

# REPORT DOCUMENTATION PAGE

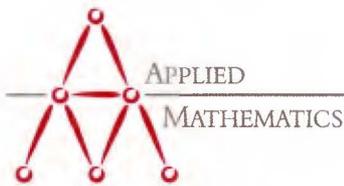
Form Approved OMB No. 0704-0188

Public reporting burden for this collection of information is estimated to average 1 hour per response, including the time for reviewing instructions, searching existing data sources, gathering and maintaining the data needed, and completing and reviewing the collection of information. Send comments regarding this burden estimate or any other aspect of this collection of information, including suggestions for reducing this burden to Washington Headquarters Services, Directorate for Information Operations and Reports, 1215 Jefferson Davis Highway, Suite 1204, Arlington, VA 22202-4302, and to the Office of Management and Budget, Paperwork Reduction Project (0704-0188), Washington, DC 20503.

1. AGENCY USE ONLY (Leave blank)		2. REPORT DATE  27 March 2017	3. REPORT TYPE AND DATES COVERED	
Optimierte Flugroutenplanung des Wargames "Enhanced LUNA Warrior"  (Optimized flight route planning for the Wargame "Enhanced LUNA Warrior")				
6. AUTHOR(S)  Leonie Johannsmann				
7. PERFORMING ORGANIZATION NAME(S) AND ADDRESS(ES)  UNIBW			8. PERFORMING ORGANIZATION REPORT NUMBER	
9. SPONSORING/MONITORING AGENCY NAME(S) AND ADDRESS(ES)  Helmut-Schmidt-Universität Holstenhofweg 85 22043 Hamburg Germany			10. SPONSORING/MONITORING AGENCY REPORT NUMBER	
11. SUPPLEMENTARY NOTES  Text in German.				
12a. DISTRIBUTION/AVAILABILITY STATEMENT  Public release. Copyrighted. (1 and 20)			12b. DISTRIBUTION CODE	
ABSTRACT (Maximum 200 words)  The training of the air traffic controller Sergeant LUNA is extensive and demanding. For a successful work with the unmanned aircraft is a great comprehension and concentration necessary to the aircraft to control and evaluate the image material at the same time. For support, this training was developed in the course General Staff Service / Admiralstabsdienst national (LGAN) 2015 by Ms. Major Matuszewski, the wargame "Enhanced LUNA Warrior" the necessary characteristics of the budding aircraft Sergeant by a playful simulation of a reconnaissance mission. To estimate the abilities, the player is accompanied the wargame with operations research. About one linear optimizer will calculate an optimal flight route that shows the player how close his results are to the optimum. The aim of the seminar work is the development of a program that supports the wargame and the training of the aviation field sergeants by means of linear optimization. The optimal planning of such a flight route is already mathematically treated in the paper by Moshe Kress and Johannes O. Royset from the year 2008 and serves as the basis of the Wargame and the linear optimization. In the seminar paper, the paper and the wargame are presented in advance. In the chapter Fundamentals, the topic Operations Research is related to linear optimization and its methods explained. The mathematical formulation of the program itself follows in the chapter Mathematical Model and shows the implementation of mathematical formulas in the modeling environment AIMMS. Afterwards the results are illuminated, which in the course of an experiment. Machine assisted translation.				
14. SUBJECT TERMS  UNIBW, German, Simulation, flight route planning, Wargame, Enhanced LUNA Warrior			15. NUMBER OF PAGES	
			16. PRICE CODE	
17. SECURITY CLASSIFICATION OF REPORT  UNCLASSIFIED	18. SECURITY CLASSIFICATION OF THIS PAGE  UNCLASSIFIED	19. SECURITY CLASSIFICATION OF ABSTRACT  UNCLASSIFIED	20. LIMITATION OF ABSTRACT  UL	

NSN 7540-01-280-5500

Standard Form 298 (Rev. 2-89)  
Prescribed by ANSI Std. Z39-18  
298-102



Angewandte Mathematik und Optimierung Schriftenreihe  
Applied Mathematics and Optimization Series  
AMOS # 52(2017)

Leonie Johannsmann

Optimierte Flugroutenplanung des Wargames  
„Enhanced LUNA Warrior“

Herausgegeben von der  
Professur für Angewandte Mathematik  
Professor Dr. rer. nat. Armin Fügenschuh

Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg  
Fachbereich Maschinenbau  
Holstenhofweg 85  
D-22043 Hamburg

Telefon: +49 (0)40 6541 3540  
Fax: +49 (0)40 6541 3672

e-mail: [appliedmath@hsu-hh.de](mailto:appliedmath@hsu-hh.de)  
URL: <http://www.hsu-hh.de/am>

Angewandte Mathematik und Optimierung Schriftenreihe (AMOS), ISSN-Print 2199-1928  
Angewandte Mathematik und Optimierung Schriftenreihe (AMOS), ISSN-Internet 2199-1936



HELMUT SCHMIDT  
UNIVERSITÄT

Universität der Bundeswehr Hamburg

**Leonie Johannsmann**

Optimized flight route planning for the Wargame  
„Enhanced LUNA Warrior “

Optimierte Flugroutenplanung des Wargames  
„Enhanced LUNA Warrior “

Seminararbeit

---

Fakultät für Maschinenbau

Studiengang: Wirtschaftsingenieurwesen  
Matr.-Nr. 866950  
Eingereicht: 27. März 2017  
Prüfer: Prof. Dr. Armin Fügenschuh

## Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, keine anderen als die im Quellen- und Literaturverzeichnis genannten Quellen und Hilfsmittel, insbesondere keine dort nicht genannten Internet-Quellen benutzt, alle aus Quellen und Literatur wörtlich oder sinngemäß entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe und dass die auf einem elektronischen Speichermedium abgegebene Fassung der Arbeit der gedruckten entspricht.

Hamburg,

.....

(Datum)

(Unterschrift)

## **Zusammenfassung**

Die vorliegende Seminararbeit ist Teil des Wargames „Enhanced LUNA Warrior“ und dient der Ausbildungsunterstützung von Fluggeräteeinsatzfeldwebern des Systems der Luftgestützten-Unbemannten-Nahaufklärungs-Ausstattung (LUNA). Ziel des Brettspiels ist die Aufklärung von irregulären Kräften in einem bestimmten Areal und Zeitfenster. Die Arbeit umfasst eine Programmierung eines linearen Optimierungsproblems in der Modellierungsumgebung AIMMS, die den Spieler über die Bewertung der eigenen und der Darstellung einer optimalen Lösung eine Rückmeldung gibt und auf diesem Wege schult. Die Arbeit basiert auf den Methoden des Operations Research.

This term paper is part of the Wargame „Enhanced LUNA Warrior“ for the training support of aircraft operators of the system LUNA. The aim of the board game is the reconnaissance of irregular forces in a certain area and time. The work consists of programming a linear optimization problem in the modeling environment AIMMS, which gives the player feedback and training via the reconnaissance of his own and the representation of an optimal solution. The term paper is based on the methods of operations research.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Ausgangspunkt</b>	<b>2</b>
2.1	Paper Kress/Royset . . . . .	2
2.2	Wargame . . . . .	3
2.2.1	Spielregeln . . . . .	3
2.2.2	Spielbretter . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Mathematische Grundlagen</b>	<b>8</b>
3.1	Operations Research . . . . .	8
3.2	Lineare Optimierung . . . . .	9
3.3	Simplex-Verfahren . . . . .	10
3.4	Ganzzahlige Lineare Optimierung . . . . .	12
3.5	Branch-and-Bound . . . . .	12
3.6	Moving-Targets Problem . . . . .	13
<b>4</b>	<b>Mathematisches Modell</b>	<b>17</b>
4.1	Mengen . . . . .	17
4.2	Parameter . . . . .	17
4.2.1	Geografische Parameter . . . . .	17
4.2.2	Missionsrelevante Parameter . . . . .	18
4.2.3	Programmrelevante Parameter . . . . .	18
4.3	Variablen . . . . .	19
4.4	Nebenbedingungen . . . . .	19
4.5	Mathematisches Programm . . . . .	21
4.6	Benutzeroberfläche . . . . .	21
<b>5</b>	<b>Daten</b>	<b>23</b>
5.1	Hexagone . . . . .	23



5.2	Zeitschritte . . . . .	23
5.3	Routen . . . . .	24
<b>6</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>25</b>
<b>7</b>	<b>Fazit und Ausblick</b>	<b>28</b>
	<b>Literatur</b>	<b>30</b>

## Abbildungsverzeichnis

2.1	Spielbrett Spielleiter. . . . .	7
2.2	Spielbrett Spieler. . . . .	7
3.1	Simplex Tableau. . . . .	11
3.2	Branch-and-Bound Lösungsbaum. . . . .	13
4.1	Benutzeroberfläche in den Grundeinstellungen. . . . .	22
6.1	Ergebnis Team 1, 2. Durchgang, OR-Unterstützung, gute Wetter- verhältnisse $\varepsilon = 1$ . . . . .	27
6.2	Ergebnis Team 2, 3. Durchgang, keine OR-Unterstützung, schlech- te Wetterverhältnisse $\varepsilon = 0.5$ . . . . .	27

## Abkürzungsverzeichnis

CRM	Crew Resource Management
FA	Feldwebelanwärter
GCU	ground control unit
HptFw	Hauptfeldwebel
ISAF	International Security Assistance Force
KZO	Kleinfluggerät Zielortung
LGAN	Lehrgang Generalstabsdienst/ Admiralstabsdienst national
LUNA	Luftgestützte Unbemannte Nahaufklärungs-Ausstattung
MCC	mobile control center
OFw	Oberfeldwebel
OR	Operations Research
PRT	Provincial Reconstruction Team
StUffz	Stabsunteroffizier
UAV	unmanned aerial vehicle

# 1 Einleitung

Die Ausbildung des Fluggeräteeinsatzfeldwebel LUNA ist umfangreich und fordernd. Für eine erfolgreiche Arbeit mit dem unbemannten Flugzeug ist eine große Auffassungsgabe und Konzentration notwendig, um das Flugzeug zu steuern und gleichzeitig das Bildmaterial auszuwerten. Zur Unterstützung dieser Ausbildung entstand im Zuge der Lehrgangsarbeit im Lehrgang Generalstabdienst/Admiralstabdienst national (LGAN) 2015 von Frau Major Matuszewski das Wargame „Enhanced LUNA Warrior“, das die notwendigen Eigenschaften der angehenden Fluggeräteeinsatzfeldwebel, über eine spielerische Simulation einer Aufklärungsmission, fördert. Zur Einschätzung der Fähigkeiten der Spieler wird das Wargame mit Operations Research begleitet. Über ein lineares Optimierungsprogramm wird eine optimale Flugroute berechnet, die dem Spieler zeigt, wie nah seine Ergebnisse am Optimum sind. Ziel der Seminararbeit ist die Entwicklung eines Programmes, das mittels linearer Optimierung das Wargame und die Ausbildung der Fluggeräteeinsatzfeldwebel unterstützt. Die optimale Planung einer solchen Flugroute wird in dem Paper von Moshe Kress und Johannes O. Royset aus dem Jahr 2008 bereits mathematisch behandelt und dient als Grundlage des Wargames und der linearen Optimierung. In der Seminararbeit wird vorab das Paper und das Wargame näher vorgestellt. In dem Kapitel Grundlagen wird das Thema Operations Research im Bezug auf lineare Optimierung und deren Methoden erklärt. Die mathematische Formulierung des Programmes selbst folgt im Kapitel Mathematisches Modell und zeigt die Implementierung der mathematischen Formeln in der Modellierungsumgebung AIMMS. Im Anschluss werden die Ergebnisse beleuchtet, die im Zuge eines Experiments erhoben wurden.

## 2 Ausgangspunkt

Im folgenden Kapitel werden das Wargame „Enhanced LUNA Warrior“ und das Paper, als dessen Grundlage, näher vorgestellt.

### 2.1 Paper Kress/Royset

Das Wargame basiert auf dem Paper „Aerial Search Optimaziation Model (ASOM) for UAVs in Special Operations“ der Verfasser Moshe Kress und Johannes O. Royset vom Operations Research Department der Naval Postgraduate School, Kalifornien. In dem Paper wird ein Optimierungsmodell vorgestellt, das Kommandanten, Piloten und Flugplaner von unbemannten Luftfahrzeugen (UAV) in Einsätzen unterstützen soll. Von besonderem Interesse sind Situationen, in denen Ziele sich in empfindlichen Gebieten bewegen und aufgeklärt werden müssen. Zur Aufklärung der Ziele stehen in dem Modell mehrere UAVs zur Verfügung, die jeweils von einer Bodenkontrollstation (GCU) gesteuert werden. Die GCUs werten die aufgezeichneten Daten des UAV aus und übermittelt diese über ein mobiles Kontrollzentrum (MCC) an das taktische Operationscenter. Zur Sicherstellung einer reibungslosen Kommunikation ist die Distanz zwischen GCUs und MCCs begrenzt. Daraus ergibt sich die Frage, wie die Stationen angeordnet werden müssen, um eine reibungslose Kommunikation und hohe Reichweite der UAVs effizient zu gestalten. In dem empfindlichen Gebiet gibt es eine Anzahl von möglichen Startpunkten und Routen, die von den Zielen mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit eingeschlagen werden. Aus diesen Möglichkeiten entwickeln sich Szenarien, für die jeweils eine optimale Lösung generiert wird. Bei einem Feldversuch in Camp Roberts, Kalifornien wurde das Modell bereits als Planungshilfsmittel angewandt und konnte positive Ergebnisse verzeichnen. Es ergab sich eine Verbesserung der Aufklärung um 50% im Vergleich zu Planungen von erfahrenen Kommandanten ohne Hilfsmittel [3].

## 2.2 Wargame

Im Zuge der Lehrgangsarbeit des LGAN hat Frau Major Matuszewski aufbauend auf dem Paper von Kress und Roynet ein Brettspiel entwickelt, das die Ausbildung von Drohnenführern unterstützen soll. In dem Wargame muss der Drohnenführer irreguläre Kräfte aufklären, um einen Anschlag zu verhindern. Ziel ist es, den Spieler bei der taktischen Drohnenplanung zu unterstützen und strategisches Denken zu fördern. Im Folgenden wird das Spiel in groben Zügen vorgestellt, da es zum Verständnis des mathematischen Modells essenziell ist. Weitere Details finden sich bei Matuszewski [7].

### 2.2.1 Spielregeln

Im Folgenden werden die Absichten sowie die Durchführung des Wargames erklärt.

#### Szenario

Dem Wargame liegt folgendes Szenario zu Grunde: Irreguläre Kräfte planen in der Region um Kunduz einen terroristischen Anschlag auf die Brücke zwischen Hazrat-e Soltan und Eshanan. Wie auf den Abbildungen 2.1 und 2.2 zu sehen ist, befindet sich der Anschlagort im Spiel auf dem Hexagon Nr. 106. Welchen Weg die irregulären Kräfte in den Raum Kunduz nehmen ist nicht abschließend aufgeklärt. Es gibt drei mögliche Wege, die mit unterschiedlichen Eintrittswahrscheinlichkeiten gewählt werden. Das militärische Nachrichtenwesen des Deutschen *International Security Assistance Force* (ISAF)-Kontingentes hat die *Provincial Reconstruction Team* (PRT)-Führung des PRT Kunduz über die Anschlagpläne informiert, weitere Informationen sind nicht bekannt. Der PRT-Kommandeur beauftragt die Aufklärungskräfte der Schutzkompanie, mit dem Drohnenzug LUNA Aufklärungsergebnisse zu erzielen, um die irregulären Kräfte an der Durchführung eines terroristischen Anschlages zu hindern [7].

## Ziel des Spiels

Ziel in dem Spiel ist es, dass der Spieler als Drohnenbediener in möglichst wenigen Schritten die irregulären Kräfte ausfindig macht, um diese an der Realisierung ihres Auftrages zu hindern. Ziel muss es sein, die irregulären Kräfte vor Überschreiten eines gewissen Bereiches (92 – 93 – 105 – 107 – 118 – 119) aufzuklären, um so die Annäherung an den geplanten Anschlagort zu verhindern. Die Hexagone in diesem Bereich sind auf den Spielbrettern, wie in Abbildung 2.1 und 2.2 dargestellt, farblich gekennzeichnet. Der Drohnenbediener hat während eines Spiel maximal 14 Spielzüge, um die irregulären Kräfte ausfindig zu machen. Gelingt ihm das nicht, hat der Drohnenbediener das Spiel verloren [7].

## Durchführung des Spiels

Zum Spiel gehören zwei Spielbretter, auf denen unterschiedlich farbige Hexagone verzeichnet sind, zwei Spielsteine sowie ein Würfel. Der Drohnenbediener erhält das für ihn gekennzeichnete Spielbrett, das andere verbleibt beim Spielleiter. Zuerst wählen die Spieler die Farbe ihres Spielsteins (rot oder schwarz). Anschließend wird durch den Spielleiter ausgewürfelt, auf welchem der drei Wege die irregulären Kräfte in den Raum Kunduz einfließen. Der Drohnenbediener kennt dabei jedoch nur die Startpunkte der drei möglichen Routen. Der Startpunkt A (Nikpa-ye Sofla - Hexagon Nr. 205) tritt mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit von  $\frac{3}{6}$  ein (Augenzahl auf dem Würfel 1, 2 oder 3), für den Startpunkt B (Do Vandi - Hexagon Nr. 22) beträgt sie  $\frac{2}{6}$  (Augenzahl 4 oder 5) und für Startpunkt C (Shureh Khak-e Bala - Hexagon Nr. 75)  $\frac{1}{6}$  (Augenzahl 6). Wird vom Spielleiter eine 1, 2 oder 3 gewürfelt, ist A der Startpunkt (Hexagon Nr. 205), würfelt er eine 4 oder 5, ist der Startpunkt bei B (Hexagon Nr. 22), fällt mit dem Würfel die Zahl 6, ist C (Hexagon Nr. 75) der Startpunkt. Mit der Festlegung des Startpunktes durch das Würfelergebnis des Spielleiters ist auch eine dazugehörige Route zum geplanten Anschlagziel vorgegeben. Die irregulären Kräfte bewegen sich zum Anschlagort mit einem Fahrzeug, daher wurden die Route und somit auch die Abfolge der zu passierenden Hexagone so gewählt, dass zumindest befestigte Wege genutzt werden müssen. Diese Route ist nur dem Spielleiter bekannt. Der Startpunkt der Aufklärungsdrohne entspricht dem

Standort der Bodenkontrollstation und ist auf dem Hexagon Nr. 128 festgelegt. Der Bereich PRT Kunduz und Airfield (102 – 103 – 115 – 116 – 117 – 129 – 130) darf mit der Aufklärungsdrohne nicht überflogen werden. Die betreffenden Hexagone sind farblich gekennzeichnet. Ebenso ist das Gebiet der Stadt Kunduz (42 – 57 – 58 – 59 – 60 – 69 – 70 – 71 – 72 – 84 – 85 – 86 – 87 – 99 – 100) für den Überflug gesperrt, da die Aufklärungsdrohne LUNA nur dünnbesiedelte Gebiete überfliegen darf. Diese Felder sind ebenso farblich gekennzeichnet. Von seinem Startpunkt plant der Spieler Drohnenbediener den Überflug der Aufklärungsdrohne und legt, ohne Kenntnis vom gewählten Startpunkt und Route der irregulären Kräfte, die Abfolge der zu passierenden Hexagone fest. Der Drohnenbediener beginnt und darf seinen Spielstein vorrücken. Anschließend erfolgt durch den Spielleiter der erste Spielzug für die irregulären Kräfte entsprechend der festgelegten Reihenfolge der zu passierenden Hexagone. Im weiteren Verlauf des Spiels ziehen der Drohnenbediener und der Spielleiter abwechselnd einen Schritt weiter. Die Fluggeschwindigkeit der Drohne wird für das Spiel als doppelt so hoch wie die Bewegungsgeschwindigkeit der irregulären Kräfte angenommen. Daher darf der Drohnenbediener je Spielzug um zwei Hexagone vorrücken, während der Spielleiter seinen Spielstein für die irregulären Kräfte nur um jeweils ein Hexagon je Spielzug vorrücken darf. Für den Spieler Drohnenbediener ist die Bewegung der irregulären Kräfte nicht einsehbar. Der Spieler Drohnenbediener kann einen oder mehrere Spielzüge aussetzen und hat so die Möglichkeit mit der Drohne auf einem Hexagon zu verweilen. Es ist ihm nicht gestattet, mit seinem Spielstein innerhalb der markierten Hexagone rund um den Anschlagort zu verweilen, innerhalb des markierten Bereiches muss mit dem Spielstein in jeder Spielrunde ein Spielzug gemacht werden. Ein Verweilen auf dem Hexagon des geplanten Anschlagortes ist ebenfalls nicht gestattet. Die irregulären Kräfte sollen außerhalb des markierten Bereiches aufgeklärt werden. Gelingt es dem Spieler Drohnenbediener nicht, die irregulären Kräfte vor Erreichen der markierten Hexagone aufzuklären, hat er das Spiel verloren [7].

### **2.2.2 Spielbretter**

Die beiden Spielbretter zeigen jeweils die Region Kunduz mit den Spielfeldern in Form von Hexagonen, die rot markierten Sperrgebiete, den Anschlagort sowie die Startpunkte der irregulären Kräfte und der Drohne. Das Spielbrett des Spielleiters enthält zudem die tatsächlichen möglichen Wege der irregulären Kräfte [7].

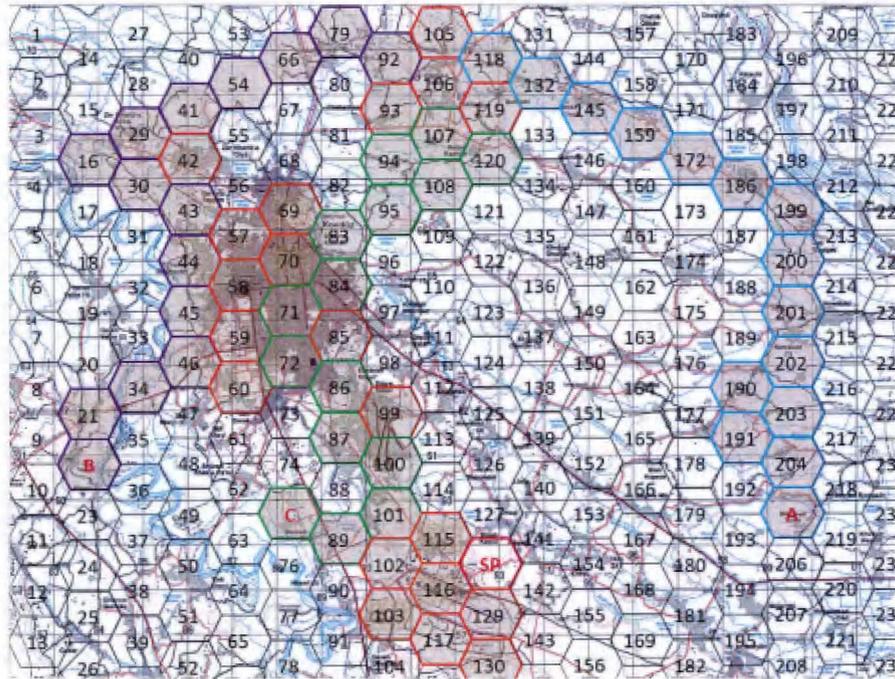


Abbildung 2.1: Spielbrett Spielleiter.

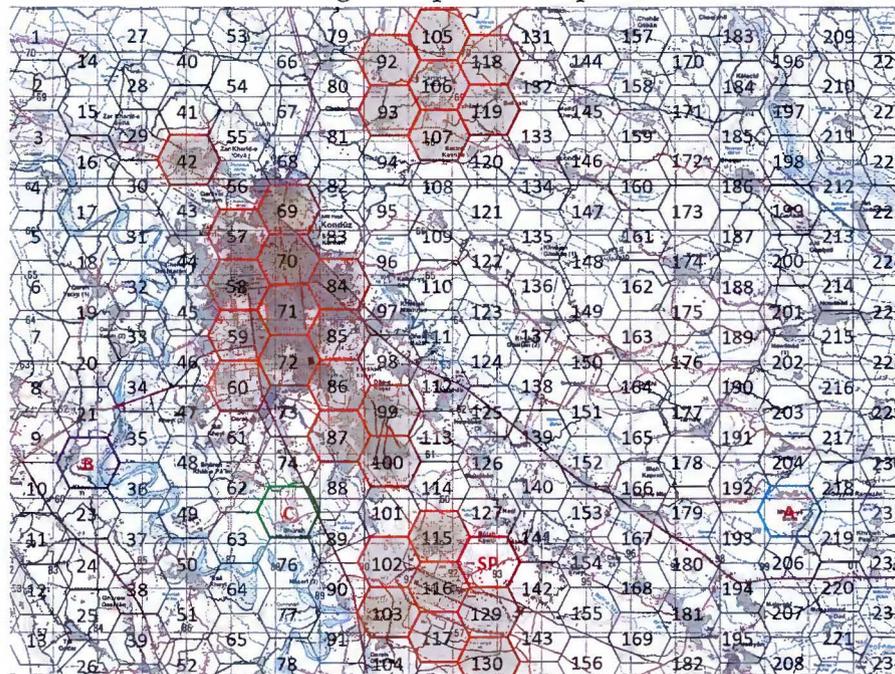


Abbildung 2.2: Spielbrett Spieler.

## 3 Mathematische Grundlagen

Das durch Operations Research (OR) entstehende Modell wird mit mathematischen Methoden und Lösungsverfahren gelöst. Das Teilgebiet der Mathematik, die mathematische Optimierung, wird im Folgenden näher beleuchtet und geht auf die Grundlagen der linearen und ganzzahligen Optimierung sowie das Moving-Target Problem ein. Des Weiteren werden die gängigsten Lösungsverfahren erläutert, die eine Lösung der mathematischen Modelle ermöglichen.

### 3.1 Operations Research

Die fortschreitende Entwicklung von Technik und Wirtschaft stellte die Unternehmen im 20. Jahrhundert vor komplexe und umfangreiche Probleme, die mit den traditionellen Verfahren zur Entscheidungsfindung nicht zu lösen waren. Es wurde eine Methode nötig, die verschiedenartige Probleme und Problemverknüpfungen mit quantitativen, mathematischen Methoden behandeln konnte, wie z.B. die Verknüpfung des Losgrößenproblems der Lagerhaltung mit den Fragen der Produktions- und Absatzgeschwindigkeit. Als Lösung dieser Probleme entwickelte sich seit dem 2. Weltkrieg das OR als mathematische Methode [2]. Im größeren Umfang wurde es während des 2. Weltkrieges im militärischen Bereich systematisch angewendet. Anwendung fand die Methode beispielhaft in der Berechnung der optimalen Größe von Geleitzügen und der optimalen Verteilung vorhandener Begleitschiffe zur U-Boot Abwehr. Dabei wurde erkannt, dass größere Geleitzüge weniger Begleitschutz benötigten und dadurch eine Erhöhung der Einsatzreserve möglich war. Ein weiteres Beispiel ist die optimale Arbeitsteilung beim Minenlegen, die beim Heer zu einer Zeitersparnis von 25% führte [2]. Heute sind die Methoden des OR sowohl in wirtschaftlichen wie auch in militärischen Bereichen unentbehrlich. Zur Lösungsfindung umfasst OR die folgenden drei Charakteristika:

- Entscheidungsvorbereitung,
- Anstreben einer optimalen Entscheidung,
- Verwendung mathematischer Methoden.

Unter allen möglichen Lösungen eines Problems wird eine optimale Lösung gesucht. Voraussetzung ist die Vergleichbarkeit der möglichen Lösungen in Hinblick auf ein übergeordnetes Ziel. So ist beispielsweise für das übergeordnete Ziel der Aufwandsminimierung die optimale Arbeitsteilung diejenige Lösung, welche die maximale Zeitersparnis liefert [2].

### 3.2 Lineare Optimierung

Ein lineares Optimierungsproblem zeichnet sich durch eine Zielfunktion aus, die eine lineare Funktion der Entscheidungsvariablen ist und deren Nebenbedingungen in Form von linearen Gleichungen und Ungleichungen für die Entscheidungsvariablen gegeben sind. In wirtschaftlichen und technischen Fragestellungen geht man häufig von linearen Zusammenhängen und Zielkriterien aus, da eine Vereinfachung des Modells die Rechenleistung für Tausende von Variablen und Nebenbedingungen auf einen vertretbaren Aufwand reduziert. Auf Grund dessen werden häufig „Nichtlinearitäten“ durch lineare Approximationen ersetzt. Ausgehend von einem entsprechenden realen Problem wird eine lineare Optimierungsaufgabe durch folgende Schritte formuliert:

- Spezifikation der (Entscheidungs-) Variablen,
- Formulierung der Nebenbedingungen als lineare Gleichungen oder Ungleichungen,
- Spezifikation der Zielfunktion, die minimiert bzw. maximiert wird.

Exemplarisch ein Minimierungsproblem in Gleichung (3.1):

$$\text{Minimiere } \sum_{j=1} c_j \cdot x_j. \quad (3.1)$$

unter folgender Nebenbedingung (3.2):

$$\sum_{j=1} a_{i,j} \cdot x_j \leq b_i \quad (i = 1, \dots, m). \quad (3.2)$$

Zudem wird eine Nichtnegativitätsbedingung der Variable  $x_j$  vorausgesetzt (3.3):

$$x_j \in \mathbb{R}^+. \quad (3.3)$$

- Einen Punkt  $x_j$ , der die oben genannte Nebenbedingung (3.2) erfüllt, wird als Lösung bezeichnet.
- Erfüllt dieser Punkt ebenso die Nichtnegativitätsbedingung, entspricht der Punkt einer zulässigen Lösung.
- Von einer optimalen Lösung spricht man, wenn eine zulässige Lösung  $x^*$  bei dem Minimierungsproblem den kleinsten Zielfunktionswert annimmt. Bei einer Maximierung der Lösung entsprechend dem größten Zielfunktionswert.
- $X$  stellt die Menge aller zulässigen Lösungen dar und  $X^*$  die Menge aller optimalen Lösungen [1].

### 3.3 Simplex-Verfahren

Das Simplex-Verfahren ist ein klassisches Lösungsverfahren für lineare Optimierungsprobleme. Dafür wird aus der Zielfunktion und den Nebenbedingungen ein Polyeder gebildet, an dessen Kanten der Simplex-Algorithmus entlang läuft, um an eine Ecke mit einer optimalen Lösung zu gelangen [1]. Mit Hilfe eines Simplex-Tableaus kann man einfache lineare Optimierungsprobleme händisch lösen. Zu Beginn werden die Ungleichungen durch Hinzufügen von Schlupfvariablen in ihre Normalform transformiert. Diese können dann in ein Simplex-Tableau (3.1) überführt werden, dabei gibt die letzte Zeile des Tableaus den aktuellen Zielfunktionswert an und wird Ergebniszeile oder F-Zeile genannt.

		Nichtbasisvariable			Basisvariable			F	$b_i$
		$x_1$	$\dots$	$x_{n-m}$	$x_{n-m+1}$	$\dots$	$x_n$		
Basisvariable $b_i$	$x_{n-m+1}$	$a_{11}$	$\dots$	$a_{1,n-m}$	1	$\dots$	0	0	$b_1$
	$\cdot$	$\cdot$	$\cdot$	$\cdot$	$\cdot$	$\cdot$	$\cdot$	$\cdot$	$\cdot$
	$\cdot$	$\cdot$	$\cdot$	$\cdot$	$\cdot$	$\cdot$	$\cdot$	$\cdot$	$\cdot$
	$x_n$	$a_{m1}$	$\dots$	$a_{m,n-m}$	0	$\dots$	1	0	$b_m$
		$-c_1$	$\dots$	$-c_{n-m}$	0	$\dots$	0	1	akt. Zfw.

Abbildung 3.1: Simplex Tableau.

Zur Berechnung der optimalen Lösung sind folgende Schritte notwendig:

### Schritt 1: Wahl der Pivotspalte $s$

Enthält die Ergebniszeile nur nichtnegative Werte, so ist die momentane Basislösung optimal. Das Verfahren kann dann abgebrochen werden. Sonst bestimme diejenige Spalte  $s$  mit dem kleinsten negativen Wert in der Ergebniszeile. Die zugehörige Nichtbasisvariable  $x_s$  wird in die Basis aufgenommen und wird Pivotspalte genannt.

### Schritt 2: Wahl der Pivotzeile $z$

Entsprechen alle  $a'_{is} \leq 0$ , so kann keine optimale Lösung für das betrachtete Problem gefunden werden. Das Verfahren kann dann abgebrochen werden. Sonst wähle eine Zeile  $z$ , für die gilt (3.4):

$$\frac{b'_z}{a'_{zs}} = \min \left\{ \frac{b'_i}{b'_{is}}, i = 1, \dots, m \quad \text{mit } a'_{is} > 0 \right\}. \quad (3.4)$$

### Schritt 3: Berechnung der neuen Basislösung

Zur Berechnung der neuen Basislösung wird die bisherige Basisvariable in der Pivotzeile  $z$  gegen die bisherige Nichtbasisvariable  $x_s$  getauscht. Berechne durch lineare Transformation des Nebenbedingungssystems unter der neuen Basisvariable  $x_s$  einen Einheitsvektor mit  $a'_{zs} = 1$  [1].

### 3.4 Ganzzahlige Lineare Optimierung

Ein Modell lässt sich nicht immer mit reellwertigen Entscheidungsvariablen darstellen. In der Realität können die Variablen oft nur ganzzahlige Werte annehmen, zum Beispiel  $x \in \mathbb{Z}^+$ . Beispielhaft hierfür ist der Einsatz von Arbeitskräften, die natürlich nur als ganze Personen eingesetzt werden können. Binärvariablen  $x \in \{0, 1\}$  finden ihre Anwendung bei ja-oder-nein Entscheidungen, wie der Programmplanung von Aufträgen, die entweder angenommen oder abgelehnt werden können:

$$x = \begin{cases} 1, & \text{der Auftrag wird angenommen,} \\ 0, & \text{sonst.} \end{cases} \quad (3.5)$$

### 3.5 Branch-and-Bound

Zur Lösung eines ganzzahligen linearen Problems kann man unter anderem die Branch-and-Bound Methode verwenden. Der Algorithmus bedient sich dem Prinzip der Aufteilung und Begrenzung des Lösungsraumes. Durch eine fortlaufende Aufteilung des ursprünglichen Problems entsteht eine Baumstruktur, der Branch-and-Bound-Baum [5]. Die vollständige Enumeration bietet eine Möglichkeit, das Problem zu lösen. Hierbei werden alle binären Vektoren  $x \in \{0, 1\}$  nacheinander erzeugt und nach Zugehörigkeit zu der gesuchten Menge  $M$  überprüft. Sind die Vektoren Teil der Menge, wird der Funktionswert berechnet und die bis dahin „beste“ Lösung gespeichert. Der letzte „beste“ Wert der Zielfunktion ergibt eine optimale Lösung für  $x^*$ . Eine vollständige Enumeration ist nur für kleine  $n$  geeignet, da bereits eine Anzahl  $n = 50$  für eine Berechnungsdauer von rund 31710 Jahren sorgt, bei einer Millisekunde pro Lösung [8]. Für ganzzahlige lineare Probleme mit großen  $n$  wird die implizierte Enumeration verwendet. Diese Methode findet sukzessive Teilmengen, die keine optimale Lösung beinhalten und lässt diese aus. Generiert wird ein Suchbaum, dessen Knoten einer gewissen Teilmengen der gesuchten Menge  $M$  entsprechen. Dabei erklärt sich der Begriff Branch-and-Bound. „Branch“ bezieht sich auf das „Verzweigen“ des Suchbaums. Jeder Zweig entspricht einer neuen Teilmenge von  $M$ . Der Be-

griff „Bound“ bezeichnet die obere und untere „Schranke“, die nicht-relevante Teilmenge auslassen [8]. Als Beispiel wird eine Branch-and-Bound Lösung in Abbildung 3.2 dargestellt.

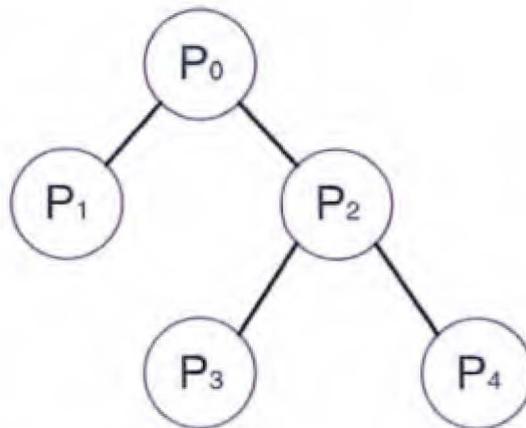


Abbildung 3.2: Branch-and-Bound Lösungsbaum.

### 3.6 Moving-Targets Problem

Das Problem, ein bewegliches Ziel zu finden, zeigt sich alltäglich in vielen Bereichen. Beispielhaft bei militärischen Operationen, Rettungsmissionen oder Grenzkontrollen, die nach verdächtigen oder vermissten Personen bzw. Gegenständen suchen. Die Räumung von brennenden und einsturzgefährdeten Gebäuden ist für die Kräfte der Feuerwehr ein hohes Risiko, welches durch einen optimalen Rettungsweg reduziert werden kann. Bei fast allen Problemen spielt die Zeit eine entscheidende Rolle, daher ist eine optimale Lösung zur schnellen Aufklärung unablässig [4]. Betrachtet wird das Problem, ein bewegliches Ziel aufzuklären, das sich in bestimmter Zeit  $\mathcal{T} := \{0, \dots, T\}$  und in einem bestimmten Bereich bewegt. Das abzusuchende Gebiet ist in mehrere Zellen  $\mathcal{J} := \{1, \dots, J\}$  unterteilt. Gesucht wird dieses nur von einem Sucher, der sich in jedem Zeitschritt von einer Zelle  $j$  in die benachbarte Zelle  $j'$  bewegen kann. Das Ziel selbst bewegt sich mit unterschiedlichen Wahrscheinlichkeiten im folgenden Zeitschritt  $t + 1$  von einer Zelle  $j$  in die benachbarte  $j'$ . Diese Wahrscheinlichkeiten werden in

einer Markov-Kette  $M$  mit  $M(j, j'), (j, j') \in \mathcal{J}$  dargestellt. Eine Markov-Kette ist ein spezieller stochastischer Prozess. Ziel der Anwendung ist es, Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten zukünftiger Ereignisse anzugeben [1]. Der Sensor des Suchers kann in jeder Zelle nur eine Aufnahme machen. Die Wahrscheinlichkeit, dass das Ziel in einer Zelle  $j$  zu einem Zeitschritt  $t$  entdeckt wird, falls es sich dort aufhält, ist  $g(j, t) \in [0, 1)$ . Für jedes  $t \in \mathcal{T}$  gibt  $q(., t)$  die Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Ziels in Zelle  $j \in \mathcal{J}$  zum Zeitschritt  $t \in \mathcal{T}$  an:

$$q(., t) = [q(1, t), q(2, t), \dots, q(J, t)]. \quad (3.6)$$

Das Problem wird so formuliert, die Route  $\mathcal{P}$  zu finden, der die Aufklärungswahrscheinlichkeit  $P(\mathcal{P})$  des Zieles maximiert. Dabei wird angenommen, dass die Aufklärungswahrscheinlichkeit und die Entdeckungswahrscheinlichkeit voneinander unabhängig sind:

$$P(\mathcal{P}) = \sum_{t=1} q(j_t, t) \cdot g(j_t, t). \quad (3.7)$$

Gezeigt wird dies an einem einfachen Beispiel: Der relevante Bereich wird in vier Zellen aufgeteilt von oben-links nach unten-rechts. Bekannt ist, dass sich das Ziel im Zeitschritt 1 mit einer Wahrscheinlichkeit von 60% in Zelle 2 befindet und mit 40% in Zelle 3:

$$q(., 1) = [0 \quad 0.6 \quad 0.4 \quad 0]. \quad (3.8)$$

Im nächsten Zeitschritt wird sich das Ziel mit einer Wahrscheinlichkeit von 80% vertikal und mit 20% horizontal bewegen. Ein Verbleiben in der jetzigen Zelle ist nicht möglich. Daraus ergibt sich folgende Markov-Matrix:

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 0.2 & 0.8 & 0 \\ 0.2 & 0 & 0 & 0.8 \\ 0.8 & 0 & 0 & 0.2 \\ 0 & 0.8 & 0.2 & 0 \end{bmatrix}. \quad (3.9)$$

Daraus ergeben sich die Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Ziels im zweiten Zeitschritt:

$$q(., 2) = q(., 1) \cdot M = [0.440 \quad 0 \quad 0 \quad 0.560]. \quad (3.10)$$

Der Sucher befindet sich im Zeitschritt  $t = 0$  in der ersten Zelle und kann sich nun vertikal und horizontal bewegen. Daraus ergeben sich folgende Pfade innerhalb von zwei Zeitschritten (3.11):

$$\{1, 1, 1\}, \{1, 1, 2\}, \{1, 1, 3\}, \{1, 2, 1\}, \{1, 2, 2\}, \{1, 2, 4\}, \{1, 3, 1\}, \{1, 3, 3\}, \{1, 3, 4\}. \quad (3.11)$$

Entdeckt der Sensor des Suchers das Ziel mit einer Wahrscheinlichkeit von 90% für alle  $j$  und  $t$ , ergeben sich drei Möglichkeiten (3.12):

$$\begin{aligned} \text{Zelle 1, } t = 1 & : q(., 2) = [0 \cdot (1 - 0.9) \quad 0.6 \quad 0.4 \quad 0] \cdot M = [0.440 \quad 0 \quad 0 \quad 0.560], \\ \text{Zelle 2, } t = 1 & : q(., 2) = [0 \quad 0.6 \cdot (1 - 0.9) \quad 0.4 \quad 0] \cdot M = [0.332 \quad 0 \quad 0 \quad 0.128], \\ \text{Zelle 3, } t = 1 & : q(., 2) = [0 \quad 0.6 \quad 0.4 \cdot (1 - 0.9) \quad 0] \cdot M = [0.152 \quad 0 \quad 0 \quad 0.488]. \end{aligned} \quad (3.12)$$

Daraus ergeben sich die folgenden Wahrscheinlichkeiten für die neun möglichen Wege aus (3.11):

$$\begin{aligned} \text{Weg } \{1,1,1\} & : 0 \cdot 0.9 + 0.44 \cdot 0.9 = 0.396, \\ \text{Weg } \{1,1,2\} & : 0 \cdot 0.9 + 0 \cdot 0.9 = 0, \\ \text{Weg } \{1,1,3\} & : 0 \cdot 0.9 + 0 \cdot 0.9 = 0, \\ \text{Weg } \{1,2,1\} & : 0.6 \cdot 0.9 + 0.332 \cdot 0.9 = 0.839, \\ \text{Weg } \{1,2,2\} & : 0.6 \cdot 0.9 + 0 \cdot 0.9 = 0.540, \\ \text{Weg } \{1,2,4\} & : 0.6 \cdot 0.9 + 0.128 \cdot 0.9 = 0.655, \\ \text{Weg } \{1,3,1\} & : 0.4 \cdot 0.9 + 0.152 \cdot 0.9 = 0.497, \\ \text{Weg } \{1,3,3\} & : 0.4 \cdot 0.9 + 0 \cdot 0.9 = 0.360, \\ \text{Weg } \{1,3,4\} & : 0.4 \cdot 0.9 + 0.448 \cdot 0.9 = 0.799. \end{aligned} \quad (3.13)$$



Unter den möglichen Lösungen bringt der Weg  $\{1,2,1\}$  die größte Aufklärungswahrscheinlichkeit mit 83,9% und ist damit die optimale Lösung [4].

## 4 Mathematisches Modell

In dem mathematischen Modell werden Deklarationen für die Lösung der Aufgabe festgelegt und bilden die Grundlagen zur Berechnung durch AIMMS. In den Deklarationen wird unterschieden zwischen Mengen, Parametern, Variablen, Nebenbedingungen und dem mathematischen Programm. Im Folgenden werden die Deklarationen näher dargestellt und erläutert.

### 4.1 Mengen

Folgende Mengen wurden für die Lösung des Problems definiert. Gegeben ist eine Menge von Zeitschritten  $\mathcal{T} := \{0, \dots, T\}$  sowie eine Menge von den nachfolgenden Zeitschritten  $\mathcal{K} := \{1, \dots, K\}$  mit  $K = T - 1$ . Eine Menge aller Hexagone  $\mathcal{H} := \{1, \dots, H\}$  mit der dazugehörigen Teilmenge des begrenzten Suchfeldes  $\mathcal{A} := \{1, \dots, A\}$  und die Menge der jeweiligen Nachbarn eines Hexagons  $\mathcal{N} := \{Nachbar1, \dots, N\}$ . Die Menge der Routen, die von den irregulären Kräfte gewählt werden können  $\mathcal{R} := \{1, \dots, R\}$  sowie die Menge der Schritte dieser Routen  $\mathcal{S} := \{1, \dots, S\}$ .

### 4.2 Parameter

Die folgenden Parameter werden definiert und beschreiben das geografische und zeitlich begrenzte Umfeld des Drohnenführers und der irregulären Kräfte sowie die relevanten Parameter für die Berechnungen von AIMMS.

#### 4.2.1 Geografische Parameter

Der Parameter *StartingPoint* kann beliebig gefüttert werden mit einem Hexagon aus dem Suchfeld  $\mathcal{A} := \{1, \dots, A\}$ . Vorgegeben ist in den Spielregeln der

Start auf Hexagon 128, jedoch wurde die Option für weitere Experimente offen gelassen. Die Nachbarn der einzelnen Hexagone sind in den Parameter  $NeighboursOfHexa_{h,n}$  hinterlegt und zeigen, welches Hexagon im nächsten Schritt angefliegen werden kann.

#### 4.2.2 Missionsrelevante Parameter

Im Parameter  $RouteS_{r,s}$  werden die möglichen Routen der irregulären Kräfte hinterlegt. Im Parameter  $Prob_r$  werden die Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Routen aufgrund ihres Startpunktes der irregulären Kräfte hinterlegt. Der Parameter  $\varepsilon$  gibt die Aufklärungswahrscheinlichkeit der Drohne an und kann je nach Wetterlage und Sicht variiert werden. Optimale Verhältnisse des Wetters würden einer 100-prozentigen Aufklärung bei Kontakt mit den irregulären Kräften entsprechen. Zur Erhöhung des Schwierigkeitsgrades kann eine Wetterlage eingespielt werden, die die Aufklärungswahrscheinlichkeit heruntersetzt und eine sofortige Aufklärung erschwert. Für die zeitliche Komponente sorgt der Parameter  $TimeN_t$ . Der Parameter zeigt dem Programm den folgenden Zeitschritt auf und ermöglicht so eine Darstellung der zeitlichen Abfolge der Schritte zu jedem Hexagon.

#### 4.2.3 Programmrelevante Parameter

Der Binärparameter  $Optimum$  übergibt dem Programm die Information, welche Aufklärungswahrscheinlichkeit berechnen werden soll. Ist der Parameter  $Optimum = 1$  wird die optimale Lösung ausgehend von ausgewählten Startpunkt und Wetterlage berechnet. Wählt man dagegen die Benutzerlösung, wird der Parameter  $Optimum = 0$  gesetzt und das Programm berechnet die Aufklärungswahrscheinlichkeit der manuell eingegeben Lösung des Spielers und ermöglicht eine Beurteilung der gewählten Route. Die Route des Spielers wird über die Benutzeroberfläche eingegeben und im Parameter  $Compare_t$  hinterlegt. Als Unterstützung des Benutzers ist auch hier nur eine Auswahl aus dem Suchfeld  $\mathcal{A} := \{1, \dots, A\}$  möglich.

### 4.3 Variablen

Das mathematische Modell beinhaltet drei Variablen, die binäre oder freie Werte nach der Berechnung der gewählten Lösung einnehmen. Die Variable  $x_{a,t} \in \{0, 1\}$  gibt an, welches Hexagon aus den Felder der Menge  $a$  zu welchem Zeitpunkt  $t$  angefliegen wird (4.1). Die Variable  $y_{r,s} \in \{0, 1\}$  gibt an, welche Route aus der Menge  $r$  zu welchem Schritt der Menge  $s$  angefliegen wird (4.2). Die Variable  $Reconnaissance \in \mathbb{R}^+$  nimmt nach der Berechnung einen Wert zwischen 0 und 1 an und gibt die Aufklärungswahrscheinlichkeit an. Die Variable  $Reconnaissance$  wird in diesem Modell maximiert und summiert das Produkt aus der Wahrscheinlichkeit aller möglichen Wege, der Aufklärungswahrscheinlichkeit aufgrund der Wetterlage sowie die möglichen Wege, die angefliegen wurden, über die Mengen  $r$  und  $s$ .

$$x_{a,t} = \begin{cases} 1, & \text{das Hexagon } a \text{ wird zum Zeitpunkt } t \text{ angefliegen,} \\ 0, & \text{sonst.} \end{cases} \quad (4.1)$$

$$y_{r,s} = \begin{cases} 1, & \text{Die Route } r \text{ wurde im Schritt } s \text{ angefliegen,} \\ 0, & \text{sonst.} \end{cases} \quad (4.2)$$

$$\sum_{r \in \mathcal{R}} \sum_{s \in \mathcal{S}} Prob_r \cdot (1 - (1 - \varepsilon)^s) \cdot y_{r,s}. \quad (4.3)$$

### 4.4 Nebenbedingungen

Die Nebenbedingungen grenzen den möglichen Lösungsraum für das Optimum ein und wurden wie folgt definiert:

$$\forall t \in \mathcal{T}: \quad \sum_{a \in A} x_{a,t} \leq 1. \quad (4.4)$$

$$\forall a \in \mathcal{A}, k \in \mathcal{K}: \quad x_{a,k} \leq x_{a,TimeN_k} + \sum_{Nachbar1 \in N} x_{NeighboursOfHexa_{a,n},TimeN_k}. \quad (4.5)$$

$$\forall r \in \mathcal{R}, s \in \mathcal{S}: \quad s \cdot y_{r,s} \leq \sum_{t \in T} x_{RouteS_{r,t,t}}. \quad (4.6)$$

$$\forall r \in \mathcal{R}: \quad \sum_{s \in \mathcal{S}} y_{r,s} = 1. \quad (4.7)$$

$$Optimum = 1: \quad x_{StartingPoint,0} = 1. \quad (4.8)$$

$$\forall t \in \mathcal{T}, Optimum = 0: \quad x_{Compare(t),t} = 1. \quad (4.9)$$

Die Nebenbedingung (4.4) stellt sicher, dass die Drohne mindestens ein Feld für jeden Zeitschritt anfliegt. Dass die Drohne in dem nächsten Zeitschritt auf dem Feld verbleibt oder einen Nachbarn seines jetzigen Feldes anfliegt, wird in der Nebenbedingung (4.5) festgelegt. Die Nebenbedingung (4.6) zwingt das Programm dazu, auf jeder möglichen Route mindestens eines der Hexagone zu einem bestimmten Zeitpunkt anzufliegen, um die irregulären Kräfte abfangen zu können. Für die garantierte Aufklärung ist es notwendig, dass alle möglichen Routen abgeflogen werden. Die Kontrolle aller elf Routen wird daher über die Nebenbedingung (4.7) festgelegt. Die Nebenbedingung (4.8) setzt, unter der Bedingung, dass die optimale Lösung ausgewählt werden würde, den gewählten Startpunkt aus dem Parameter *StartingPoint* als erstes Feld im Zeitpunkt  $t = 0$  fest. Wird dagegen die Benutzerlösung ausgewählt, übernimmt die letzte Nebenbedingung (4.9) die manuell eingegebene Route des Spielers in das Programm und setzt die Binärvariable  $x_{a,t}$  fest. Daraufhin wird die Aufklärungswahrscheinlichkeit des Spielers berechnet.

## 4.5 Mathematisches Programm

In dem mathematischen Programm wird in AIMMS die Art des Optimierungsproblems hinterlegt. In diesem Fall wird AIMMS die Information hinterlegt, dass er die Variable *Reconnaissance* maximieren und alle Variablen sowie Nebenbedingungen beachten soll.

## 4.6 Benutzeroberfläche

Die Benutzeroberfläche stellt eine Möglichkeit dar, fremden Nutzern eine simple und optisch ansprechende Darstellung der Lösung zu liefern. Ebenso können Parameter, wie der Startpunkt *StartingPoint*, die Aufklärungswahrscheinlichkeit nach Wetterlage  $\varepsilon$  sowie die gewählte Lösung über den Parameter *Optimum* festgelegt werden, ohne selbst in die Deklinationen einzugreifen. Dies ermöglicht eine Weitergabe des Programmes an Dritte mit geringen Kenntnissen von der Modellierungssprache AIMMS. In Abbildung 4.1 wird die Benutzeroberfläche in den Grundeinstellungen gezeigt. Die Lösung des Spielers kann nun manuell in die Tabelle eingegeben werden und über die Eingabe der Aufklärungswahrscheinlichkeit  $\varepsilon$  und durch Betätigung der Knöpfe „Benutzerlösung“ und „GO“ berechnet werden. Für die optimale Lösung wird zur Eingabe des Parameters  $\varepsilon$  der ausgewählte Startpunkt benötigt. Eine Berechnung erfolgt dann über die Betätigung der Knöpfe „Optimale Lösung“ und „GO“.

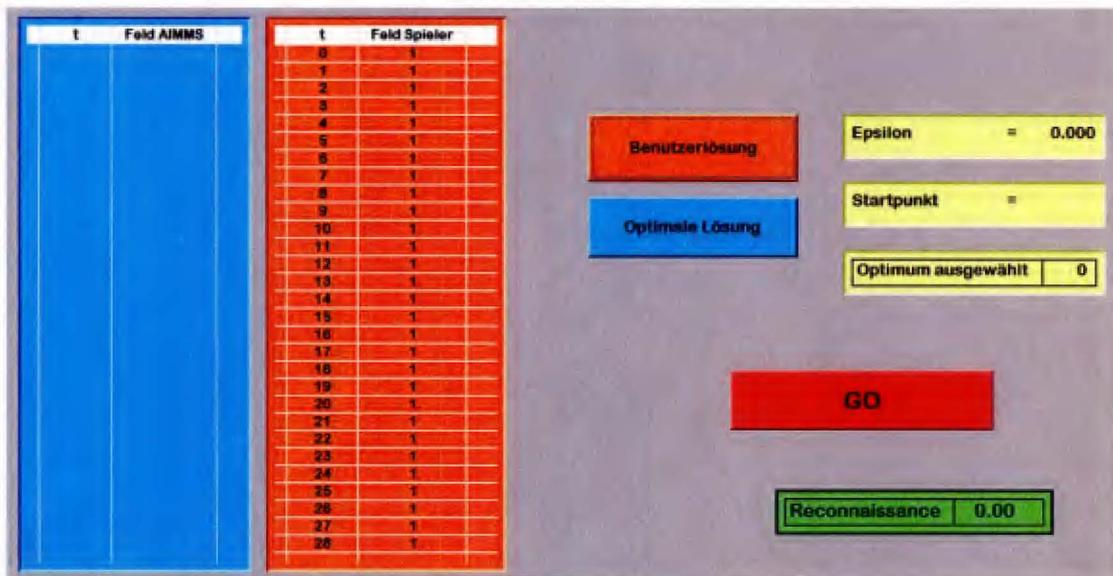


Abbildung 4.1: Benutzeroberfläche in den Grundeinstellungen.

## 5 Daten

In diesem Kapitel werden die Daten dargestellt, die sich aus dem Wargame ergeben und den Programmen zugrunde liegen.

### 5.1 Hexagone

Das Spielfeld des Wargames befindet sich im Gebiet Kunduz, Afghanistan mit einem Maßstab von 1:50.000. Das Gebiet wurde in 234 Hexagone unterteilt und beinhaltet aufgrund der Eigenschaften der Drohne die Sperrgebiete PRT Kunduz und Airfield (102 – 103 – 115 – 116 – 117 – 129 – 130) sowie die Stadt Kunduz (42 – 57 – 58 – 59 – 60 – 69 – 70 – 71 – 72 – 84 – 85 – 86 – 87 – 99 – 100). Abzüglich der Sperrgebiete, Startpunkte der irregulären Kräfte und einer gewünschten Aufklärung vor dem Bereich des Anschlagortes ergibt sich ein Suchareal von 212 Hexagonen, über welche die irregulären Kräfte ausfindig gemacht werden müssen. Jedes Hexagon besitzt zwei bis sechs benachbarte Hexagone, die im folgenden Zeitschritt angefliegen werden können, um sich im Suchareal zu bewegen.

### 5.2 Zeitschritte

Die irregulären Kräfte benötigen vom jeweiligen Startpunkt 15 Spielzüge, um den Anschlagort zu erreichen [7]. Ziel ist die Aufklärung spätestens einen Schritt vor Erreichen des Anschlagortes. Daher bleiben dem Drohnenführer 14 Spielzüge, um das Spiel zu gewinnen. Da die Drohne eine doppelt so hohe Geschwindigkeit erreicht wie das Fahrzeug der irregulären Kräfte, ist es der Drohne erlaubt, zwei Hexagone pro Zeitschritt anzufliegen. Daraus ergeben sich insgesamt 28 mögliche Hexagone, die zur Aufklärung angefliegen werden können. Zur Darstellung dieser 28 Hexagone entspricht ein Zeitschritt der irregulären

Kräfte zwei Zeitschritte der Drohne, sprich 28 Zeitschritte der Menge  $\mathcal{T}$ .

### 5.3 Routen

Die irregulären Kräfte bewegen sich mit dem Fahrzeug zum Anschlagort [7]. Eine Nutzung des Straßennetzes wird vorausgesetzt und begrenzt somit die möglichen Routen zum Ziel. Zudem sind die Routen auf direktem Weg nicht möglich, da es sicher angenommen wird, dass die irregulären Kräfte exakt 15 Spielzüge benötigen. Unter diesen Kriterien ergeben sich elf mögliche Routen von den drei Startpunkten, die im Programm hinterlegt sind.

## 6 Ergebnisse

Die Anwendbarkeit des Programmes wurde im Zuge eines Experiment, das von Frau Major Matuszewski erarbeitet wurde und Bestandteil ihrer Lehrgangsarbeit ist, getestet. Unter realen Bedingungen sollte verglichen werden, wie hoch die Aufklärungswahrscheinlichkeit der Teilnehmer ohne und mit Unterstützung des linearen Programms ausfällt. Die Teilnehmer des Experiments waren vier ausgebildete Fluggeräteinsatzfeldwebel der Ausbildungsklasse LUNA. Darunter eine Frau Stabsunteroffizier (StUffz) (Feldwebelanwärter (FA)), ein Oberfeldwebel (OFw) und zwei Hauptfeldwebel (HptFw). Der OFw war zusätzlich zum Luftbildauswertefeldwebel ausgebildet. Die beiden HptFw besitzen, zu der Ausbildung als Luftbildauswertefeldwebel, eine Ausbildung auf den Systemen LUNA und Kleinfluggerät-Zielortung (KZO) und verfügen über viel Erfahrung auf diesen. Einsatzerfahrung besitzt keiner der Teilnehmer. Nach der Vorstellung des Spiels wurden zwei Teams gebildet. Zum einen die Frau StUffz (FA) und der OFw (Team 1) und zum anderen die beiden erfahrenen HptFw (Team 2). Insgesamt wurden drei Durchgänge pro Team gespielt, davon der letzte mit erschwerten Wetterverhältnissen und einer damit einhergehenden Aufklärungswahrscheinlichkeit von 50%. Zur Realisierung der Wetterlage wurde nach jedem Spielzug des Teams neu gewürfelt. Bei den Augenzahlen 1 – 3 war eine Sicht möglich, bei den Augenzahlen 4 – 6 blieb der Drohne die Sicht verwehrt. Gestartet wurde immer vom *StartingPoint* = 128 [6]. Die ersten Runden wurden ohne Unterstützung des Programmes gespielt und zeigte, dass das erfahrenere Team 2 einen Vorteil besitzt. Vor Spielbeginn analysierten sie das Spielbrett auf mögliche Routen der irregulären Kräfte und zu welchen Zeitpunkten sie sich auf dem Spielfeld aufhalten könnten, zudem kommunizierten sie viel und planten die nächsten Schritte der Drohne. Das unerfahrene Team 1 hielt ihre Analyse des Spielbretts kürzer und ging intuitiver vor. Auch hier zeigten sich eine gute Kommunikation und Planung der Flugroute. In dem ersten Spieldurchlauf

konnte das erste Team von der Frau sarbeit StUffz (FA) und dem OFw die irregulären Kräfte nicht aufklären [6]. Nach Berechnung der Benutzerlösung hatte ihre Route trotzdem eine Aufklärungsrate von 75%, da sie die Wege um den Startpunkt mit 50-prozentiger Wahrscheinlichkeit gründlich abflogen. Das zweite, erfahrenere, Team schaffte eine Aufklärung der irregulären Kräfte bereits im ersten Durchlauf nach 22 von 28 möglichen Schritten. Beim zweiten Durchläufen nutzen beide Teams die OR-Unterstützung und konnten somit die irregulären Kräfte sicher ausfindig machen. Dabei verglichen beide Teams ihr Vorgehen mit der optimalen Route des Programmes und zogen Schlüsse für ihre Routenplanung. Eine optimale Lösung des Programmes wird in der Abbildung 6.1 vorgestellt. Der letzte Durchgang erfolgte mit den erschwerten Wetterbedingungen und einer Wahrscheinlichkeit, die irregulären Kräfte aufzuklären, von 50%. Team 1 nutzt erneut die OR-Unterstützung und konnte die irregulären Kräfte aufklären. Aufgrund der langen Berechnungsdauer durch die Wetterbedingung wurde das Programm nach 10 Minuten unterbrochen und die Route mit der vorerst besten Lösung von *Reconnaissance* = 88% verwendet. Team 2 arbeitete ohne OR-Unterstützung und planten ihre Routen nach den vorherigen Beobachtungen. Auch hier zeigte sich wieder eine ausgeprägte Kommunikation im Team und eine vorausschauende Planung der nächsten Schritte. Ein Erfolg blieb letztendlich nur aus, weil bei Kontakt mit den irregulären Kräften eine Sicht, aufgrund des Würfelergebnisses, nicht möglich war. Insgesamt zeigte ihre gewählte Route einen Wert von *Reconnaissance* = 53%, dargestellt in der Abbildung 6.2. Im abschließenden Gespräch mit den Teilnehmern ergab sich, dass das Spiel im Bereich der *Crew Resource Management* (CRM)-Ausbildung eine gute Ergänzung wäre, da es die Herangehensweise an eine Mission, die Abwägung von Faktoren und die Kommunikation im Team fördert. Zudem sei die Unterstützung mit dem Programm sinnvoll und gibt den Spielern eine nötige Rückmeldung über ihre Auswahl der Route [6].



Abbildung 6.1: Ergebnis Team 1, 2. Durchgang, OR-Unterstützung, gute Wetterverhältnisse  $\varepsilon = 1$ .

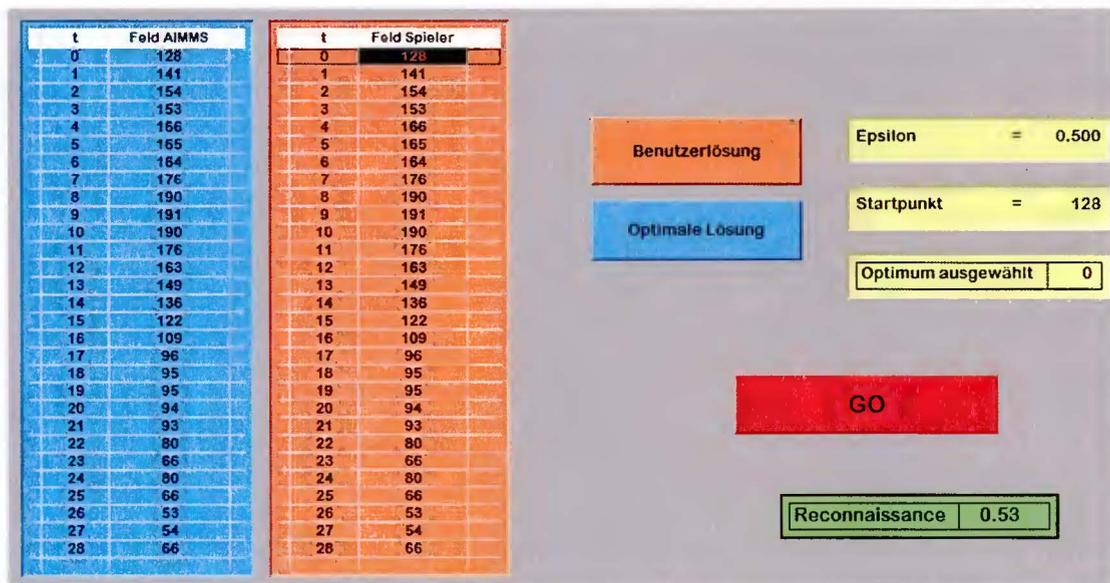


Abbildung 6.2: Ergebnis Team 2, 3. Durchgang, keine OR-Unterstützung, schlechte Wetterverhältnisse  $\varepsilon = 0.5$ .

## 7 Fazit und Ausblick

Aufgrund der Ergebnisse aus dem Experiment lässt sich zusammenfassend sagen, dass die OR-gestützte Ausbildung ein gutes Hilfsmittel darstellt, um Fluggeräteinsatzfeldwebel des Systems LUNA taktisch zu schulen. Es zeigte sich, dass die berechnete optimale Lösung die Teilnehmer unterstützt und dessen Verständnis fördert. Zudem ist die Berechnung der Benutzerlösung eine gut geeignete Möglichkeit, den Spielern eine Rückmeldung und Einschätzung der Qualität ihrer gewählten Route zu geben. Zudem lässt sich über die Berechnung der Benutzerlösung ein schneller Vergleich von mehreren Spieldurchgängen erstellen, ohne einzelne Routen direkt abzugleichen. Insgesamt schult die OR-Unterstützung Anfänger und Fortgeschrittene gleichermaßen, da sie eine erste Einschätzung der Fähigkeiten, die Entwicklungen des Spielers oder optimale Lösungen zur Schulung des Suchverhaltens bieten. Weniger hilfreich ist das Programm im gegenwärtigen Entwicklungsstadium bei der Planung von Flugrouten bei realen Bedingungen, da keine genauen Daten von Wetter, Geografie, Luftrecht und Fluggerät hinterlegt werden können. Eine Erhöhung um diese Parameter wäre eher kontraproduktiv und würde durch die Komplexität der Spielregeln das Spiel unattraktiv machen. Daher würde sich hier ein weiteres Spiel anbieten, das mit OR-Unterstützung die Teilnehmer ebenso schult. Des Weiteren besteht die Gefahr, dass die OR-Unterstützung zur schnellen Erzielung von Erfolgen missbraucht wird, ohne die Ergebnisse zu hinterfragen, um Schlüsse für das eigene Suchverhalten zu gewinnen. Eine Wettkampfsituation zwischen den Teams sollte deshalb vermieden werden. Abschließend lässt sich sagen, dass vor allem das spielerische Herangehen in der Ausbildung durch das Wargame ein großes Interesse und Motivation der Teilnehmer geweckt hat und die OR-Unterstützung hierfür die notwendige Beurteilung und Schulung der Teilnehmer ermöglicht und somit auch für die Ausbilder von Interesse ist. Das Spiel bietet sich somit durchaus als Hilfsmittel in der Ausbildung der Fluggerä-



teeinsatzfeldwebel des Systems LUNA an.

## Literatur

- [1] Domschke, Wolfgang und Drexl, Andreas. *Einführung in Operations Research*. 9. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005.
- [2] Ellinger, Theodor. *Operations Research: Eine Einführung*. 3. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1990.
- [3] Moshe Kress und Johannes O. Royset. *Aerial Search Optimization Model (ASOM) for UAVs in Special Operations*. Operations Research Department, Naval Postgraduate School, March 9, 2007.
- [4] Johannes O. Royset Lawrence D. Stone und Alan R. Washburn. *Optimal Search For Moving Targets*. Springer International Publishing AG Switzerland, 2016.
- [5] Prof. Dr. Marco Lübbecke. *Branch-and-Bound Verfahren*. URL: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Definition/branch-and-bound-verfahren.html> (besucht am 13.02.2011).
- [6] Major Sandra Matuszewski. *Protokoll zum Experiment „Wargame gestützte Ausbildung für Fluggeräteeinsatzfeldweibel“*. 2017.
- [7] Major Sandra Matuszewski. *Spielregeln „Enhanced LUNA Warrior“*. 2016.
- [8] Neumann, Klaus und Morlock, Martin. *Operations Research*. 2. Auflage. Carl Hanser Verlag München Wien, 2002.