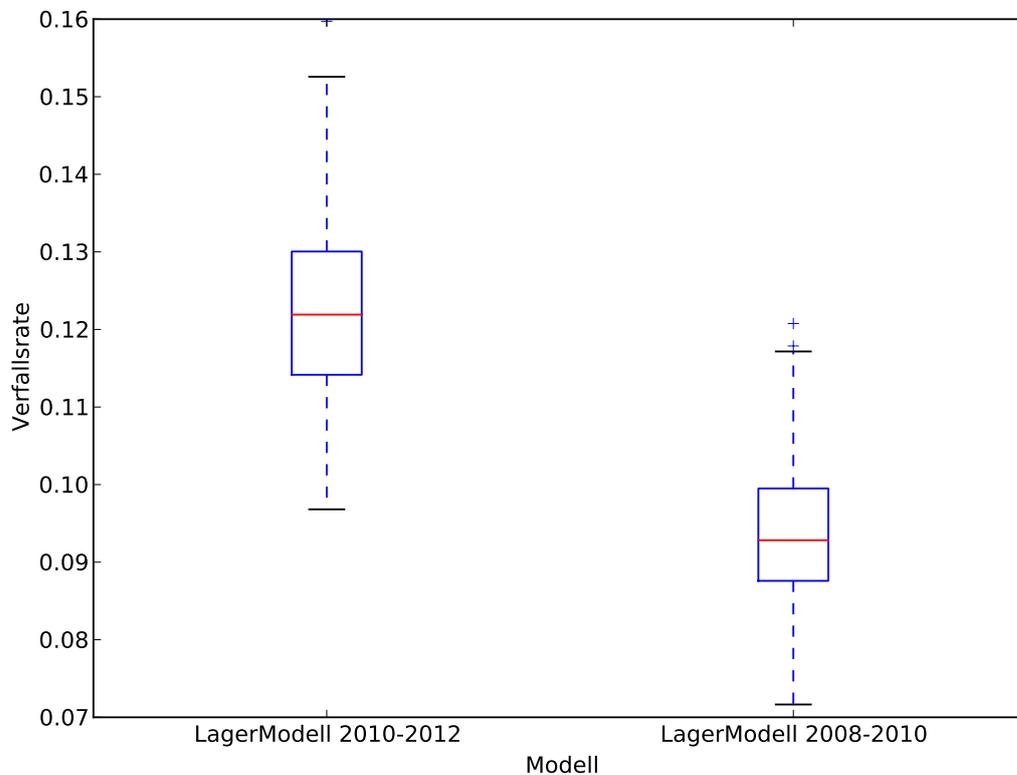


Abbildung 5.3.: Anteil verfallener zu bestellter Blutkonserven insgesamt.

Es ist zu erkennen, dass bei den seltenen Blutgruppen die Verfallsrate teils deutlich an-

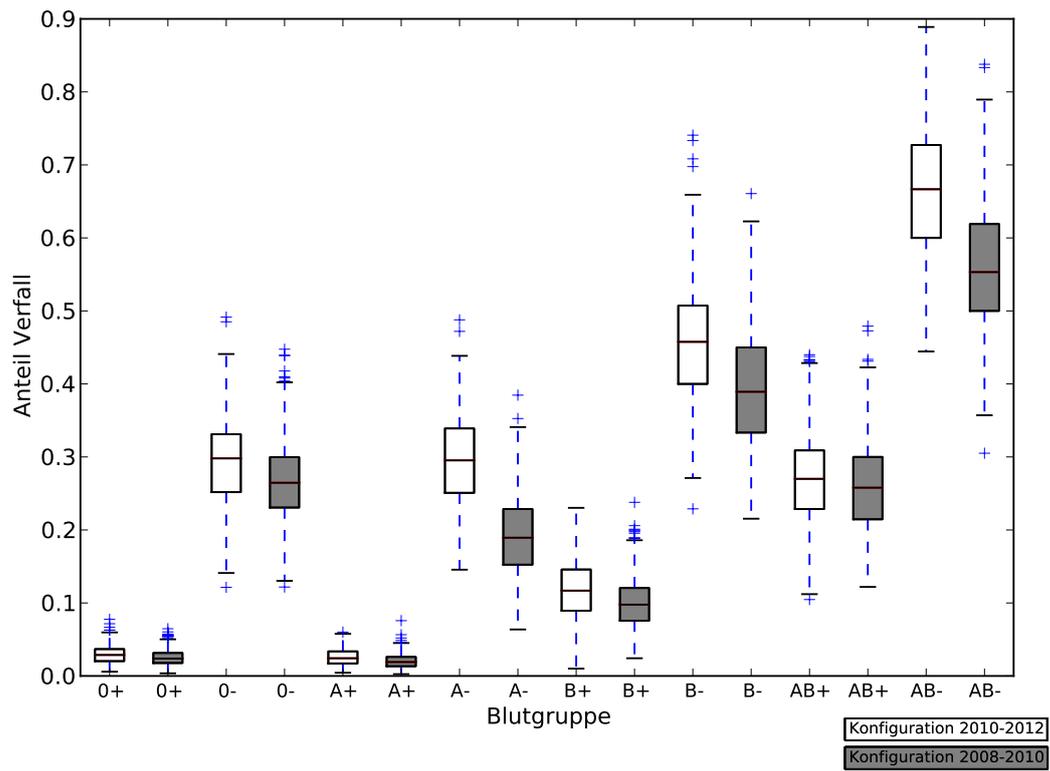


Abbildung 5.4.: Anteil verfallener zu bestellter Blutkonserven je Blutgruppe.

steigt. Das kommt daher, dass die Lagerkonstanten nicht weiter runtergesetzt werden können, da diese bereits auf ein Minimum reduziert wurden. Durch die geringere Anzahl Patienten pro Tag verändert sich auch die Anzahl Ereignisse pro Blutgruppe und deren Verteilung auf ein Jahr. Dies soll durch den nächsten Versuch bestätigt werden.

5.2.1. Vergleich der Simulatorkonfigurationen

In diesem Versuch sollen die Simulatorkonfigurationen bezüglich der Abstände zwischen 2 Ereignissen der selben Blutgruppe verglichen werden. Dazu wurden jeweils 1000 Durchläufe mit jeweils 365 Runden simuliert und die Abstände zwischen den Tagen zweier aufeinander folgender Ereignisse der selben Blutgruppe gemessen. Die nächste Tabelle zeigt den mittleren Abstand je Blutgruppe beider Simulatorkonfigurationen.

	0+	0-	A+	A-	B+	B-	AB+	AB-
08-10	1.364	4.704	1.332	4.746	3.366	12.883	6.749	23.72
10-12	1.464	5.251	1.426	5.267	3.742	14.319	7.522	26.674

Tabelle 5.2.: Gemittelter Tagesabstand zwischen zwei Ereignissen je Blutgruppe

Bei den häufig vorkommenden Blutgruppen ist der Tagesabstand kaum verändert. Bei den Blutgruppen 0-, A-, B-, und AB- steigt der Abstand deutlich, wodurch eine Blutkonserve im Schnitt, für einen Patienten weniger pro Haltbarkeitsperiode geprüft werden kann. Bei einer Haltbarkeit von 27 Tagen, kann man also erwartungsgemäß davon ausgehen, dass eine Blutkonserve der Blutgruppe AB- verfällt, wenn sie nicht an den Patienten transfundiert wird, für den sie bestellt wurde.

5.3. Änderung der Lagerkonstanten

In diesem Abschnitt soll überprüft werden, ob die Änderung einiger/aller Lagerkonstanten eine positive Auswirkung auf die Verfallsrate hat. Dazu wurden 200 Durchläufe mit LagerModellen durchgeführt, bei denen jeweils nur die Lagerkonstante einer Blutgruppe gesenkt wurde. Als Vergleich wurde das normale LagerModell herangezogen. Wie erwartet stieg der Anteil an Expressbestellungen und die Verfallsrate sank. Nicht bei allen Blutgruppen würde jedoch eine Senkung der Lagerkonstanten den erhöhten Anteil an Expressbestellungen rechtfertigen. Tabelle 5.3 zeigt das Verhältnis von Verfall zu Express bei geänderten Lagerkonstanten. Auf Basis der Tabelle 5.3 würde eine Senkung der Lagerkonstanten der Blutgruppen 0- auf 4, A- auf 4 und AB- auf 2 Blutkonserven den größten Einfluss haben. Da in den meisten Fällen 2 oder mehr Blutkonserven pro Ereignis (vgl. A) angefordert werden, sind Lagerkonstanten von 1 oder 0 eher unrealistisch. Zum Vergleich

5. Auswertung

Blutgruppe	0+	0+	0+	0-	0-	A+	A+	A+
Geändert von	14	14	14	5	5	14	14	14
Geändert auf	13	12	11	4	3	13	12	11
Verfall/Express	0,175	0,148	0,125	0,920	0,713	0,138	0,124	0,099
Blutgruppe	A-	A-	B+	B+	B-	AB+	AB-	AB-
Geändert von	5	5	3	3	2	2	3	3
Geändert auf	4	3	2	1	1	1	2	1
Verfall/Express	0,888	0,707	0,193	0,154	0,862	0,395	3,23	2,196

Tabelle 5.3.: Änderung der Lagerkonstanten je Blutgruppe und deren Auswirkung auf das Verhältnis von Verfall zu Expressbestellungen

wurden in 300 Durchläufen das normale LagerModell und 2 LagerModelle mit veränderten Konstanten getestet. Die Abbildungen 5.5 und 5.6 zeigen die Verfallsrate bzw. den Anteil an Expressbestellungen der LagerModelle, benannt nach den Lagerkonstanten. Die LagerModelle mit den angepassten Konstanten haben einen um 1,25% bzw. 3,67% geringeren Verfall und weisen 1,1% bzw. 6,78% mehr Expressbestellungen auf. Vergleicht man letztere Werte mit den Simulatorwerten der Jahre 2008 bis 2010, so erreicht man zwar ähnliche Verfallsraten, der Anteil an Expressbestellungen steigt aber auf mehr als das Doppelte an.

5. Auswertung

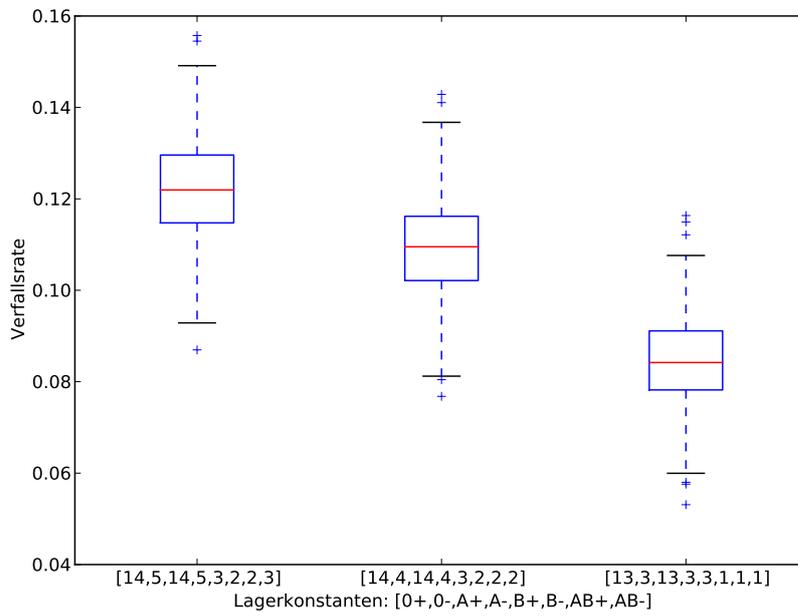


Abbildung 5.5.: Verfallsraten des LagerModells mit geänderten Lagerkonstanten im Vergleich.

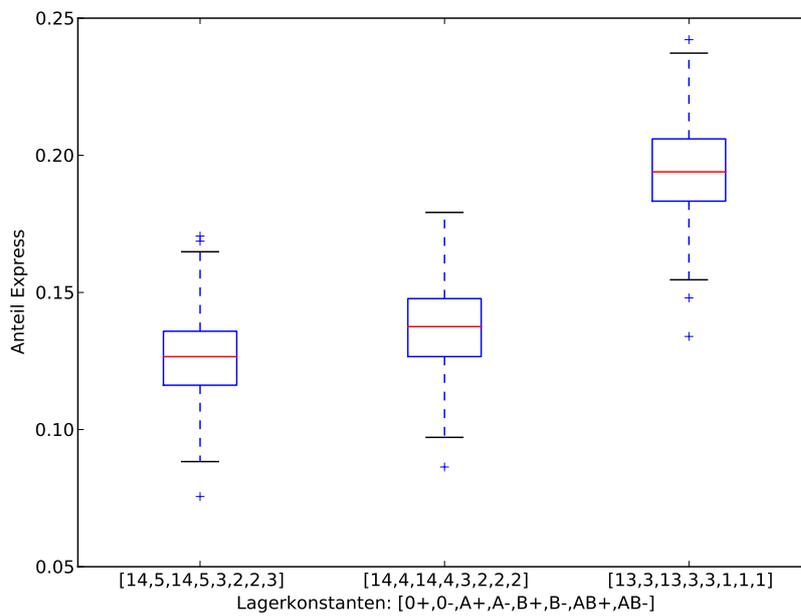


Abbildung 5.6.: Anteil Expressbestellungen des LagerModells mit geänderten Lagerkonstanten im Vergleich.

6. Fazit und Ausblick

An den Daten aus Tabelle 5.1 und der Abbildung 5.1 kann man sehr gut sehen, dass eine bedarfsorientierte Bestellstrategie dem einfachen Lagermodell, bezüglich planbarer Ereignisse, bei den Verfallsraten deutlich überlegen ist. Zusätzlich kann durch stochastisch optimierte Bestellstrategien der Verfall auf weniger als 1 % reduziert werden. Da planbare Ereignisse den größten Teil des Blutkonservenbedarfs ausmachen, könnten also bedarfsorientierte Bestellstrategien den Verfall von Blutkonserven verringern. Das bedeutet aber gleichzeitig, dass selbst unter vereinfachten Bedingungen ein Verfall von Blutkonserven nicht vermeidbar ist. Da in erster Linie geprüft werden sollte, ob Verfall vermeidbar ist, sind 4 der 6 verwendeten Modelle in der Realität schwer anwendbar. Das liegt zum einen daran, dass die Modelle mit Informationen arbeiten, die in der Realität zu diesem Zeitpunkt noch nicht zur Verfügung stehen, wie bei den zweistufigen Modellen, bei denen schon am Tag nach der Bestellung fest steht, wie viel der angeforderten Blutkonserven transfundiert werden. Zudem ist es riskant, erst per Express Blutkonserven nachzubestellen, wenn diese transfundiert werden sollen, wie bei den Modellen Mehrstufig2 und Mehrstufig3. Mit der Problematik, dass mit weniger Blutkonserven als angefordert gearbeitet wird, beschäftigt sich Sina Bachsmann in einer weiteren Bachelorarbeit. Als anwendbares Modell gilt hier MehrstufigInfty. Mit immernoch sehr guten Verfallsraten um die 4 %, ohne auf Expressbestellungen zurückgreifen zu müssen.

Es stellt sich noch die Frage nach der erhöhten Verfallsrate im Klinikum. Dies erklärt sich durch die verringerte Anzahl Patienten pro Tag, durch die Umstellung in der Chirurgischen Abteilung. Da auch bei den seltenen Blutgruppen eine Mindestanzahl von 2 Blutkonserven auf Lager nicht unterschritten werden kann, kommt es zu deutlich mehr verfallenen Blutkonserven.

In Abschnitt 5.3 zeigt sich, dass eine Senkung der Lagerkonstanten keine signifikanten Änderungen bezüglich der Verfallsraten mitsichbringt, ohne gleichzeitig den Anteil an Expressbestellungen in die Höhe zu treiben. Insgesamt sind die Lagerkonstanten gut auf die Patientenzahlen eingestellt. Sollten die Patientenzahlen aber weiter sinken, so wird die Verfallsrate wahrscheinlich weiter ansteigen.

A. Daten

Die folgenden Daten in den Tabellen sind gerundet und dienen nur der Veranschaulichung. Der Simulator benutzt die nicht gerundeten Daten.

A.1. Simulator

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
2010-2012	0.053	0.135	0.177	0.188	0.157	0.123	0.073	0.042	0.033	0.011
2008-2010	0.036	0.09	0.153	0.177	0.178	0.144	0.099	0.064	0.025	0.017
	10	11	12	17						
2010-2012	0.006		0.001	0.001						
2008-2010	0.015	0.002	0.001							

Tabelle A.1.: Anzahl Patienten pro Tag

	NRO	GYN	GAS	GEB	INN	PSY	KIN	CHI	ZPA	CUN
2010-2012	0.031	0.009	0.004	0.008	0.329	0.002	0.009	0.155	0.058	0.395
2008-2010	0.035	0.007	0.001	0.004	0.33	0.003	0.008	0.258	0.029	0.325

Tabelle A.2.: Verteilung der Patienten pro Tag auf Fachrichtungen

	NRO	CHI	GAS	GEB	INN	PSY	KIN	GYN	ZPA	CUN
2010-2012	0.528	0.372	0.58	0.5	0.667	0.4	0.981	0.368	0.392	0.352
2008-2010	0.612	0.386	0.667	0.717	0.679	0.643	0.865	0.544	0.535	0.399

Tabelle A.3.: Transfusionswahrscheinlichkeiten pro Fachrichtung

Jahr	Anzahl	NRO	GYN	GAS	GEB	INN	PSY	KIN	CHI	ZPA	CUN
2010-2012	1	0.022	0.077			0.038		0.038	0.046	0.023	0.029
2008-2010	1	0.062	0.042		0.071	0.032		0.033	0.024	0.056	0.027
2010-2012	2	0.789	0.538	0.308	0.739	0.645	1.0	0.923	0.571	0.526	0.78
2008-2010	2	0.729	0.5	0.5	0.643	0.648	0.636	0.833	0.638	0.574	0.803
2010-2012	3	0.044	0.115		0.043	0.087		0.038	0.079	0.099	0.025
2008-2010	3	0.039	0.042			0.067	0.273	0.033	0.069	0.046	0.02
2010-2012	4	0.111	0.231	0.462	0.13	0.175			0.251	0.257	0.128
2008-2010	4	0.147	0.292	0.5	0.071	0.187		0.067	0.21	0.241	0.118
2010-2012	5		0.038			0.008			0.011	0.029	0.002
2008-2010	5	0.008	0.042			0.017	0.091		0.014		0.007
2010-2012	6	0.022		0.231		0.023			0.022	0.023	0.028
2008-2010	6	0.016			0.071	0.021			0.023	0.056	0.015
2010-2012	7				0.043	0.002			0.002	0.012	0.001
2008-2010	7				0.071	0.003			0.004		0.001
2010-2012	8	0.011				0.009			0.011	0.012	0.006
2008-2010	8		0.042			0.012			0.009	0.009	0.003
2010-2012	9					0.001			0.002		
2008-2010	9					0.002					0.002
2010-2012	10				0.043	0.005				0.006	0.001
2008-2010	10		0.042			0.002			0.002		0.003
2010-2012	11										
2008-2010	11					0.001			0.001		
2010-2012	12					0.005			0.004	0.006	0.001
2008-2010	12					0.002		0.033	0.001		
2010-2012	13					0.001				0.006	0.001
2008-2010	13									0.009	
2010-2012	14										
2008-2010	14					0.003			0.003		
2010-2012	15										
2008-2010	15								0.001		
2010-2012	16										
2008-2010	16										
2010-2012	17										
2008-2010	17					0.001					
2010-2012	18										
2008-2010	18										
2010-2012	19										
2008-2010	19									0.009	
2010-2012	24										
2008-2010	24				0.071						

Tabella A.4.: Anzahl angeforderter Blutkonserven pro Patient und Tag je Fachrichtung

A. Daten

Jahr	Tag	NRO	GYN	GAS	GEB	INN	PSY	KIN	CHI	ZPA	CUN
2010-2012	0	0.865	0.778	0.655	0.82	0.681	1.0	1.0	0.636	0.687	0.554
2008-2010	0	0.816	0.647	0.875	0.875	0.732	0.8	0.972	0.71	0.772	0.573
2010-2012	1	0.127	0.148	0.345	0.18	0.258	0.0	0.0	0.254	0.247	0.296
2008-2010	1	0.143	0.314	0.125	0.125	0.213	0.2	0.028	0.203	0.19	0.278
2010-2012	2	0.008	0.074	0.0	0.0	0.062	0.0	0.0	0.11	0.066	0.15
2008-2010	2	0.041	0.039	0.0	0.0	0.054	0.0	0.0	0.087	0.037	0.148

Tabelle A.5.: Verteilung der transfundierten Blutkonserven je Fachrichtung auf die 3 Tage nach der Prüfung

Literaturverzeichnis

- [1] DRK-Blutspendedienste. Blutgruppenverteilung, 2009. URL http://www.drk-blutspende.de/informationen_zur_blutspende/blutgruppenverteilung.php. Abgerufen am 04.01.2013.
- [2] DRK-Blutspendedienste. Wofür werden Blutspenden benötigt?, 2009. URL http://www.drk-blutspende.de/informationen_zur_blutspende/wofuer_werden_blutspenden_benoetigt.php. Abgerufen am 18.03.2013.
- [3] Python Software Foundation. Python 2.7.3, 2012. URL <http://www.python.org/download/releases/2.7.3/>. Abgerufen am 19.03.2013.
- [4] IBM. IBM ILOG CPLEX Optimization Studio Information Center. URL <http://pic.dhe.ibm.com/infocenter/cosinfoc/v12r4/index.jsp>. Abgerufen am 19.03.2013.
- [5] Konrad Schade. *Stochastische Optimierung : Bestandsoptimierung in mehrstufigen Lagernetzwerken*. Wiesbaden : Vieweg + Teubner, 2012.
- [6] Herold Dehling und Beate Haupt. *Einführung in die Wahrscheinlichkeitstheorie und Statistik*, page 292. 2. Auflage. Springer, 2004.
- [7] Alexander Shapiro und Darinka Dentcheva und Andrzej Ruszczyński. *Lectures on stochastic programming : modeling and theory*. MPS SIAM series on optimization ; 9. SIAM, Society for Industrial and Applied Mathematics and the Mathematical Programming Society, 2009.
- [8] Dr. Frank Simon und Peter Schlee. *Qualitätsmanagementhandbuch für die klinische Anwendung von Blutkomponenten und Plasmaderivaten im Klinikum Emden*. Ulrich Pomberg, Geschäftsführer Klinikum Emden, 13.10.2011.