

# **Technische Universität München**

**Lehrstuhl für Agrarsystemtechnik**

## **Entwicklung eines Planungssystems zur Optimierung von Agrarlogistik-Prozessen**

Sascha Kirsten Wörz

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Naturwissenschaften (Doctor rerum naturalium) genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr. Hans Rudolf Fries

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr. Heinz Bernhardt
2. Prof. Dr. Andreas Brieden (Universität der Bundeswehr München)

Die Dissertation wurde am 11.07.2016 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt am 11.04.2017 angenommen.

# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	II
Tabellenverzeichnis	III
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Beschreibung einer traditionellen Maiserntekette . . . . .	4
1.2 Ziel der Dissertation . . . . .	6
1.3 Ausblick auf die Dissertation . . . . .	6
<b>2 Stand des Wissens</b>	<b>8</b>
2.1 Jih et al. . . . .	9
2.2 Baugh et al. . . . .	9
2.3 Cordeau und Laporte . . . . .	14
2.4 Jih et al. . . . .	15
2.5 Pereira et al. . . . .	16
2.6 Mauri und Lorena . . . . .	17
2.7 Vergleichende Untersuchungen . . . . .	18
2.8 Optimierungsaufgaben . . . . .	20
2.9 Fundierung von Modellierungstechniken . . . . .	21
<b>3 Zielstellung</b>	<b>23</b>
3.1 Mathematische Beschreibung einer traditionellen Maiserntekette . . . . .	23
<b>4 Material und Methoden</b>	<b>33</b>
4.1 Präliminarien . . . . .	33
4.1.1 Lösbarkeit von reellen Optimierungsaufgaben . . . . .	33
4.1.2 Etwas Komplexitätstheorie: NP-harte Probleme . . . . .	34
4.1.3 Erzeugung von gleichverteilten Pseudozufallszahlen . . . . .	38
4.1.4 Dijkstra-Algorithmus . . . . .	39
4.1.5 Genetischer Algorithmus . . . . .	43
4.2 Optimierungsproblem aus 3 und Dijkstra-Algorithmus . . . . .	53
4.3 Transformation des Optimierungsproblems aus 3 in ein kombinatorisches Optimierungsproblem . . . . .	55
4.4 Das kombinatorische Optimierungsprobleme ist NP-hart . . . . .	56
4.5 Umordnungs-, Umverteilungs- und Austauschoperatoren für homogene Ab- fuhrgespanne . . . . .	58
4.6 Datenaufbereitungsfunktion . . . . .	63
4.7 Distributionsheuristik für homogene Transportfahrzeuge . . . . .	65
4.8 Distributionsheuristik für heterogene Transportfahrzeuge . . . . .	66
4.9 Startlösungs- und Hauptlösungsgenerierungsmethode für heterogene Transportfahrzeuge . . . . .	66
4.10 Programmierheuristik . . . . .	66
4.11 Zielfunktion . . . . .	67
4.12 Ungleichungsnebenbedingungen . . . . .	68
4.13 Genetischer Algorithmus . . . . .	68
4.13.1 Algorithmus 3 a (FEGA) . . . . .	68
4.13.2 Algorithmus 3 b (DEGA) . . . . .	69

4.13.3	Algorithmus 4 a (FEGA) . . . . .	69
4.13.4	Algorithmus 4 b (DEGA) . . . . .	70
4.14	Algorithmus 4 c (Differential Evolution) . . . . .	71
4.15	Algorithmus 4 d (Ultimativer Algorithmus) . . . . .	72
4.16	BB-MOPSO-Verfahren (Bar-Bones Multiobjective PSO-Verfahren) . . . . .	73
4.17	PSO-Update . . . . .	73
4.18	Zielfunktion . . . . .	73
4.19	Ungleichungsnebenbedingungen . . . . .	74
4.20	Anpassung des BB-MOPSO-Verfahrens . . . . .	77
4.20.1	Optimierung einer Erntekette bei variablen Serviceaufträgen . . . . .	77
4.20.2	Konvergenz des obigen BB-MOPSO-Verfahren . . . . .	78
4.21	Parameter: FEGA, DEGA, Differential Evolution, Ultimativer Algorithmus	81
<b>5</b>	<b>Ergebnisse: Traditionelle Maiserntekette</b>	<b>83</b>
<b>6</b>	<b>Diskussion/Schlussfolgerungen: Traditionelle Maiserntekette</b>	<b>86</b>
<b>7</b>	<b>Weiterführende Arbeiten</b>	<b>93</b>
7.1	Gesamtoptimierung . . . . .	93
7.1.1	Infield-Logistik . . . . .	94
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>96</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>97</b>
<b>10</b>	<b>Anhang</b>	<b>103</b>
10.1	DEGA:	
Berechnung 1:	(9.43 t, 10.31 t, 10.36 t, 12.03 t, 13.03 t),	
Berechnung 2:	(10.51 t, 11.49 t, 12.03 t, 12.36 t, 14.41 t),	
Berechnung 3:	(14.64 t, 15.88 t, 17.54 t, 17.82 t, 19.88 t) . . . . .	103
10.2	FEGA:	
Berechnung 1:	(9.43 t, 10.31 t, 10.36 t, 12.03 t, 13.03 t),	
Berechnung 2:	(10.51 t, 11.49 t, 12.03 t, 12.36 t, 14.41 t),	
Berechnung 3:	(14.64 t, 15.88 t, 17.54 t, 17.82 t, 19.88 t) . . . . .	135
10.3	Differential Evolution:	
Berechnung 1:	(9.43 t, 10.31 t, 10.36 t, 12.03 t, 13.03 t),	
Berechnung 2:	(10.51 t, 11.49 t, 12.03 t, 12.36 t, 14.41 t),	
Berechnung 3:	(14.64 t, 15.88 t, 17.54 t, 17.82 t, 19.88 t) . . . . .	166
10.4	Ultimativer Algorithmus:	
Berechnung 1:	(9.43 t, 10.31 t, 10.36 t, 12.03 t, 13.03 t),	
Berechnung 2:	(10.51 t, 11.49 t, 12.03 t, 12.36 t, 14.41 t),	
Berechnung 3:	(14.64 t, 15.88 t, 17.54 t, 17.82 t, 19.88 t) . . . . .	198

# Abbildungsverzeichnis

1	Biomasse-Erntelogistik . . . . .	1
2	Einflussfaktoren und Fragestellungen der Erntelogistik . . . . .	2
3	Häckselkette im Parallelverfahren . . . . .	3
4	Verfahrensvergleich der Parallelfahrssysteme Häckselwagen und LKW . . . . .	3
5	Unterschiedliche Abarbeitungstechniken für Schläge . . . . .	4
6	Unterschiedliche Wendemanöver . . . . .	5
7	Simulated Annealing . . . . .	10
8	Mutationen . . . . .	11
9	Austauschoperator . . . . .	12
10	Umverteilungsoperator . . . . .	12
11	Turingmaschine . . . . .	35
12	Erzeugung von gleichverteilten Pseudozufallszahlen . . . . .	39
13	Erzeugung von gleichverteilten Pseudozufallszahlen . . . . .	39
14	Dekomposition eines kürzesten Weges . . . . .	40
15	Beispiel zum Dijkstra-Algorithmus . . . . .	42
16	Kodierte Darstellung des Suchraums . . . . .	44
17	Unterschiedliche Aspekte eines Individuums . . . . .	44
18	Untersuchungsgegenstand des Schematheorems . . . . .	49
19	Umordnungsoperator . . . . .	59
20	Quicksort-Algorithmus . . . . .	59
21	Austauschoperator . . . . .	60
22	Umverteilungsoperator . . . . .	61
23	Umverteilungsoperator . . . . .	62
24	Geometrie des Schlages Hausacker . . . . .	84

# Tabellenverzeichnis

1	Ideen aus den vorgestellten Arbeiten, die für die vorliegende Arbeit relevant sind. . . . .	20
2	Daten der nicht optimierten Erntekette zum Schlag Hausacker in der Nähe von Ebersberg im Großraum München . . . . .	92
3	DEGA 1: Feldfahrzeiten vom Schlagrand zum Feldhäcksler und vice versa .	103
4	DEGA 1: Optimale Ankunftszeiten am Schlag und Silo . . . . .	104
5	DEGA 1: Optimale Ankunftszeiten am Schlag und Silo . . . . .	105
6	DEGA 1: Abfahrtszeiten am Schlag und Silo . . . . .	106
7	DEGA 1: Ankunftszeiten am Schlag und Silo . . . . .	107
8	DEGA 1: Kapazitäten am Schlag und Silo . . . . .	108
9	DEGA 1: Servicebeginnzeiten am Schlag und Silo . . . . .	109
10	DEGA 1: Servicezeiten am Schlag und Silo . . . . .	111
11	DEGA 1: Wartezeiten der Transportfahrzeuge am Schlag und Silo . . . . .	112
12	DEGA 1: Wartezeiten des Feldhäckslers . . . . .	113
13	DEGA 2: Feldfahrzeiten vom Schlagrand zum Feldhäcksler und vice versa .	114
14	DEGA 2: Optimale Ankunftszeiten am Schlag und Silo . . . . .	115
15	DEGA 2: Abfahrtszeiten am Schlag und Silo . . . . .	117
16	DEGA 2: Ankunftszeiten am Schlag und Silo . . . . .	118
17	DEGA 2: Kapazitäten am Schlag und Silo . . . . .	119
18	DEGA 2: Servicebeginnzeiten am Schlag und Silo . . . . .	120
19	DEGA 2: Servicezeiten am Schlag und Silo . . . . .	122
20	DEGA 2: Wartezeiten der Transportfahrzeuge am Schlag und Silo . . . . .	123
21	DEGA 2: Wartezeiten des Feldhäckslers . . . . .	124
22	DEGA 3: Feldfahrzeiten vom Schlagrand zum Feldhäcksler und vice versa .	125
23	DEGA 3: Optimale Ankunftszeiten am Schlag und Silo . . . . .	126
24	DEGA 3: Abfahrtszeiten am Schlag und Silo . . . . .	128
25	DEGA 3: Ankunftszeiten am Schlag und Silo . . . . .	129
26	DEGA 3: Kapazitäten am Schlag und Silo . . . . .	130
27	DEGA 3: Servicebeginnzeiten am Schlag und Silo . . . . .	131
28	DEGA 3: Servicezeiten am Schlag und Silo . . . . .	132
29	DEGA 3: Wartezeiten der Transportfahrzeuge am Schlag und Silo . . . . .	133
30	DEGA 3: Wartezeiten des Feldhäckslers . . . . .	134
31	FEGA 1: Feldfahrzeiten vom Schlagrand zum Feldhäcksler und vice versa .	135
32	FEGA 1: Optimale Ankunftszeiten am Schlag und Silo . . . . .	136
33	FEGA 1: Abfahrtszeiten am Schlag und Silo . . . . .	138
34	FEGA 1: Ankunftszeiten am Schlag und Silo . . . . .	139
35	FEGA 1: Kapazitäten am Schlag und Silo . . . . .	140
36	FEGA 1: Servicebeginnzeiten am Schlag und Silo . . . . .	141
37	FEGA 1: Servicezeiten am Schlag und Silo . . . . .	142
38	FEGA 1: Wartezeiten der Transportfahrzeuge am Schlag und Silo . . . . .	143
39	FEGA 1: Wartezeiten des Feldhäckslers . . . . .	144
40	FEGA 2: Feldfahrzeiten vom Schlagrand zum Feldhäcksler und vice versa .	145
41	FEGA 2: Optimale Ankunftszeiten am Schlag und Silo . . . . .	146
42	FEGA 2: Abfahrtszeiten am Schlag und Silo . . . . .	148
43	FEGA 2: Ankunftszeiten am Schlag und Silo . . . . .	149
44	FEGA 2: Kapazitäten am Schlag und Silo . . . . .	150

45	FEGA 2: Servicebeginnzeiten am Schlag und Silo . . . . .	151
46	FEGA 2: Servicezeiten am Schlag und Silo . . . . .	153
47	FEGA 2: Wartezeiten der Transportfahrzeuge am Schlag und Silo . . . . .	154
48	FEGA 2: Wartezeiten des Feldhäckslers . . . . .	155
49	FEGA 3: Feldfahrzeiten vom Schlagrand zum Feldhäckslers und vice versa .	156
50	FEGA 3: Optimale Ankunftszeiten am Schlag und Silo . . . . .	157
51	FEGA 3: Abfahrtszeiten am Schlag und Silo . . . . .	159
52	FEGA 3: Ankunftszeiten am Schlag und Silo . . . . .	160
53	FEGA 3: Kapazitäten am Schlag und Silo . . . . .	161
54	FEGA 3: Servicebeginnzeiten am Schlag und Silo . . . . .	162
55	FEGA 3: Servicezeiten am Schlag und Silo . . . . .	163
56	FEGA 3: Wartezeiten der Transportfahrzeuge am Schlag und Silo . . . . .	164
57	FEGA 3: Wartezeiten des Feldhäckslers . . . . .	165
58	Differential Evolution 1: Feldfahrzeiten vom Schlagrand zum Feldhäckslers und vice versa . . . . .	166
59	Differential Evolution 1: Optimale Ankunftszeiten am Schlag und Silo . . .	167
60	Differential Evolution 1: Abfahrtszeiten am Schlag und Silo . . . . .	169
61	Differential Evolution 1: Ankunftszeiten am Schlag und Silo . . . . .	170
62	Differential Evolution 1: Kapazitäten am Schlag und Silo . . . . .	171
63	Differential Evolution 1: Servicebeginnzeiten am Schlag und Silo . . . . .	172
64	Differential Evolution 1: Servicezeiten am Schlag und Silo . . . . .	174
65	Differential Evolution 1: Wartezeiten der Transportfahrzeuge am Schlag und Silo . . . . .	175
66	Differential Evolution 1: Wartezeiten des Feldhäckslers . . . . .	176
67	Differential Evolution 2: Feldfahrzeiten vom Schlagrand zum Feldhäckslers und vice versa . . . . .	177
68	Differential Evolution 2: Optimale Ankunftszeiten am Schlag und Silo . . .	178
69	Differential Evolution 2: Abfahrtszeiten am Schlag und Silo . . . . .	180
70	Differential Evolution 2: Ankunftszeiten am Schlag und Silo . . . . .	181
71	Differential Evolution 2: Kapazitäten am Schlag und Silo . . . . .	182
72	Differential Evolution 2: Servicebeginnzeiten am Schlag und Silo . . . . .	183
73	Differential Evolution 2: Servicezeiten am Schlag und Silo . . . . .	185
74	Differential Evolution 2: Wartezeiten der Transportfahrzeuge am Schlag und Silo . . . . .	186
75	Differential Evolution 2: Wartezeiten des Feldhäckslers . . . . .	187
76	Differential Evolution 3: Feldfahrzeiten vom Schlagrand zum Feldhäckslers und vice versa . . . . .	188
77	Differential Evolution 3: Optimale Ankunftszeiten am Schlag und Silo . . .	189
78	Differential Evolution 3: Abfahrtszeiten am Schlag und Silo . . . . .	191
79	Differential Evolution 3: Ankunftszeiten am Schlag und Silo . . . . .	192
80	Differential Evolution 3: Kapazitäten am Schlag und Silo . . . . .	193
81	Differential Evolution 3: Servicebeginnzeiten am Schlag und Silo . . . . .	194
82	Differential Evolution 3: Servicezeiten am Schlag und Silo . . . . .	195
83	Differential Evolution 3: Wartezeiten der Transportfahrzeuge am Schlag und Silo . . . . .	196
84	Differential Evolution 3: Wartezeiten des Feldhäckslers . . . . .	197
85	Ultimativer Algorithmus 1: Feldfahrzeiten vom Schlagrand zum Feldhäckslers und vice versa . . . . .	198

86	Ultimativer Algorithmus 1: Optimale Ankunftszeiten am Schlag und Silo . . . . .	199
87	Ultimativer Algorithmus 1: Abfahrtszeiten am Schlag und Silo . . . . .	201
88	Ultimativer Algorithmus 1: Ankunftszeiten am Schlag und Silo . . . . .	202
89	Ultimativer Algorithmus 1: Kapazitäten am Schlag und Silo . . . . .	203
90	Ultimativer Algorithmus 1: Servicebeginnzeiten am Schlag und Silo . . . . .	204
91	Ultimativer Algorithmus 1: Servicezeiten am Schlag und Silo . . . . .	206
92	Ultimativer Algorithmus 1: Wartezeiten der Transportfahrzeuge am Schlag und Silo . . . . .	207
93	Ultimativer Algorithmus 1: Wartezeiten des Feldhäckslers . . . . .	208
94	Ultimativer Algorithmus 2: Feldfahrzeiten vom Schlagrand zum Feldhäckslers und vice versa . . . . .	209
95	Ultimativer Algorithmus 2: Optimale Ankunftszeiten am Schlag und Silo . . . . .	210
96	Ultimativer Algorithmus 2: Abfahrtszeiten am Schlag und Silo . . . . .	212
97	Ultimativer Algorithmus 2: Ankunftszeiten am Schlag und Silo . . . . .	213
98	Ultimativer Algorithmus 2: Kapazitäten am Schlag und Silo . . . . .	214
99	Ultimativer Algorithmus 2: Servicebeginnzeiten am Schlag und Silo . . . . .	215
100	Ultimativer Algorithmus 2: Servicezeiten am Schlag und Silo . . . . .	217
101	Ultimativer Algorithmus 2: Wartezeiten der Transportfahrzeuge am Schlag und Silo . . . . .	218
102	Ultimativer Algorithmus 2: Wartezeiten des Feldhäckslers . . . . .	219
103	Ultimativer Algorithmus 3: Feldfahrzeiten vom Schlagrand zum Feldhäckslers und vice versa . . . . .	220
104	Ultimativer Algorithmus 3: Optimale Ankunftszeiten am Schlag und Silo . . . . .	221
105	Ultimativer Algorithmus 3: Abfahrtszeiten am Schlag und Silo . . . . .	223
106	Ultimativer Algorithmus 3: Ankunftszeiten am Schlag und Silo . . . . .	224
107	Ultimativer Algorithmus 3: Kapazitäten am Schlag und Silo . . . . .	225
108	Ultimativer Algorithmus 3: Servicebeginnzeiten am Schlag und Silo . . . . .	226
109	Ultimativer Algorithmus 3: Servicezeiten am Schlag und Silo . . . . .	227
110	Ultimativer Algorithmus 3: Wartezeiten der Transportfahrzeuge am Schlag und Silo . . . . .	228
111	Ultimativer Algorithmus 3: Wartezeiten des Feldhäckslers . . . . .	229

# 1 Einleitung

Die Logistik-Optimierung in der Landwirtschaft gewinnt aufgrund einer steigenden Anzahl von Mensch-Maschine-Kosten-Systemen in diesem Bereich immer mehr an Bedeutung. Dabei nimmt die Agrarlogistik eine Sonderrolle in der Logistik ein, da sie sowohl Elemente der allgemeinen Fahrzeuglogistik als auch Aspekte der Prozesslogistik von Produktionssystemen vereinen muss. Ein entscheidender Aspekt aus der Prozesslogistik ist für die Agrarlogistik die Maschinen-Maschinen-Interaktion. Der Produktionsprozess ist ohne gezielte räumliche und zeitliche Zusammenarbeit der einzelnen Maschinen nicht möglich. Bei der Analyse der allgemeinen Fahrzeuglogistik gehen die Anforderungen der Agrarlogistik noch darüber hinaus. Agrarfahrzeuge stellen besondere Anforderungen an die Verkehrswege im Hinblick auf Breite, Höhe, Tragfähigkeit, Kurvenradius sowie Möglichkeiten der Fahrzeugbegegnung. Außerdem ist die Wirkung von Agrarlogistik auf die Bevölkerung und eine damit einhergehende Belastungsempfindung eine andere, da sich die Fahrzeuge durch ihre besondere Form deutlich in die Wahrnehmung einprägen. Ein weiterer entscheidender Unterschied der Agrarlogistik ist das Wegenetz. Zum Teil muss das Wegenetz vom Anwender selbst digitalisiert werden, da es sich um Feldwege handelt. Des Weiteren sind die Fahrzeuge und die Logistikplanung nicht alleine auf das Wegenetz begrenzt, sondern sie können sich im Einsatz auf der kompletten Fläche bewegen. Vor diesem Hintergrund wird deutlich, dass für die Agrarlogistik eigenständige Logistikwerkzeuge entwickelt werden müssen. Aktuell werden in üblichen Biomasse-Ernteverfahren etwa 50 Prozent der Arbeitszeit mit Transportieren verbracht. Bei heutigen Häckslerleistungen und üblichen Feld-Silo-Entfernungen fährt ein Schlepper häufig nur 15 Prozent auf dem Acker, die restlichen 85 Prozent auf der Straße. Für eine genaue Betrachtung und dem Vergleich verschiedener Verfahren ist eine Unterteilung der Ernteketten auf verschiedene Kettenglieder hilfreich. Abbildung 1 veranschaulicht diese Unterteilung am Begriff der Mais-Erntelogistik. Die Betrachtung beginnt beim stehenden Bestand. Ausgeklammert sind daher der Aufwand und die Kosten zur Produktion der Biomasse. Ebenfalls unberücksichtigt bleibt die eigentliche Lagerhaltung. Die Mais-Erntelogistik konzentriert sich demnach auf die drei Glieder der Logistik-Kette (Ernte, Transport sowie Einlagerung der Biomasse). Werden aktuell übliche Ernteverfahren betrachtet, hängen diese drei Kettenglieder unmittelbar zusammen: Die vom Feldhäcksler zerkleinerte Maismenge muss direkt vom Transportfahrzeug abtransportiert werden und im Silo möglichst direkt eingelagert werden. Es gibt keine (Häcksler-Transportfahrzeug) oder nur geringe (Transport-Einlagerung) Pufferkapazitäten zwischen den einzelnen Kettengliedern. Ist die Leistung der einzelnen Bereiche nicht aufeinander abgestimmt, führt dies zu Verlusten bezüglich der Ernteleistung oder der Silagequalität.



Abbildung 1: Biomasse-Erntelogistik (Quelle: Verfahren zum Transport von Biomasse, Nr. II - 6/2010, Seite 2, Abbildung 1).

Natürlich sind nicht alle Parameter einer Erntelogistik durch eine ausführliche Planung und Organisation beeinflussbar. Unveränderbare und damit hinzunehmende Einflussfaktoren wie die Witterung sind ebenso gewichtig wie Anforderungen an Verträge, Gesetze, die Ökologie oder die Gutseigenschaften der geernteten Biomasse (Abb. 2). Nicht hinzunehmen sind hingegen die Wahl sowie die Organisation und Abstimmung der Erntetechnik. Beides spielt für eine möglichst wirtschaftliche Ernte eine erhebliche Rolle. Da die betrieblichen Voraussetzungen häufig nicht übertragbar sind, muss diese meist überbetrieblich eingesetzte Ernte-, Transport- und Einlagerungstechnik individuell angepasst oder zusammengestellt werden können. Neben der Größe der Erntetechnik ist die Abstimmung mit für den Erfolg entscheidend, um Wartezeiten auf dem Feld, auf der Straße oder im Lager zu vermeiden und eine hohe Qualität des Erntegutes zu sichern.

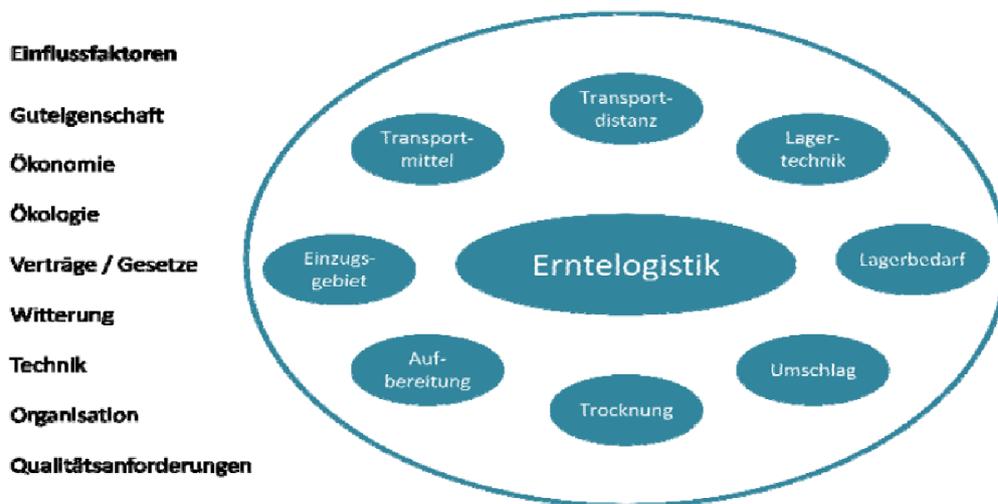


Abbildung 2: Einflussfaktoren und Fragestellungen der Erntelogistik (Quelle: Verfahren zum Transport von Biomasse, Nr. II - 6/2010, Seite 2, Abbildung 1).

Großbetriebe und Dienstleister stehen im straffen Ernteprozess vor der dringenden Anforderung, den Einsatz der Maschinen der Erntekette zu optimieren und Stillstandszeiten nach Möglichkeit gänzlich zu vermeiden. Dabei soll die Erntelogistikkette in dieser Arbeit aus einem Feldhäcksler, einem Silo, einer festen Anzahl homogener oder heterogener Transport- und optional Überladeeinheiten sowie einem Schlag mit Polygonform bestehen, der vom Häcksler im Parallelverfahren (Abb. 3) parallel abgearbeitet wird, dem heute üblichen Ernteverfahren, in dem traditionell mit Traktoren sowie Häckselwagen in 2- oder 3-achsiger Ausführung und/oder alternativ auch mit speziell umgebauten Lkws (Abb. 4) gefahren wird. Um sowohl den Bedürfnissen des minimierten Bodendruckes im Feld sowie den angepassten Transportfahrzeugen auf der Straße Rechnung zu tragen, kann es sinnvoll sein, die Arbeitsgänge zu trennen. Im Feld fahren dann entweder von Schleppern gezogene Überlader oder Selbstfahrer-Überladefahrzeuge neben dem Häcksler her. Das volle Fahrzeug befüllt am Feldrand einen Schlepper-gezogenen Großraumwagen bzw. einen LKW, der den Transport über entsprechend weite Entfernungen durchführt. Hier ist jedoch als begrenzender Faktor die Limitierung des Gespanngewichtes Schlepper + Anhänger von derzeit 40 t zu berücksichtigen. Daneben finden in der Praxis noch weitere Systeme ihre Anwendung. Zu nennen sind diesbezüglich weitere Parallelfahrssysteme sowie verschiedene Bunkersysteme:

- Parallelfahrssystem – Sonderfahrzeug bzw. Agrar-LKW mit Breitreifen.
- Parallelfahrssystem – Traktoren mit Dolly-Auflieger (1- oder 2-achsiger).
- Bunker-Systeme mit direkter oder abgesetzter Überladung.
- Bunker-Systeme mit Hakenlift oder LKW-Auflieger.

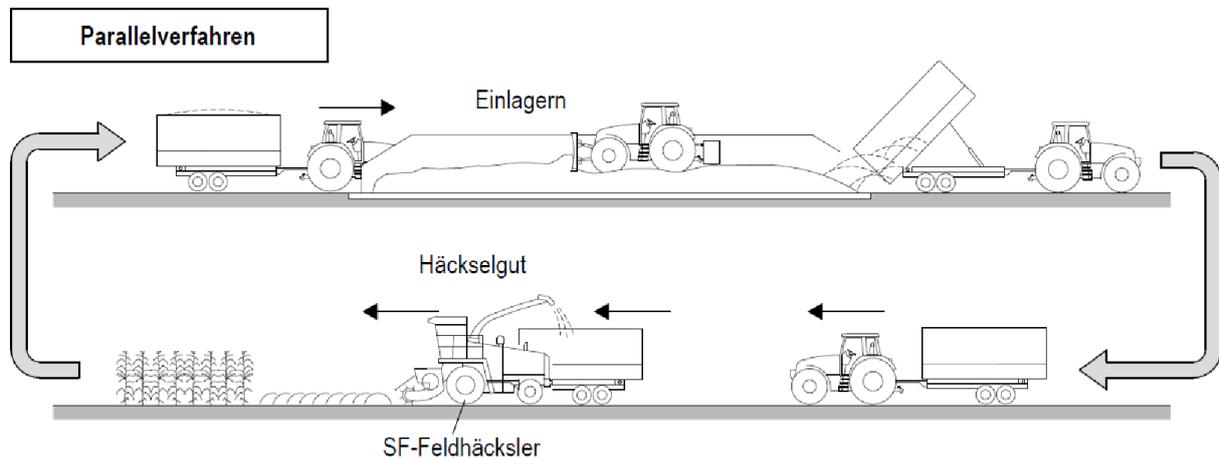


Abbildung 3: Häckselkette im Parallelverfahren (Quelle: Landtechnik und Bauwesen, Band 3 (Die Landwirtschaft), Seite 386, Abb. 405).

Tabelle 1: Verfahrensvergleich der Parallelfahrssysteme Häckselwagen und LKW

System	Beschreibung	Bewertung 	Bewertung 
Parallelfahrssystem Häckselwagen	Häckselwagen gezogen mit Traktor neben Feldhäcksler,  2- oder 3-achsiger mit bis zu 45m <sup>3</sup> Ladevolumen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• vorherrschende Methode</li> <li>• arbeitswirtschaftlich und ökonomisch sinnvollste Lösung bei kurzen Transportentfernungen</li> <li>• relativ kostengünstig</li> <li>• hohe Flexibilität auch für unterschiedliche Güter</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Öffentliche Akzeptanz? <ul style="list-style-type: none"> <li>○ verschmutzte Straßen</li> <li>○ Lärmbelästigung</li> </ul> </li> <li>• wirtschaftlich problematisch ab 5-15km Entfernung, je nach Bedingung</li> <li>• höherer Reifenverschleiß als bei LKW</li> </ul>
Parallelfahrssystem LKW mit Breitreifen	LKW mit Breitreifen wird direkt beladen, mit Luftdruckregelanlage	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Agrarbereifung mit Reifendruckregelanlage für viele Böden ausreichend</li> <li>• Verwendung von Serien-LKW mit Häckselwagenaufbau</li> <li>• Bei Wechsellaufbauten bessere Auslastung möglich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Keine Lösung gegen Straßenverschmutzung</li> <li>• Ggf. Lenkzeitbeschränkung und Sonntagsfahrverbot</li> <li>• Anschaffungskosten</li> <li>• Reifenverschleiß</li> </ul>

Abbildung 4: Verfahrensvergleich der Parallelfahrssysteme Häckselwagen und LKW (Quelle: Verfahren zum Transport von Biomasse, Nr. II - 6/2010, Seite 5, Tabelle 1).

Die parallele Abarbeitung von Schlägen findet neben einigen anderen Abarbeitungsformen (Abb. 5) am häufigsten Anwendung. Dabei entspricht der Abstand zwischen zwei Spuren der Arbeitsbreite. Ferner wird der Abarbeitungsprozess über die Prioritäten der Spuren realisiert. Je niedriger ein Zahlenwert ist, desto höher ist die Einfahrpriorität.

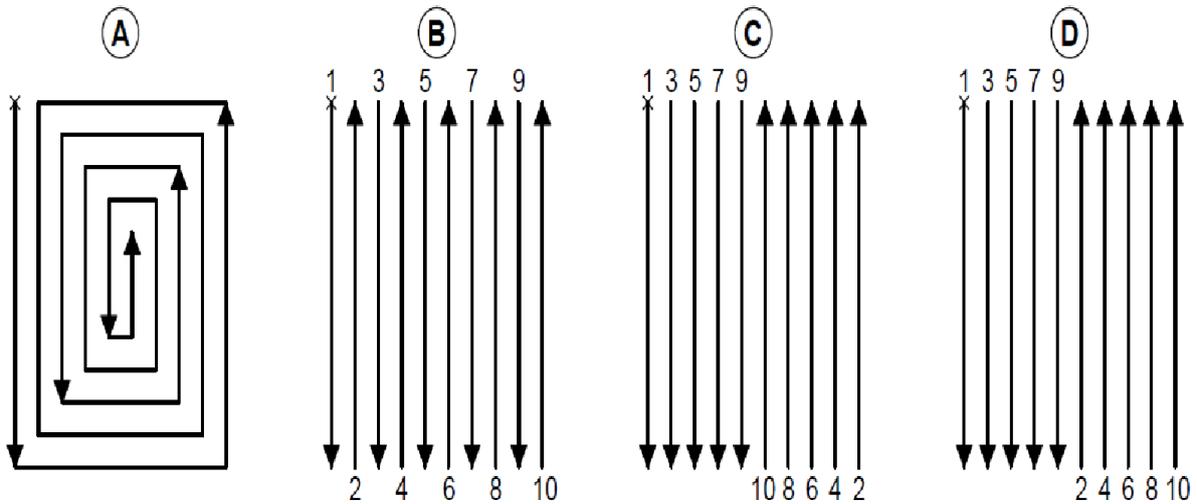


Abbildung 5: Unterschiedliche Abarbeitungstechniken für Schläge: A: Rundumtechnik, B: Kehrtechnik, C: Geschlossene Technik, D: Fortschreitende Technik (Quelle: Simulation verfahrenstechnischer Prozesse im Feldbau, 2008).

Darüber hinaus bestimmen Häckserleistung und Transportentfernung die notwendige Zahl der Transporteinheiten, um eine kontinuierliche Ernte ohne Wartezeiten für den Häckser sicher zu stellen. Dabei erteilt der Häckserfahrer zuerst Serviceaufträge an die zur Verfügung stehenden Transporteinheiten. Ein Serviceauftrag besteht dabei aus der Beladung einer Transporteinheit am Schlag und deren Entladung am Silo. Ferner soll die Be- und Entladung in gewissen optimalen Zeitfenstern stattfinden, die sich relativ leicht aus der gesamten Ernteprozesskette berechnen lassen. Ziel ist nun zunächst die Berechnung eines optimalen Zeitplans für die Transporteinheiten der gesamten Ernteloggistikette, der die Gesamttransportkosten minimiert und die optimalen Zeitfenster am wenigsten verletzt, wodurch die Stillstandszeiten minimiert werden. Dabei ist es meistens sehr schwierig, beide Zielgrößen simultan zu minimieren, weshalb ein ausgeklügelter Optimierungsansatz erforderlich ist.

## 1.1 Beschreibung einer traditionellen Maiserntekette

Damit ein passender Optimierungsansatz gefunden werden kann, muss die Erntekette beschrieben und analysiert werden. Sei dazu ein beschränkter und polygonaler Schlag (z. B. rechteckiger Schlag) ohne Hindernisse und ein Feldhäckser gegeben, der das Feld parallel abarbeitet. Dabei gilt für den zurückgelegten Weg eines Wendemanövers

$$\begin{aligned}\Omega_{\min}(|i-j|) &= r_{\min}(3\pi - \arcsin(\frac{2r_{\min} + |i-j|w}{4r_{\min}})) \quad (\Omega - \text{Wendung}), \\ T_{\min}(|i-j|) &= r_{\min}(2 + \pi) - |i-j|w \quad (T - \text{Wendung}), \\ \Pi_{\min}(|i-j|) &= |i-j|w + (\pi - 2)r_{\min} \quad (\Pi - \text{Wendung}),\end{aligned}$$

wobei  $i$  und  $j$  die  $i$ -te- und  $j$ -te Parallelfahrspur,  $w$  die Arbeitsbreite und  $r_{\min}$  den Wendekreis des Feldhäckslers bezeichne, siehe Bakhtiari et al. (2011). In der Praxis werden vorwiegend  $\Omega$ -Wendungen verwendet.

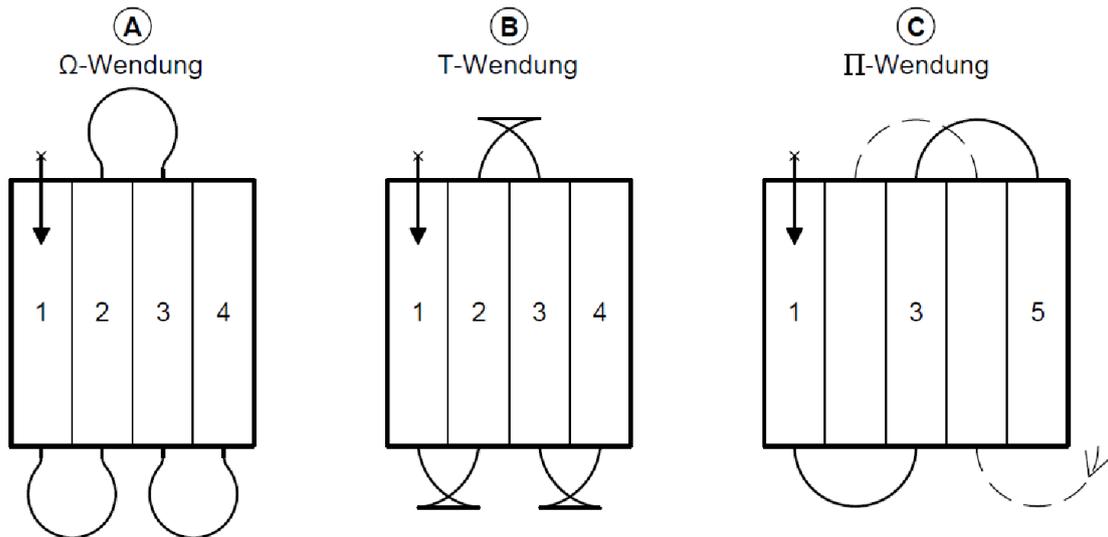


Abbildung 6: Unterschiedliche Wendemanöver: A:  $\Omega$ -Wendung, B:  $T$ -Wendung, C:  $\Pi$ -Wendung.

Ferner werde ohne Beschränkung der Allgemeinheit kein Vorgewende ausgeführt - falls ein Vorgewende erforderlich ist, so sei es vorab erfolgt - und in einer Stunde eine gewisse Menge an Mais gehäckselt, das anschließend in ein Silo mit Silowaage und einer bestimmten Verdichtungsleistung mit der Einheit  $[\frac{t}{h}]$  transportiert wird. Die gehäckselte Menge an Mais pro Stunde entspricht dabei der Häckslerleistung pro Stunde und besitzt deshalb ebenfalls die Einheit  $[\frac{t}{h}]$ . Darüber hinaus sollen sich die Transporteinheiten zu Beginn des Ernteprozesses am Depot eines Lohnunternehmers (oder eventuell auch an Depots mehrerer Lohnunternehmer) befinden. Ferner soll der Transportverkehr der Transporteinheiten auf dem Feld wegen eventueller durch den Transportverkehr entstehender Bodenverdichtungen möglichst über den Schlagrand abgewickelt werden. Dabei muss zunächst solange virtuell am Schlagrand entlang gefahren werden, bis die geradlinige Verbindung zwischen Feldhäcksler und Schlagrand in der aktuellen Fahrspur des Feldhäckslers liegt. Es existieren somit zwei solcher Feldfahrwege, wobei der Kürzere dieser Fahrwege für den Transportverkehr auf dem Feld tatsächlich ausgewählt wird. Ausgehend vom Depot des Lohnunternehmers (von den Depots der Lohnunternehmer) fahren die Transportfahrzeuge zeitverzögert auf dem kostengünstigsten Weg zum Silo, wo sie zunächst im Leerzustand gewogen werden. Kostengünstig bedeutet dabei, dass entweder die schnellste oder die ökonomischste Route gewählt wird. Zur Berechnung solcher Routen wird im Abschnitt Material und Methoden Unterabschnitt Präliminarien ein spezieller Algorithmus bereitgestellt. Nach dem Wiegen am Silo fahren die Transportfahrzeuge weiter zum Schlagrand, wo bereits der Feldhäcksler einsatzbereit ist. Dort angekommen fährt das erste Fahrzeug auf gleiche Höhe, wo sich der Feldhäcksler befindet, und der Häckselprozess beginnt. Während das erste Transportfahrzeug beladen wird, nähert sich bereits das zweite Transportfahrzeug an, um zu gewährleisten, dass die Stillstandszeiten bzw. Wartezeiten des Feldhäckslers möglichst gering sind. Dabei kann es allerdings auch vorkommen, dass das zweite Transportfahrzeug sich zu früh dem Feldhäcksler nähert, was zu Wartezeiten des zweiten Transportfahrzeugs führt. So fortfahrend stellt sich eine Häckselkette im Parallelverfahren mit einer gewissen Anzahl an Transportfahrzeugen mit Entladung und erneutem Wiegen am Silo wie in Abbildung 3 ein. Dabei kann es vorkommen, dass am Silo pro Stunde mehr Häckselgut zu verdichten ist, als es die Siloverdichtungsleistung

zulässt. In diesem Fall entstehen zusätzliche Wartezeiten für die Transportfahrzeuge, die auf die einzelnen ankommenden Transporteinheiten sinnvoll aufzuteilen sind. Eine sinnvolle Aufteilung ist die anteilmäßige Aufteilung nach der Beladungskapazität der einzelnen Transportfahrzeuge, die in dieser Arbeit weiter verfolgt wird. Insgesamt ist somit eine Erntekette abzustimmen.

## 1.2 Ziel der Dissertation

Diese Dissertation vereint die Theorie der evolutionären Algorithmen mit der praktischen Anwendung. Ziel der Dissertation ist die Entwicklung eines Planungssystems zur Optimierung von Agrarlogistik-Prozessen, wobei im Wesentlichen die Gesamttransportkosten und die Stillstandszeiten des Feldhäckslers und der Transporteinheiten mittels Methoden der mathematischen Optimierung minimiert werden sollen. Ferner soll die optimale Anzahl an Transporteinheiten bestimmt werden. Dabei steht zunächst die mathematische Modellierung der Erntekette mittels eines reell kodierten nicht glatten nichtlinearen gemischt-ganzzahligen Optimierungsproblems und die Entwicklung schneller und effizienter evolutionärer Algorithmen (genetische Algorithmen, Tabu-Suche) zu deren Lösung, nach einer Transformation ein kombinatorisches Optimierungsproblem und Entwicklung dazugehöriger Datenaufbereitungsalgorithmen, im Vordergrund. Ferner wird der Pseudocode der entwickelten Algorithmen in der höheren Programmiersprache C# implementiert, wodurch ein ausführbares Programm entsteht. Dieses Programm, das in dieser Dissertation aufgrund dessen Umfangs nur zum Teil dem Leser zur Verfügung gestellt wird, wird anhand der Maiserntedaten des Schrages Hausacker in der Nähe von Ebersberg im Großraum München evaluiert. Dabei werden die Ergebnisse tabellarisch aufbereitet. Darüber hinaus wird auf weiterführende Arbeiten in Form eines Anschlussvorhabens eingegangen. Die Förderung des bisherigen Vorhabens erfolgt/erfolgte aus Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz über die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung im Rahmen des Programms zur Innovationsförderung.

## 1.3 Ausblick auf die Dissertation

Im Nachfolgendem folgen 7 weitere Abschnitte, deren Inhalte hier kurz zusammengefasst werden. Im Abschnitt 2 werden die Arbeiten einiger Wissenschaftler vorgestellt, in den verwandte Problemstellungen bearbeitet wurden. Diese Arbeiten fokussieren sich hauptsächlich auf den kostengünstigsten Transport von Personen, gebunden an einen vorgegebenen Transportplan mit vorgegebenen Transportzeiten. Obwohl die Problemstellung nicht genau der Problemstellung in dieser Arbeit entspricht, können aus diesen Arbeiten einige wichtige Erkenntnisse für die vorliegende Arbeit gewonnen werden. Im Abschnitt 3 wird die Erntekette aus Abschnitt 1 durch ein reell kodiertes nicht glattes nichtlineares gemischt-ganzzahliges Optimierungsproblem mathematisch modelliert und das mathematische Modell beschrieben. Abschnitt 4 stellt zunächst die mathematischen Hilfsmittel für die Entwicklung eines passenden Optimierers bereit, gefolgt von der Bestimmung der Kostenkoeffizienten des Optimierungsproblems aus 3, wobei hier aus Komplexitätsgründen der Dijkstra-Algorithmus anstatt binärer lineare Programme verwendet wird. In einem nächsten Schritt wird das Optimierungsproblem aus Abschnitt 3 in kombinatorisches Optimierungsproblem überführt, das zwar NP-hart ist, jedoch nach einem geeigneten Datenpreprocessing und Konstruktion einer Anfangspopulation mittels des genetischen Algorithmus FEGA und DEGA, einer Differential-Evolution und eines ultimativen Algo-

rithmus effizient gelöst werden kann. Abschnitt 5 dient zur Evaluierung der in 4 entwickelten Metaheuristiken anhand von Maiserntedaten des Schrages Hausacker in der Nähe von Ebersberg im Großraum München. Dabei werden die Ergebnisse im Einzelnen zusammengestellt, die sodann in Abschnitt 6 im Hinblick auf die Zielstellung diskutiert und bewertet werden, und in den bestehenden Wissensstand einbezogen werden. Dabei werden auch die verwendeten Methoden kritisch bewertet. In Abschnitt 7 wird auf weitere weiterführende Problemstellungen der Gesamtoptimierung großer Ernteketten eingegangen, gefolgt von Abschnitt 8, der die wichtigsten Ergebnisse der Dissertation zusammenfasst.

## 2 Stand des Wissens

Die Erntekette aus Abschnitt 1 ähnelt am ehesten einem Dial-A-Ride Problem. Beim einem Dial-A-Ride Problem handelt es sich um ein Personentransportproblem mit Zeitfenstern, wo eine in der Regel von einem Depot aus startende Transportfahrzeugflotte Personen von einem Ort an einen anderen Ort transportiert und für das Ein- und Aussteigen der Personen in die Transportfahrzeuge gewisse Zeitfenster vorgegeben sind. Das Problem besteht nun darin, einen optimalen Transportfahrplan für die einzelnen Transportfahrzeuge zu finden, der die Gesamttransportkosten, die Fahrzeit und die Wartezeiten der Personen und die Verspätungen der Transportfahrzeuge minimiert (Borndörfer et al. (1997), Calvo et al. (2004), Cordeau und Laporte (2003 a), Jørgensen (2002), Parragh (2009), Taehyeong (2011), Xu et al. 2004)). Wie bei den einzelnen Ernteketten ist es auch hier meistens sehr schwierig, alle Zielgrößen simultan zu minimieren, weshalb ausgefeilte Optimierungsverfahren erforderlich sind. Ferner existieren nur für eine kleine Anzahl an Anfragen analytische Lösungsverfahren wie zum Beispiel das Branch-and-Cut Verfahren (Cordeau 2004), das sich wie folgt beschreiben lässt: Nach Anwendung eines Preprocessing auf die LP-Relaxation des Ausgangsproblems wird zunächst die LP-Relaxation des gemischt binären Ausgangsproblems gelöst. Falls diese Lösung allen Nebenbedingungen genügt, so stellt sie eine Optimallösung dar. Andernfalls wird ein Enumerationsbaum generiert. An einigen Knoten des Enumerationsbaumes werden mittels Separationsheuristiken zulässige Ungleichungen hinzugefügt, die zum Beispiel von einer binären Lösungsvariablen mit fraktionalem Wert verletzt werden. Um den Branch-and-Cut-Prozess zu steuern, werden für jedes Transportfahrzeug und jeden Beladungsknoten jeweils die binären Wegvariablen summiert. Falls an einem Knoten des Suchbaumes die dazugehörigen Summenvariablen ganzzahlig sind, jedoch ein Summand fraktional ist, werden die Separationsheuristiken benutzt, um Ungleichungen zu finden, die zum Beispiel von einer binären Lösungsvariablen mit fraktionalem Wert verletzt werden. Falls solche Ungleichungen gefunden werden, wird die zu dem Knoten gehörige LP-Relaxation gelöst und die Separationsheuristiken benutzt, um Ungleichungen wie soeben beschrieben, zu finden. Falls keine Ungleichungen mehr gefunden werden und die Lösung der LP-Relaxation immer noch fraktionale Werte enthält, wird an der fraktionalen Summenvariablen verzweigt. Falls keine Solche vorhanden ist, wird an einer fraktionalen Wegvariablen verzweigt. Es wird an derjenigen Variablen verzweigt, die am weitesten von der Ganzzahligkeit entfernt ist. Bevor der Branch-and-Cut-Algorithmus gestartet wird, wird die Tabu-Suche von Cordeau und Laporte (2003b) benutzt, um eine Näherungslösung zu berechnen, mit der schlechtere Lösungen und deren Lösungsäste abgeschnitten werden können, was in vielen Fällen zu einer erheblichen Verkleinerung des Enumerationsbaumes führt. Ferner wird vorab noch ein Ungleichungspool generiert, dessen Ungleichungen auf Verletztheit an jedem Knoten des Suchbaums geprüft werden, dessen Summenvariablen nicht alle ganzzahlig sind. Ein Vergleich mit der CPLEX-Version 8.1 zeigte, dass der Branch-and-Cut-Algorithmus von Cordeau sowohl die Rechenzeit reduzierte als auch einen kleineren Enumerationsbaum zur Folge hatte. Als Beispiel für ein Dial-A-Ride Problem kann zum Beispiel ein Taxitransportsystem genannt werden. Ferner wird bei einem Dial-A-Ride Problem zwischen statisch und dynamisch unterschieden. Bei einem statischen Dial-A-Ride Problem sind alle Personentransportaufträge vorab bekannt, was im dynamischen Fall nicht der Fall. Hier werden die Personentransportfahrzeuge bei Bedarf angefordert. Meistens tritt der dynamische Fall ein, wenn zum Beispiel zum statischen Fall zusätzlich dynamisch Transportfahrzeuge angefordert werden. In diesem Abschnitt werden nun einige wissen-

schaftliche Arbeiten zusammengefasst, die sich mit der Entwicklung von Heuristiken zur Lösung des Dial-A-Ride Problems beschäftigen. Zuerst wird ein Artikel betrachtet, der eine Einfügeheuristik verwendet. Der zweite, dritte und sechste Artikel verwendet jeweils eine Metaheuristik, Simulated Annealing (Kirkpatrick et al. (1983)), Tabu-Suche (Glover, F., Laguna, M., (1997)) und wiederum Simulated Annealing. Die restlichen Artikel lösen zum Dial-A-Ride Problem verwandte Probleme, beispielsweise das Pickup and Delivery Problem mit Zeitfenster und das Vehicle Routing Problem mittels genetischer Algorithmen.

## 2.1 Jih et al.

Jih et al. (1986) steuerte die ersten Beiträge zur Lösung des Dial-A-Ride Problems bei und viele andere Arbeiten bauen auf ihrer Arbeit auf. Jih et al. verwenden dabei eine sequentielle Einfügeheuristik, die auch mit der Abkürzung ADARTW bezeichnet wird. In ihrem Algorithmus werden die Transportanfragen zuerst nach ihrem Beladungsbeginn aufsteigend sortiert. Dann versucht der Algorithmus die Anfrage mit dem frühesten Beladungsbeginn einem Fahrzeug zuzuweisen und fügt sie bestmöglich bzgl. der Gesamtkosten ein. Falls die Anfrage keinem bereits benutzten Fahrzeug zugewiesen werden kann, wird sie entweder zurückgewiesen oder einem neuen, noch nicht benutzten Fahrzeug zugewiesen. So fortfahrend weist der Algorithmus alle Anfragen an Fahrzeuge zu. Dabei muss jede Anfrage entweder einen Be- oder Entladungsbeginn angeben. Daraus werden dann die Zeitfenster unter Verwendung der folgenden Parameter berechnet:

- Gewünschter Be- oder Entladungsbeginn.
- Transportzeit von einem Ort zu einem anderen Ort für die jeweilige Anfrage.
- Die maximal akzeptierte Transportzeit, die eine lineare Funktion in der Transportzeit von einem Ort zu einem anderen Ort für die jeweilige Anfrage ist.
- Die maximal akzeptierte Abweichung für den Be- oder Entladungsbeginn für jede Anfrage.

Die Zielfunktion setzt dabei aus den Transportkosten, der Fahrzeit für die einzelnen Anfragen und den Verletzungen der Zeitfenster für jede Anfrage zusammen, wobei die einzelnen Terme durch benutzerdefinierte Konstanten gewichtet werden. Dabei werden die Gewichte durch eine Simulation passend angepasst. Der ADARTW Algorithmus wurde an Simulationsdaten mit 250 Anfragen und 4 bis 5 Fahrzeugen und realen Daten mit 2617 Anfragen und 28 Fahrzeugen getestet. Dabei lag die Rechenzeit für die Simulationsdaten bei zirka 20 Sekunden und bei den realen Daten bei etwa 12 Minuten. Die Autoren kamen zu dem Ergebnis, dass der ADARTW Algorithmus mindestens so gute Ergebnisse liefert wie eine Planung per Hand.

## 2.2 Baugh et al.

Baugh et al. (1998) benutzen die Metaheuristik Simulated Annealing (Kirkpatrick et al. 1983), um das statische Dial-A-Ride Problem zu lösen.

1. Erzeuge per Zufall eine Anfangslösung, wähle eine Starttemperatur  $T_0$  und einen Temperaturreduzierungsfaktor  $\alpha$ .
2. Setze  $T = T_0$ .

3. Iteriere solange
4. Wähle zufällig, gleich-verteilt aus zwei Clustern jeweils eine Anfrage.
5. Falls die obere Grenze des Zeitfensters der zweiten Anfrage kleiner ist als obere Grenze des Zeitfensters der ersten Anfrage, wähle zufällig mittels der Gleichverteilung einen Nachbarschaftsoperator aus der Menge {Umverteilungsoperator, Gleichverteilungsoperator} aus und wende ihn auf die ausgewählten Anfragen an.
7. Berechne die Betragsdifferenz der dazugehörigen Gesamtkosten und bezeichne ihn mit  $\Delta$ .
8. Falls  $\Delta < 0$  gilt, akzeptiere die Nachbarschaftsoperation durch den Nachbarschaftsoperator und setze  $T = \alpha T$ .
9. Ansonsten wähle eine gleichverteilte Zufallszahl  $U$  aus  $[0, 1]$ . Falls  $U < \exp^{-\frac{\Delta}{T}}$  gilt, akzeptiere die Nachbarschaftsoperation durch den Nachbarschaftsoperator.
10. während einer gewissen Anzahl an Iteration ein Fortschritt erzielt wird.

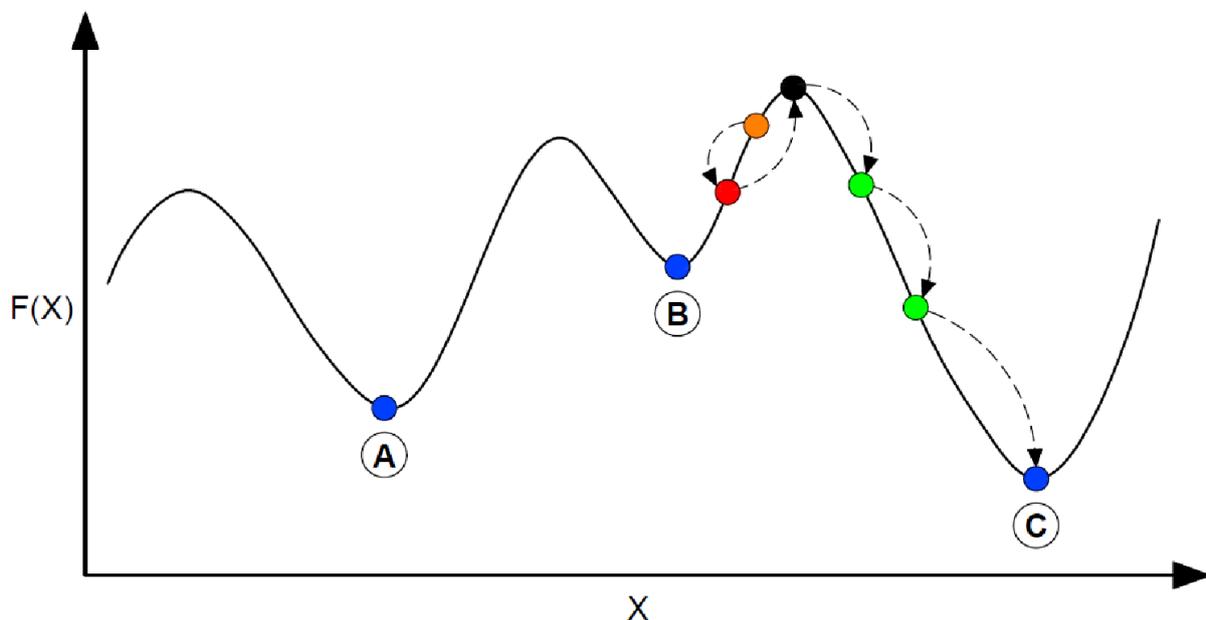


Abbildung 7: Die Metaheuristik Simulated Annealing besitzt die Fähigkeit, lokalen Optima zu entkommen.

Sie verwenden diese Metaheuristik deshalb, weil sie relativ leicht auf geeignete Nachbarschaftsumgebungen anwendbar ist, gute theoretische Konvergenzeigenschaften besitzt und leicht mit anderen Metaheuristiken wie die Tabu-Suche kombiniert werden kann. Die Tabu-Suche (TS, engl. tabu search) ist ein lokales Suchverfahren, das über ausgefeilte Mechanismen verfügt, den Verlauf der Optimierung zu steuern. Charakteristisch ist, dass bei der Erzeugung der neuen Kindindividuen die Geschichte der bisherigen Optimierung berücksichtigt wird. Hierfür wird Information aus den letzten Veränderungen durch den Mutationsoperator extrahiert und in einer sogenannten Tabu-Liste gespeichert, die das Zurückkehren zu den zuletzt betrachteten Lösungskandidaten verhindert. Die Tabu-Liste ist eine FIFO-Warteschlange (first in first out-Warteschlange) fester Länge. Damit fällt ein Tabu-Eintrag nach einer vordefinierten Anzahl von Iterationen aus der Liste heraus und die Mutation kann den bisher verhinderten Wert wieder setzen. Dadurch werden weitaus mehr mögliche Nachkommen ausgeschlossen als diejenigen, die bereits betrachtet

wurden. Um zu vermeiden, dass dadurch auch sinnvolle Lösungen abgeschnitten werden, können spezielle erstrebenswerte Eigenschaften das Tabu für eine spezielle Mutation überstimmen. Solche erstrebenswerte Eigenschaften können in einer ähnlichen Weise wie die Tabu-Eigenschaften in einer Liste verwaltet werden, häufig sind dies jedoch feste Kriterien wie die, dass der Güterwert des neuen Individuums besser als der des besten bisher bekannten Lösungskandidaten ist.

### Tabu-Suche:

1. Setze  $t = 0$ .
  2. Erzeuge einen zufälligen Lösungskandidaten  $A(t)$ , die den Variablenbereichsvorgaben (falls vorhanden) genügt.
  3. Setze  $\text{BestInd} = A(t)$ .
  4. Lege eine leere Tabu-Liste an, die  $n \in \mathbb{N}$  Elemente speichern kann und speichere  $A(t)$  dort ab.
  5. Solange Terminierungsbedingung nicht erfüllt ist, führe aus:
  6. Lege eine leere Liste  $P$  an.
  7. Solange  $P$  weniger als  $m \in \mathbb{N}$  Elemente enthält, führe aus:
  8. Wende einen passenden Mutationsoperator auf  $A(t)$  an und erhalte ein Individuum  $B$ .
- Mögliche Mutationsoperatoren sind gegeben durch:

```

List<int> Reellwertige_Mutation(Eingabe p, List<int> P, double x)
{
    double U;
    double O;
    for(int i = 0; i < P.Count; i++)
    {
        double Zufallszahl = NextDouble();
        if (Zufallszahl <= 0.1)
        {
            U = Math.Max(0, P[i] - x);
            O = Math.Min(p.Anzahl_der_benutzten_Transportfahrzeuge, P[i] + x);
            P[i] = (int)(U + (O - U) * NextDouble());
        }
    }
    return P;
}

List<int> Vertauschende_Mutation(List<int> P, int a)
{
    List<int> B = new List<int>();
    B = P;
    int Zufallszahl_1 = NextInt(0, a);
    int Zufallszahl_2 = NextInt(0, a);
    B[Zufallszahl_1] = P[Zufallszahl_2];
    B[Zufallszahl_2] = P[Zufallszahl_1];
    return B;
}

List<int> Dreiertausch_Mutation(List<int> P, int a)
{
    List<int> B = new List<int>();
    B = P;
    int Zufallszahl_1 = NextInt(0, a);
    int Zufallszahl_2 = NextInt(0, a);
    int Zufallszahl_3 = NextInt(0, a);
    B[Zufallszahl_1] = P[Zufallszahl_2];
    B[Zufallszahl_2] = P[Zufallszahl_3];
    B[Zufallszahl_3] = P[Zufallszahl_1];
    return B;
}

List<int> Invertierende_Mutation(List<int> P, int a)
{
    List<int> B = new List<int>();
    B = P;
    int Zufallszahl_1 = NextInt(0, a);
    int Zufallszahl_2 = NextInt(0, a);
    int U = Math.Min(Zufallszahl_1, Zufallszahl_2);
    int O = Math.Max(Zufallszahl_1, Zufallszahl_2);
    for (int i = U; i <= O; i++)
    {
        B[U + O - i] = P[i];
    }
    return B;
}

```

Abbildung 8: Eine kleine Auswahl an Mutationsoperatoren zur Bestimmung der Einsatzreihenfolge der tatsächlich verwendeten Abfuhrspanne aus einem Pool an Abfuhrgespannen.

9. Bestimme und fixiere den Gütewert von  $B$ .
10. Falls  $A(t)$  und  $B$  nicht in der Tabu-Liste enthalten sind oder der Gütewert von  $B$  besser als der Gütewert von BestInd ist, speichere  $B$  in  $P$  ab. Ende solange.
11. Setze  $t = t + 1$ .
12. Bestimme das Individuum aus  $P$  mit dem besten Gütewert und weise es  $A(t)$  zu.
13. Falls  $A(t)$  eine besser Güte als BestInd besitzt, so weise  $A(t)$  BestInd zu und aktualisiere den dazugehörigen Funktionswert.
14. Aktualisiere die Tabu-Liste durch  $A(t)$ .
15. Falls die Tabu-Liste  $n$  Elemente enthält, so reduziere sie durch Entfernen des ersten Elements der Tabu-Liste auf  $n - 1$  Elemente. Ende solange.
16. Erhalte das beste Individuum in BestInd.

Ihre Arbeit basiert auf dem klassischen Cluster-first, Route-second Ansatz. Ein Cluster ist dabei eine Menge von Anfragen, die alle demselben Fahrzeug zugewiesen werden und auch zusammen abgearbeitet werden. In ihrem Ansatz werden Anfragen in Cluster organisiert und anschließend Routen für die einzelnen Cluster konstruiert. Dabei wird für das Clustering das Simulated Annealing Verfahren und für das Routing eine modifizierte space-time nearest neighbour Heuristik verwendet. Die Autoren behaupten dabei, dass das Clustering das Herzstück der Optimierung ist, weil das Routing jeweils nur eine kleine Anzahl an Anfragen betrifft. Sie sehen den Algorithmus für das Clustering als weitaus komplexer an als für das Routing. Der Algorithmus für das Clustering wird zunächst durch eine zufällige Partition der Anfragen initialisiert. Danach werden ein Austausch- und ein Umverteilungsoperator (Abb. 9, Abb. 10) verwendet, um die Partition der Anfragen zu verändern.

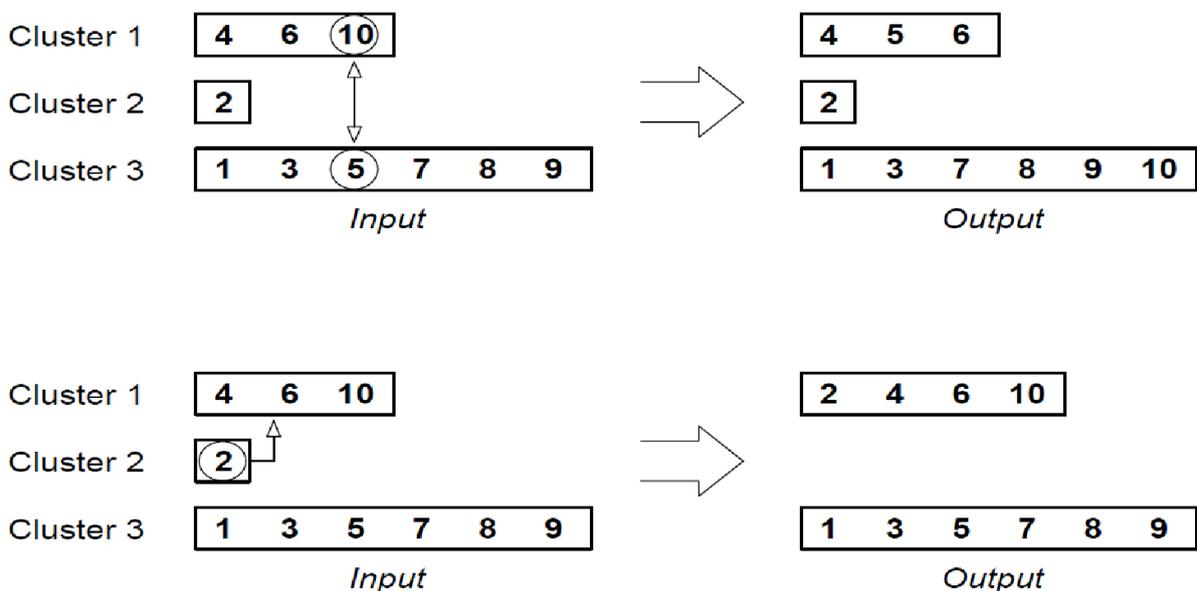


Abbildung 9: Beispiel für einen Austauschoperator: Es wird die Anfrage 10 in Cluster 1 gegen die Anfrage 5 in Cluster 3 ausgetauscht.

Abbildung 10: Beispiel für einen Umverteilungsoperator: Es wird die Anfrage 2 in Cluster 2 in Cluster 1 umverteilt.

Dabei werden für den Austauschoperator zunächst zwei verschiedene Cluster zufällig ausgewählt und anschließend zwei zufällig ausgewählte Anfragen aus je einem der Cluster ausgetauscht. Hingegen werden beim Umverteilungsoperator zwei verschiedene Cluster ausgewählt, danach eine Anfrage aus einem der beiden Cluster zufällig ausgewählt und in den anderen Cluster umverteilt. Dabei ist zu bemerken, dass der Austauschoperator die Mächtigkeit der Cluster unverändert lässt, beim Umverteilungsoperator die Mächtigkeit des einen ausgewählten Clusters um eine Anfrage verringert und die Mächtigkeit des anderen ausgewählten Clusters um eine Anfrage erhöht wird. Die entstehenden Nachbarschaftsumgebungen sind von einfacher Bauart und es ist möglich, einen beliebigen Cluster aus der Ausgangspartition zu konstruieren. Ferner dient der Austauschoperator eher zur lokalen Verfeinerung eines Clusters, während der Umverteilungsoperator eher zur Konstruktion unterschiedlichster Cluster dient. Danach wird in jeder Iteration des Simulated Annealing Verfahrens der Routing-Algorithmus auf die jeweils ausgewählten Cluster angewandt, die Routen konstruiert und der neue Zielfunktionswert berechnet. Dabei setzt sich die Zielfunktion aus dem zurückgelegten Gesamtweg aller Fahrzeuge, der Anzahl der Fahrzeuge und einem Strafterm für die nicht rechtzeitige oder zu frühe Abwicklung der Anfragen zusammen. Falls eine neue Lösung besser als die beste bereits bekannte Lösung ist, erfolgt ein Update der besten bereits bekannten Lösung, ansonsten erfolgt ein Update der besten bereits bekannten Lösung nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit. Die Wahrscheinlichkeit ist eine Funktion im Zielfunktionswert und in der Abkühlungstemperatur. Um die Simulated Annealing Ergebnisse zu verbessern, wird eine Tabu-Liste verwendet, sodass das Entfernen von Anfragen aus einem Cluster in einer der nächsten Iterationen nicht wieder rückgängig gemacht werden kann. Die modifizierte space-time nearest neighbour Heuristik ist ein Greedy-Algorithmus und dient zur Konstruktion einer Route aus einem Cluster. Sie beginnt mit der Beladung der frühesten Anfrage und wählt als nächste noch nicht bearbeitete Anfrage diejenige mit den geringsten Kosten aus. Dabei ergeben sich die Kosten aus der nächsten noch nicht bearbeiteten Anfrage und zweier weiterer noch nicht bearbeiteter Anfragen, falls solche Anfragen existieren. Ansonsten wird die maximal existierende Anzahl verwendet. Die höchstens drei soeben genannten Anfragen ergeben sich wiederum durch eine space-time Separation, angewandt auf die noch nicht abgearbeiteten Anfragen, wobei die drei besten Anfragen ausgewählt werden. Die space-time Separation ergibt sich dabei als gewichtete Summe der Fahrzeiten zwischen den noch nicht bearbeiteten Anfragen und einem Strafterm für die Zeitfensterverletzung für die Entladung der aktuellen Ausgangsanfrage. Die Ergebnisse der Autoren basieren sowohl auf realen Daten mit 300 Anfragen als auch auf künstlich generierten Daten mit 25 Anfragen. Dabei geben die Autoren keine Rechenzeiten an. Sie behaupten jedoch, dass der Algorithmus Lösungen nahe dem globalen Optimum liefert. Sie schreiben auch, dass der Algorithmus robust ist und annähernd immer dieselben Lösungen produziert. Ferner wird behauptet, dass die Simulated Annealing Parameter so gut wie keiner Feinabstimmung unterworfen werden müssen. Eine Feinabstimmungsmethode für die Metaheuristik Simulated Annealing könnte zum Beispiel wie folgt aussehen (Dorband et al. 2004):

1. Erzeuge per Zufall eine Anfangslösung.
2. Setze  $P_{Start} = 0.999$  und  $P_{Ende} = 0.001$ .
3. Setze  $\Delta_{avg} = 0$ .
4. Für  $i = 0, \dots, n - 1$
5. Wähle zufällig mittels der Gleichverteilung aus zwei Clustern jeweils eine Anfrage, wähle zufällig, gleichverteilt einen Nachbarschaftsoperator aus der Menge {Umverteilungs-

operator, Gleichverteilungsoperator} aus und wende ihn auf die ausgewählten Anfragen an.

6. Berechne die Betragsdifferenz der dazugehörigen Gesamtkosten und bezeichne ihn mit  $\Delta$ .

7. Berechne  $\Delta_{avg} = \Delta_{avg} + \Delta$ .

8. Ende 4..

9. Berechne  $\Delta_{avg} = \frac{\Delta_{avg}}{n}$ .

10. Berechne  $T_0 = -\frac{\Delta_{avg}}{\log(P_{Start})}$ .

11. Berechne  $T_N = -\frac{\Delta_{avg}}{\log(P_{End})}$ .

12. Berechne  $\alpha = \exp^{\frac{\log(T_N) - \log(T_0)}{N}}$ , wobei  $N$  gleich der gewünschten Iterationstiefe entspricht.

13. Gib die Simulated Annealing Parameter  $T_0, T_N$  und  $\alpha$  zurück.

### 2.3 Cordeau und Laporte

Cordeau und Laporte (2003 b) veröffentlichten einen wissenschaftlichen Artikel, in dem das statische Dial-A-Ride Problem mit einer Tabu-Suche gelöst wird. Die Tabu-Suche startet dabei mit einer zufällig generierten Anfangslösung, die durch zufälliges Zuweisen der einzelnen Serviceaufträge an zufällig ausgewählte Transportfahrzeuge generiert wird. Dabei muss nicht notwendigerweise auf eine Beladung die dazugehörige Entladung von Personen erfolgen, es können auch mehrere Beladungen aneinander gereiht sein, gefolgt von Entladungen und Beladungen. Es muss jedoch die zu einer Beladung dazugehörige Entladung nach der Beladung erfolgen. Ferner wird in jeder Iteration die beste Lösung aus einer Umgebung der aktuellen Lösung gespeichert. Die Umgebung einer aktuellen Lösung wird dabei durch einen einfachen Umverteilungsoperator, der aus einer Tour einen Serviceauftrag entfernt und ihn in eine andere Tour bestmöglich bzgl. der Gesamtkosten einfügt, konstruiert. Ferner werden die einzelnen Touren nach dem Auffinden einer neuen besten aktuellen Lösung oder nach einer gewissen Anzahl an Iterationen durch Umordnen der Serviceaufträge bzgl. der Gesamtkosten reoptimiert. Um keine degenerierten Lösungen zu erhalten, dürfen Serviceaufträge, die aus einer Tour entfernt wurden und in einer sogenannten Tabu-Liste gespeichert werden für eine gewisse Anzahl an Iterationen nicht wieder in die Tour eingefügt werden, aus der sie entfernt wurden, es sei denn, dass sie zu einer besseren Lösung als die aktuell beste Lösung führen. Dabei wird auch von Aspiration gesprochen. Zusätzlich werden im Tabu-Suche Algorithmus sogenannte leichte Zeitfenster verwendet, sodass auch unzulässige Lösungen, die nicht allen Zeitfensterbedingungen genügen, zugelassen sind. Dabei werden aber in der Zielfunktion, die im Wesentlichen aus den Gesamttransportkosten und Straftermen für nicht ausreichenden Service zusammensetzt, unzulässigere Lösungen durch Erhöhung der entsprechenden Zielgewichte mehr bestraft als nicht so unzulässige Lösungen bzw. die Zielfunktionsgewichte zulässiger Lösungen reduziert. Darüber hinaus werden beste Lösungen aus einer Umgebung, die schlechter als die aktuell beste Lösung durch einen zusätzlichen Strafterm in der Zielfunktion bestraft, wobei hier die Transportkosten und der Serviceauftrag, der zu der neuen Lösung führt, und dessen Einfügungsanzahl in vergangene Touren, berücksichtigt werden. Ferner wird für jeden Lösungskandidaten eine Programmierheuristik verwendet werden, die die Zeitfensterverletzungen, Routendauern und Transportzeiten minimiert. Dabei können auch nur die Zeitfensterverletzungen und die Routendauern oder nur die Zeitfensterverletzungen minimiert werden. Diese drei zusätzlichen Optimierungsoptionen

wurden an zufällig generierten Problemen mit einer Serviceauftragszahl zwischen 24 und 144 und an sechs realen Datensätzen mit einer Serviceauftragszahl von 200 bzw. 295 Serviceaufträgen getestet. Die Rechenzeit lag dabei für den Kleinsten unter den zufällig generierten Datensätzen bei zirka 2 Minuten und für den Größten bei etwa 93 Minuten. Bei den realen Datensätzen lag die Rechenzeit zwischen 13 und 268 Minuten. Cordeau und Laporte verglichen ihre Ergebnisse nicht mit den Ergebnissen anderer Autoren.

## 2.4 Jih et al.

Jih et al. (2002) veröffentlichten einen Artikel zur Lösung eines single vehicle pickup and delivery Problems mit Zeitfenstern (Hosny I. M. (2010)). Sie verwenden zu dessen Lösung einen genetischen Algorithmus, der auf Konkurrenzfamilien basiert. Für genetische Algorithmen (Fraser (1957), Holland (1975)) wird ein passender Genotyp benötigt, der die einzelnen Anfragen repräsentiert. Dabei wählten die Autoren als Genotyp die Anfragen in einer Route. Ihr Algorithmus lässt auch unzulässige Lösungen zu. Dabei setzt sich die Zielfunktion, in der Terminologie genetischer Algorithmen auch als Fitnessfunktion bezeichnet, aus den Gesamtfahrzeiten der Fahrzeuge und den Straftermen für Zeitfensterverletzungen zusammen. Der genetische Algorithmus, der auf Konkurrenzfamilien basiert, ist ein erweiterter genetischer Algorithmus, wo zu jedem Individuum in der aktuellen Population eine Familie von Individuen konstruiert wird. Dabei wird jedes Individuum der aktuellen Population als Familienvater bezeichnet. Jeder Familienvater wird nun benutzt, eine Familie zu generieren, indem jeder Familienvater mit zufällig ausgewählten vom jeweiligen Familienvater verschiedenen Individuen der aktuellen Population rekombiniert wird, was in der Terminologie genetischer Algorithmen auch als Crossover bezeichnet wird. Dabei kann auf das Crossover eine Mutation folgen, die die aktuelle Lösung nur leicht verändert, wobei diese Veränderung zufallsbasiert ist. Die Größe der so konstruierten Familie ist eine Konstante  $K$  und es werden pro Iteration  $KM$  neue Individuen konstruiert, wobei  $M$  der Größe der aktuellen Population entspricht. Dabei überlebt aus jeder Familie nur das beste Individuum. Dieses Individuum wird in die nächste Population übernommen. Es werden nun solange neue Generationen erzeugt, bis eine Terminierungsbedingung erfüllt ist. Die Autoren geben allerdings nicht an, welche Abbruchbedingung sie verwenden. In der Rekombinationsphase werden zwei Typen von genetischen Operatoren verwendet, Crossover und Mutation. Dabei werden vier Crossoveroperatoren betrachtet, orderd-based Crossover, uniform-orderd-based Crossover, merge cross # 1, merge cross # 2. Die ersten beiden Crossoveroperatoren sind in der Literatur bereits bekannt, aber die letzten beiden Operatoren benutzten ein Array, um das Crossover zu steuern. Die Mutationen werden hier kurz erläutert: Die erste Mutation wählt zufällig zwei Gene des Genotyps aus und vertauscht sie dann, während die zweite Mutation den Genotyp eine zwei Teile zerlegt, und die dabei entstehenden Teilrouten invertiert. Die Mutation wird dabei verwendet, wenn ein neugeneriertes Individuum bereits generiert wurde, und beide Individuen dieselbe Route beschreiben. Damit soll die Diversität bei der Routenkonstruktion erhalten bleiben und ein vorzeitige Festfahren in einem eventuell schlechten lokalen Optima verhindert werden. Der Algorithmus wurde an zufällig generierten Datensätzen mit bis zu 100 Anfragen getestet, wobei die Rechenzeit für die größten Datensätze bei 38 Minuten lag. In den Experimenten wurde der konkurrenzfamilienbasierte Algorithmus mit dem traditionellen genetischen Algorithmus verglichen. Die Autoren fanden heraus, dass der erste Algorithmus bessere Resultate produziert und die Wahrscheinlichkeit, optimale Lösungen bei gleicher Rechenzeit zu finden, höher ist. Ferner wurden auch die verschie-

denen Crossoveroperatoren miteinander verglichen und es stellte sich heraus, dass das orderd-based Crossover nicht zur Lösung des pickup and delivery Problems geeignet ist. Darüber hinaus ergab sich, dass das uniforme orderd-based Crossover die besten Lösungen produziert, aber mehr Rechenzeit benötigt, während beide merge cross weniger Rechenzeit benötigen und trotzdem brauchbare Ergebnisse liefern, und deshalb für reale Daten besser geeignet sind. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der konkurrenzfamilienbasierte genetische Algorithmus zulässige Lösungen bei einer passablen Rechenzeit liefert und die Wahl der genetischen Operatoren einen starken Einfluss auf die vom Algorithmus produzierten Ergebnisse hat. Ferner wurden die Ergebnisse des Algorithmus für niedrigdimensionale Probleme, d. h. für Probleme mit bis zu 40 Anfragen, mit den dazugehörigen Optimallösungen verglichen. Bei Verwendung eines uniform-orderd-based Crossoveroperatoren stimmten die Ergebnisse des konkurrenzfamilienbasierten genetischen Algorithmus in 83 Prozent aller Fälle mit den dazugehörigen Optimallösungen überein.

## 2.5 Pereira et al.

Pereira et al. (2002) schrieben einen wissenschaftlichen Artikel zum Thema "GVR: A New Genetic Representation for the Vehicle Routing Problem". In ihrer Arbeit wird ein genetischer Algorithmus zur Lösung des Vehicle Routing Problems mit Kapazitätsbeschränkungen verwendet. Dabei wird ein zwei Level-Schema entwickelt, das alle Informationen zur Beschreibung einer möglichen Lösung enthält, wobei eine Lösung die Anzahl der benötigten Fahrzeuge, die Zuweisungen der einzelnen Anfragen an die Fahrzeuge und die Reihenfolge der Anfragen in einer Route enthält. In der Terminologie genetischer Algorithmen repräsentiert ein Individuum eine Lösung und besteht aus einem Genotypen, einer Zusatzinformation und einem Güterwert. Der Genotyp enthält dabei die Anfragen, geordnet in der Reihenfolge, in der sie abgearbeitet werden müssen. Dabei muss jede Anfrage in genau einem Genotyp abgelegt sein. Falls die Kapazitäten in einer Route überschritten werden, wird die Route in Teilrouten zerlegt und zum Beispiel neue Fahrzeuge angefordert, bis die Kapazitätsbeschränkungen eingehalten werden. Der Algorithmus startet mit einer Population von  $n$  Individuen. Dann werden in jeder Iteration  $n$  Individuen ausgewählt und davon mittels genetischer Operatoren  $n$  neue Individuen erzeugt. Die genetischen Operatoren, die verwendet werden, sind Crossover und Mutation. Dabei sollen die Operatoren die Reihenfolge der Anfragen innerhalb einer Route, die Zuweisung der Anfragen an die Fahrzeuge und somit die Anzahl der benötigten Touren verändern können. Ferner sollen die neuen Individuen eine zulässige Lösung repräsentieren. Eine Lösung heißt zulässig, wenn jede Anfrage genau einem Fahrzeug zugewiesen ist. Die Kapazität der Fahrzeuge hat dabei keinen Einfluss, da angenommen wird, dass das Nichtüberschreiten der Kapazität vor dem Einfügen einer Anfrage in eine Route überprüft wird. Beim Crossover wird dann von einem der Individuen, die zu einem Satz an Fahrzeugen gehören, eine Teilroute ausgewählt, und in ein Individuum die zu einem anderen Satz an Fahrzeugen gehört eingefügt. Die Teilroute wird dabei so eingefügt, dass sie hinter einer Anfrage erscheint, die nicht in der Teilroute enthalten ist und der ersten Anfrage der Teilroute am nächsten ist. Danach werden alle Duplikate der anderen Individuen des entsprechenden Satzes an Fahrzeugen entfernt. Dabei kann das Crossover einen Satz an Fahrzeugen reduzieren, die Reihenfolge der Anfragen in einer Route ändern und die Anfragen einer Route in eine andere Route umverteilen. Es können jedoch keine neuen Routen konstruiert werden. Die Individuen, die zu einem Satz an Fahrzeugen gehören, können dann mutiert werden. Dazu werden vier Mutationsoperatoren benutzt. Der erste Mutationsoperator kann die Anfragen

in einer oder verschiedenen Individuen, die zu einem Satz an Fahrzeugen gehören, vertauschen. Der zweite Mutationsoperator kann Routen invertieren, d. h. die Reihenfolge der Anfragen in einer Route invertieren. Der dritte Mutationsoperator wählt eine Anfrage aus einem zu einem Satz an Fahrzeugen gehörenden Individuum aus und fügt es in ein anderes zu dem demselben Satz an Fahrzeugen gehörendem Individuum ein. Dabei kann ein Individuum aus nur einer Anfrage entstehen. Der vierte Mutationsoperator ähnelt dem Crossover sehr. Dabei wird zuerst eine Teilroute ausgewählt und an einer anderen Stelle eingefügt. Dies kann entweder die zu einem Satz an Fahrzeugen gehörenden Individuen betreffen oder auch die zu einem anderen Satz an Fahrzeugen gehörenden Individuen betreffen. Er unterscheidet sich vom Crossoveroperator nur vom Einfügemechanismus. Beim vierten Mutationsoperator erfolgt das Einfügen zufällig. Zusammenfassend könne die Mutationsoperatoren Routen hinzufügen und löschen, die Reihenfolge von Anfragen ändern und Anfragen umverteilen. Der Algorithmus wurde an einer Sammlung von 12 Datensätzen aus bekannten Testbibliotheken getestet. Die Ergebnisse zeigen, dass der obige Algorithmus das Vehicle Routing Problem mit Kapazitätseinschränkungen effizient löst. Die Autoren fanden für die einzelnen Testprobleme meist die aktuell besten Ergebnissen oder kamen ihnen sehr nahe. Sie verbesserten sogar die besten Lösungen einiger Testprobleme. Ferner erwies sich der Algorithmus als robust und Parametereinstellungen hatten keinen Einfluss auf die Qualität der Lösungen. Die Autoren gaben allerdings keine Rechenzeit an. Der Schwerpunkt lag in ihrer Arbeit allerdings auf dem Auffinden von Optimallösungen.

## 2.6 Mauri und Lorena

Mauri und Lorena (2006) lösten das Dial-A-Ride Problem mittels einer Distributionsheuristik, mittels eines Umordnungs-, Austausch- und Umverteilungsoperator, einer Programmierheuristik und einer Metaheuristik, dem Simulated Annealing Verfahren. Dabei verteilen sie zuerst mittels einer Distributionsheuristik die einzelnen Anfragen zufällig auf die einzelnen Transportfahrzeuge und konstruieren somit ihre Starttrouten/Startindividuen. Danach wenden sie die Programmierheuristik auf die Starttrouten an, um die Optimierungsparameter bestmöglich anzupassen und starten dann das Simulated Annealing Verfahren. Während des Simulated Annealing Verfahrens wählen sie in jeder Iteration zufällig einen der oben genannten Operatoren aus und wenden ihn auf die aktuellen Individuen an. Der Umordnungsoperator dient dabei zur Umordnung der Anfragen in einer Route, der Austauschoperator zum Austauschen zweier zufällig ausgewählter Anfragen zweier verschiedener zufällig ausgewählter Routen und der Umverteilungsoperator zum Umverteilen einer zufällig ausgewählten Anfrage aus einer zufällig ausgewählten Route in eine andere zufällig ausgewählte Route. Nach jeder Anwendung einer der obigen Operatoren und der Konstruktion neuer Individuen wird die Programmierheuristik angewendet, um die Optimierungsparameter immer bestmöglich anzupassen. Über die Zielfunktion bestimmen sie, ob die jeweiligen zu einem Satz an Fahrzeugen gehörenden neuen Individuen die alten Individuen ersetzen. Ist dabei der Zielfunktionswert der neuen Individuen kleiner als der alten Individuen, so werden die alten durch die neuen Individuen ersetzt. Andernfalls wird eine gleichverteilte Zufallszahl aus  $[0, 1]$  erzeugt, und geprüft, ob sie kleiner als ein gewisser Wert ist. Dieser gewisse Wert hängt von der Zielfunktionsänderung und der Abkühlungstemperatur ab. Schließlich wird nach einer gewissen Anzahl an Iterationen die Abkühlungstemperatur langsam erniedrigt. Die Zielfunktion setzt sich dabei aus den Gesamttransportkosten und den Zeitfensterverletzungen für die einzelnen Anfragen zu-

sammen. Die Autoren verglichen ihre Arbeit mit der Arbeit von Cordeau und Laporte (2003 b) und der Arbeit von Bergvinsdottir et al. (2004). Sie testeten ihren Algorithmus an 13 Testinstanzen von Cordeau und Laporte (2003 b) mit einer Anfragenanzahl zwischen 24 und 144. Dabei zeigte sich, dass die Transportkosten für die Anfragen und deren Zeitfensterverletzungen reduziert werden konnten, wobei die Routendauern in allen drei Arbeiten annähernd dieselben Werte annahmen. Dafür konnte die Rechenzeit erheblich reduziert werden. Ferner erwies sich ihr Algorithmus als robust, was das in ihrer Arbeit definierte relative Abweichungsmaß zwischen dem durchschnittlichen und dem besten Güterwerte bei mehrmaliger Optimierung derselben Testinstanz zeigte.

## 2.7 Vergleichende Untersuchungen

In diesem Abschnitt werden die Arbeiten, die zuvor beschrieben wurden, zunächst untereinander verglichen. Der Abschnitt schließt dann mit einer Diskussion, in der es darum geht, aufzuzeigen, inwieweit die wissenschaftlichen Ergebnisse der einzelnen Arbeiten in dieser Arbeit verwendet werden können. Das erste Paper wurde von Jaw et al. (1986) geschrieben und enthält die ersten Lösungsansätze zur Lösung des Dial-A-Ride Problems. Der darin beschriebene Algorithmus verwendet eine sequentielle Einfügeheuristik, wobei die Anfragen aufsteigend nach ihren Beladezeiten sortiert werden. Der Algorithmus löste zufällig generierter Testinstanzen mit bis zu 250 Anfragen in zirka 20 Sekunden und reale Testinstanzen mit 2617 Anfragen in zirka 12 Minuten. Ferner wurden die Ergebnisse der realen Testinstanzen mit einer manuellen Planung verglichen, wobei sich herausstellte, dass der Algorithmus mindestens so gute Ergebnisse wie eine manuelle Planung produziert. Das erste Paper ist meiner Meinung nach klar strukturiert und interessant, da es die Zeitfensterberechnungen und darüber hinaus die Schwierigkeiten, die bei der Lösung des Dial-A-Ride Problems auftreten, sehr gut erläutert. Das zweite Paper wurde von Baugh et al. (1998) geschrieben und beschreibt, wie das Dial-A-Ride Problem mithilfe der Metaheuristik Simulated Annealing, die für das Clustering der Anfragen verwendet wird und einer space-time nearest neighbour Heuristik, die zur Konstruktion einer Route aus den Anfragen eines Clusters dient, gelöst werden kann. Das Simulated Annealing Verfahren löste zufällig generierte Testinstanzen mit bis zu 25 Anfragen und reale Testinstanzen mit bis zu 300 Anfragen, wobei die dazugehörigen Rechenzeiten nicht angegeben wurden. Die Ergebnisse der realen Trainingsinstanzen wurden mit den Plänen aus der Praxis verglichen. Dabei stellte sich heraus, dass sie besser waren. Es muss jedoch bemerkt werden, dass die Pläne nicht optimal sind und einige Zusätze enthalten, die von Baugh et al. nicht modelliert werden. Deshalb kann die Qualität der Lösungen von Baugh et al. nicht beurteilt werden. Die Autoren behaupten jedoch, dass der Algorithmus Lösungen nahe den globalen Optima liefert. Diese Aussage wird jedoch nicht bewiesen. Ferner soll der Algorithmus robust sein, immer dieselben Optimallösungen liefern und so gut wie kein Feintuning der Parameter benötigen. In meinen Augen ist das Paper sehr klar strukturiert und die Autoren halten sich streng an eine einheitliche Notation und eine ausführliche Darstellung. Als Beispiel hierfür ist ein mathematisches Modell zum Dial-A-Ride Problem zu erwähnen, das sich in einschlägigen Arbeiten nicht oft findet. Ferner wird in dieser Arbeit gezeigt, dass das Travelling Salesman Problem mit Zeitfenstern (TSPTW) NP-hart ist. Diese Aussage wird in dieser Arbeit für den Beweis verwendet, dass die in dieser Arbeit zu betrachtenden Optimierungsaufgaben ebenfalls NP-hart ist. Da die Autoren das Simulated Annealing Verfahren in Verbindung mit einer Tabu-liste verwendeten, stellt sich die Frage, ob es nicht besser gewesen wäre, wenn sie eine Tabu-Suche verwendet

hätten. Leider geben die Autoren keine Rechenzeiten an und erläutern nicht, warum ihr Algorithmus so gut wie Optimallösungen liefert. Das dritte Paper wurde von Cordeau und Laporte (2003 b) geschrieben. Es wird darin beschrieben, wie eine Tabu-Suche zur Lösung des Dial-A-Ride Problems verwendet werden kann. Der Algorithmus wird dabei an zufällig generierten Daten mit bis zu 144 Anfragen und an realen Testinstanzen mit bis zu 295 Anfragen getestet, wo bei sich im ersten Fall die worst-case Wartezeit zu 93 und im zweiten Fall zu 268 Minuten ergab. Die Ergebnisse wurden nicht mit den Ergebnissen anderer Autoren verglichen und es wurden jeweils nur die Kosten angegeben. Meiner Meinung besitzt die Tabu-Suche von Cordeau und Laporte ausgefeilte Mechanismen, um das ein globales Optimum tatsächlich aufzufinden. Teile dieser Tabu-Suche werden auch in dieser Arbeit verwendet, wenn es darum geht, mit einer Tabu-Suche Ergebnisse eines genetischen Algorithmus zu reoptimieren, um ein noch besseres Ergebnis zu erhalten. Nachteilig in ihrer Arbeit ist, dass zu den besten gefundenen Lösungen nur die Kosten angegeben werden und die Ergebnisse nicht mit den Ergebnissen anderer Autoren verglichen werden. Es wird jedoch eine Internetadresse angegeben, wo die Testinstanzen mit zusätzlichen Informationen verfügbar sind. Zu begrüßen ist, dass jeder Wissenschaftler Zugriff auf diese Testinstanzen hat. Das vierte Paper wurde von Jih et al. (2002) geschrieben und beschreibt, wie ein konkurrenzfamilienbasierter genetischer Algorithmus zur Lösung des single vehicle pickup and delivery Problems verwendet werden kann. Der Algorithmus löste zufällig generierte Testinstanzen mit bis zu 100 Anfragen in ca. 38 Minuten. Für kleinere Datensätze findet er das Optimum durchschnittlich in 87 Prozent aller Fälle auf. Ferner kommen die Autoren zum dem Schluss, dass ihr Algorithmus zum Auffinden zulässiger Lösungen geeignet ist, und darüber hinaus die Rechenzeit auch akzeptabel ist. Meiner Meinung nach enthält das Paper gute Ideen und Lösungsansätze, die nur sehr kurz beschrieben werden. Ferner wird nur das single vehicle pickup and delivery Problem gelöst und es geht nicht klar hervor, wie der Algorithmus zu modifizieren ist, um das multi vehicle pickup and delivery Problem (Hosny (2010)) zu lösen. Es können aber trotzdem einige Ideen für diese Arbeit, vor allem was das Lösen des Dial-A-Ride Problems mit genetischen Algorithmen betrifft, verwendet werden. Das fünfte Paper wurde von Pereira et al. (2002) geschrieben und beschreibt, wie genetische Algorithmen zur Lösung des Vehicle Routing Problems verwendet werden können. Dabei werden ein Crossover- und vier verschiedene Mutationsoperatoren verwendet, die ein sehr großes Spektrum an Modifikationsmöglichkeiten abdecken. Die Ergebnisse zeigen, dass der Algorithmus effizient und robust ist, und die aktuell besten Ergebnisse für einige Testinstanzen sogar verbessert. Leider werden keine Rechenzeiten angegeben. Das Paper ist jedoch klar strukturiert und enthält viele Beispiele und Illustrationen, die zeigen, wie der Algorithmus arbeitet. Ferner können die genetischen Operatoren in modifizierter Form auch in dieser Arbeit verwendet werden. Das sechste Paper wurde von Mauri und Lorena (2006) geschrieben und beschreibt, wie das Dial-A-Ride Problem mittels einer Distributions- und Programmierheuristik und einer Metaheuristik, dem Simulated Annealing Verfahren, gelöst werden kann. Dabei wurde ein Umordnungs-, ein Austausch- und Umverteilungsoperator zur Konstruktion einer neuen Lösung aus einer aktuellen Lösung verwendet, um möglichst vielfältige Lösungen zu generieren. Dabei zeigen die Ergebnisse, dass die Vorgehensweise robust ist und die Ergebnisse aus zwei anderen wissenschaftlichen Arbeiten (Cordeau und Laporte (2003 b), Bergvinsdottir (2004)) bei einer geringeren Rechenzeit zum großen Teil verbessert werden können. Für diese Arbeit sind dabei vor allem die Distributions- und Programmierheuristik und der Austausch- und Umverteilungsoperator von Interesse. In der obigen Tabelle wurde nochmals zusammengefasst, welche Ideen aus den einzelnen

Tabelle 1: Ideen aus den vorgestellten Arbeiten, die für die vorliegende Arbeit relevant sind.

Arbeit von:	Übernommene Ideen
Jih et al.	Konstruktion der Zeitfenster
Baugh et al.	TSPTW ist NP-hart, Cluster-first-Route-second Ansatz
Cordeau und Laporte	Programmierheuristik, Tabu-Suche
Jih et al.	Genetischer Algorithmus
Pereira et al.	Genetischer Algorithmus und dessen Verfeinerung
Mauri und Lorena	Distributionsheuristik, Austausch- und Umverteilungsoperator

Arbeiten für die vorliegende Arbeit übernommen werden.

## 2.8 Optimierungsaufgaben

Im Folgenden wird erläutert, wie mehrere Zielgrößen simultan optimiert werden können, eine in technischen Wissenschaften oftmals auftretende Problemstellung. Die obige Erntekette erfordert eine gleichzeitige Optimierung mehrerer Zielgrößen. Man spricht hierbei von Mehrzieloptimierung. In der Mehrzieloptimierung werden also mehrere Zielfunktionen simultan optimiert, was sich mathematisch wie folgt beschreiben lässt:

$$\text{Minimiere } f : \mathbb{R}^{m \in \mathbb{N}} \rightarrow \mathbb{R}^{n \in \mathbb{N}}, f(x) := \begin{bmatrix} f_1(x) \\ \vdots \\ f_n(x) \end{bmatrix},$$

wobei  $f_i(x), i = 1, \dots, n$  die einzelnen Zielfunktionen repräsentieren. Im Allgemeinen besitzen die  $n$  verschiedenen Zielfunktionen verschiedene Minimalstellen, weshalb das Auffinden einer passenden Stelle  $x^*$  erforderlich ist, die die Minimierungsaufgabe möglichst gut löst. Dabei kann der Optimierungskalkül der mehrdimensionalen skalaren Differentialrechnung nicht direkt verwendet werden. Stattdessen wird der Begriff der Pareto-Optimalität eingeführt. Eine Stelle  $x^*$  heißt Pareto-optimal, wenn alle anderen  $x$  einen höheren Zielfunktionswert für mindestens eine der  $n$  Zielfunktionen  $f_1(x), \dots, f_n(x)$  haben und darüber hinaus nicht besser als  $x^*$  sind. Da diese Definition relativ unbefriedigend ist, sind ausgeklügelte Algorithmen erforderlich (vgl. Bar-Bones Multiobjective PSO-Verfahren), um ein möglichst gutes Pareto-Optimum zu bestimmen. Deshalb werden die einzelnen Zielfunktionen  $f_1(x), \dots, f_n(x)$  oftmals auch mit positiven Gewichten multipliziert und anschließend sukzessive addiert, wobei eine skalare Zielfunktion der Bauart

$$\sum_{i=1}^n w_i f_i(x), w_i > 0, i = 1, \dots, n$$

entsteht. Die Optimalstelle dieser Zielfunktion ist dabei ein Pareto-Optimum für  $f$  (Miettinen (1999)), das im Allgemeinen von guter Qualität ist, da die Selektion der Gewichte  $w_i$  von der Wichtigkeit der einzelnen Zielfunktionen  $f_1(x), \dots, f_n(x)$  abhängt, die wiederum vom Benutzer festgelegt wird.

Es gibt auch noch andere Möglichkeiten, die Funktion  $f$  zu minimieren. Dabei kommt manchmal die Mulilevel-Programmierung zum Einsatz. In der Multilevel-Programmierung werden die Zielfunktionen  $f_1(x), \dots, f_n(x)$  nach ihrer Wichtigkeit geordnet. Dann werden

zuerst die Minimalstellen für die Wichtigste der Zielfunktionen  $f_1(x), \dots, f_n(x)$  gesucht. Unter diesen Minimalstellen werden dann die Minimalstellen für die Zweitwichtigste der Zielfunktionen  $f_1(x), \dots, f_n(x)$  gesucht. Dieses Verfahren wird nun solange fortgesetzt, bis alle Zielfunktionen  $f_1(x), \dots, f_n(x)$  minimiert sind.

## 2.9 Fundierung von Modellierungstechniken

In diesem Abschnitt werden Techniken und Denkmuster vorgestellt, die zu einer strukturierten Vorgehensweise zum Umgang mit Indikatorvariablen anleiten. Gegeben sei dazu eine diskrete Variable  $x \geq 0$ . Eine 0/1-Indikator-Variablen  $y$  wird eingeführt, um anzuzeigen, ob  $x > 0$  oder  $x = 0$  ist. Zwei verschiedene Forderungen F1 und F2 sind denkbar:

$$\text{F1: } x > 0 \Rightarrow y = 1, \text{ F2: } y = 1 \Rightarrow x > 0.$$

Es lässt sich nun zeigen:

**Satz 1 (Indikator für die Eigenschaft einer diskreten Variablen und Minimum zweier Variablen):** Es sei

$$M := \max\{x_1, \dots, x_n; x_1, \dots, x_n \geq 0\},$$

$$m := \min\{x_1, \dots, x_n; x_1, \dots, x_n > 0\}, n \in \mathbb{N}.$$

Dann gilt für  $i \in \{1, \dots, n\}$  mit einer 0/1-Indikator-Variablen  $y$ :

$$(a) (x_i > 0 \Rightarrow y = 1) \Leftrightarrow x_i \leq My, (b) (y = 1 \Rightarrow x_i > 0) \Leftrightarrow x_i \geq my.$$

Ferner sei  $M_1 := x_1 - x_2$  für  $x_1 \geq x_2$ ,  $M_2 := x_2 - x_1$  für  $x_2 \geq x_1$ . Dann gilt mit einer 0/1-Indikator-Variablen  $y$ :

$$(c) z = \min\{x_1, x_2\} \Leftrightarrow z \leq x_1, z \leq x_2, x_1 - z \leq M_1(1 - y), x_2 - z \leq M_2y.$$

*Beweis.* (a) Es gelte zunächst die linke Seite der Äquivalenz. Dann ist  $0 < x_i \stackrel{\text{Def.}}{\leq} M$  und  $y = 1$ . Angenommen es gelte  $x_i > My$ . Dann wäre  $x_i > M$ , ein Widerspruch. Es sei nun die Ungleichung aus (a) auf der rechten Seite der Äquivalenz erfüllt und es gelte  $x_i > 0$ . Dann ist  $0 < x_i \leq My$ , was  $y = 1$  zur Folge hat.

(b) Es gelte zunächst die linke Seite der Äquivalenz. Dann ist  $y = 1$  und es folgt mit  $0 < \stackrel{\text{Def.}}{m}$  und  $m \stackrel{\text{Def.}}{\leq} x_i$  die Ungleichung  $ym \leq x_i$ . Es seien nun die Ungleichung aus (b) auf der rechten Seite der Äquivalenz erfüllt und es gelte  $y = 1$ . Da  $m \stackrel{\text{Def.}}{>} 0$  ist, folgt  $x_i > 0$ .

Durch die rechten Seiten aus (a) und (b) wird nun die Äquivalenz

$$x_i > 0 \Leftrightarrow y = 1$$

für alle  $i \in \{1, \dots, n\}$  erfüllt.

(c) Es gelte zunächst die rechte Seite der Äquivalenz. Ist  $y = 1$ , so folgt aus  $x_1 - z \leq M_1(1 - y)$  die Ungleichung  $x_1 \leq z$ .

Mit  $z \leq x_1$  folgt  $z = x_1$ , was  $M_2 \geq x_2 - z = x_2 - x_1 \geq M_2 \geq 0$ , also  $x_2 \geq z$  impliziert. Es folgt  $z = \min\{x_1, x_2\}$ . Ist  $y = 0$ , so folgt aus  $x_2 - z \leq M_2 y$  die Ungleichung  $x_2 \leq z$ . Mit  $z \leq x_2$  folgt  $z = x_2$ , was  $M_1 \geq x_1 - z = x_1 - x_2 \geq M_1 \geq 0$ , also  $x_1 \geq z$  impliziert. Es folgt  $z = \min\{x_1, x_2\}$ .

Es gelte nun die linke Seite der Äquivalenz. Ist  $z = \min\{x_1, x_2\}$ , so folgt  $z \leq x_1, z \leq x_2$ . Ist nun  $z = x_1$ , so folgt  $x_1 \leq z$ , also  $x_1 - z \leq 0$ , also  $x_1 - z \leq M(1 - y), y = 1$ . Ferner gilt  $x_2 - z = x_2 - x_1 \leq M_2 y, y = 1$ . Gilt  $z = x_2$ , so folgt  $x_2 \leq z$ , also  $x_2 - z \leq 0$ , also  $x_2 - z \leq M y, y = 0$ . Ferner gilt  $x_1 - z = x_1 - x_2 \leq M_1 = x_1 - x_2 \leq M_1(1 - y), y = 0$ .  $\square$

### 3 Zielstellung

In diesem Abschnitt wird die Erntekette aus Abschnitt 1 mittels eines reell kodierten nicht glatten nichtlinearen gemischt-ganzzahligen Optimierungsproblems mathematisch modelliert, wobei das mathematische Modell genau beschrieben wird. Dabei wird für die Ernteketten zuerst eine Zielfunktion, die im Wesentlichen zur Minimierung der Gesamttransportkosten (Fahrzeiten, Transportzeiten des Häckselguts, Routendauern, Nichtbeladung der Fahrzeuge, Anzahl der Fahrzeuge aus einem vorgegebenem Fahrzeugpool) und der Stillstandszeiten des Feldhäckslers und der Fahrzeuge dient, aufgestellt und dann durch entsprechende Nebenbedingungen ergänzt. Die Nebenbedingungen repräsentieren dabei im Wesentlichen das Wegenetz, den Fahrzeugpool und die Abwicklung der Serviceaufträge. Da die Zielfunktion mathematische Ausdrücke der Bauart  $\max\{0, \cdot\}$  und ganzzahlige Variablen enthält, die Nebenbedingungen zum Teil Nichtlinearitäten enthalten und die Modellierung zunächst reell erfolgt, liegt für die Erntekette aus Abschnitt 1 ein reell kodiertes nicht glattes nichtlineares gemischt-ganzzahliges Optimierungsproblem vor. Bevor jedoch mit der Modellierung und der Beschreibung der einzelnen Optimierungsvariablen begonnen werden kann, müssen zuerst die einzelnen Optimierungsziele beschrieben werden, die zur Modellierung der Erntekette erforderlich sind. Dazu wird der Begriff der Kosten betrachtet. Die Kosten sind für die traditionelle Maiserntekette, wie in 2.8.1 beschrieben, gegeben durch skalare Zielfunktionen  $f_1(x), \dots, f_n(x), n \in \mathbb{N}$ . Diese Zielfunktionen repräsentieren in dieser Arbeit die Fahrkosten, die Anzahl der benutzten Fahrzeuge, die Gesamtfahrzeit der einzelnen Fahrzeuge, die Transportzeiten des Häckselguts, die Wartezeiten der Fahrzeuge am Schlag und/oder Silo, einen Strafterm über das Nichteinhalten vorgegebener Gesamtfahrzeiten der einzelnen Fahrzeuge, einen Strafterm für das Nichteinhalten vorgegebener maximaler Transportzeiten des Häckselguts und Strafterme für das Nichteinhalten optimaler Servicebeginnzeiten am Schlag und Silo. Die Kosten werden, wie in 2.8.1 erläutert, mit positiven Gewichten, die zur Steuerung der Optimierung dienen, multipliziert und addiert, wobei eine skalare Zielfunktion entsteht, die alle Kosten entsprechend der Wahl der Gewichte berücksichtigt. Der letzte Schritt definiert zugleich die in der Zielfunktion explizit auftretenden Optimierungsvariablen, sodass jetzt mit der Modellierung und der Beschreibung der einzelnen Optimierungsvariablen der Erntekette begonnen werden kann.

#### 3.1 Mathematische Beschreibung einer traditionellen Maiserntekette

Wie soeben erwähnt, ist die Zielfunktion für den Transportkreislauf eine gewichtete Summe über die Fahrkosten (1), die Anzahl der benutzten Fahrzeuge (2), die Gesamtfahrzeit der einzelnen Fahrzeuge (3), die Transportzeiten des Häckselguts (4), die Wartezeiten der Fahrzeuge am Schlag und Silo (5), einen Strafterm über das Nichteinhalten vorgegebener Gesamtfahrzeiten der einzelnen Fahrzeuge (6) und Strafterme für das Nichteinhalten optimaler Servicebeginnzeiten am Schlag und Silo (9), (10). Es seien dazu  $n \in \mathbb{N}, \omega_0, \dots, \omega_4, \beta_0, \dots, \beta_3 \geq 0$  reelle Gewichtungparameter,  $K$  die Menge der Fahrzeuge,  $S := \{1, n+1, 2, n+2, \dots, n, 2n\}$  die Menge der Serviceaufträge und  $D := \{0, 2n+1\}$  die Menge der virtuellen Serviceaufträge. Dabei repräsentieren 0 das Wiegen der unbeladenen Fahrzeuge am Silo zu Beginn des Häckselprozesses und  $2n+1$  ein Verharren am Silo nach Beendigung des letzten Serviceauftrags - deshalb kann das Silo auch als Depot interpretiert werden -,  $1, 2, \dots, n$  die Beladungen am Schlag und  $n+1, n+2, \dots, 2n$  die Entladungen

am Silo. Mit diesen Bezeichnungen ergibt sich der Zielfunktionsterm in Abhängigkeit von  $n$  zu:

$$\omega_0 \sum_{k \in K} \sum_{i=1}^n (c_{in+i}^k x_{in+i}^k + \sum_{j=1, j>i}^n c_{n+ij}^k x_{n+ij}^k) + \omega_0 \sum_{k \in K} \sum_{i=1}^n c_{0i}^k x_{0i}^k \quad (1)$$

$$+ \omega_0 \sum_{k \in K} \sum_{i=1}^n c_{n+i2n+1}^k (:= 0) x_{n+i2n+1}^k \quad (2)$$

$$+ \omega_1 m \quad (3)$$

$$+ \omega_2 \sum_{k \in K} \sum_{i=1}^n (B_{2n+1}^k x_{n+i2n+1}^k - D_0^k x_{0i}^k) \quad (4)$$

$$+ \omega_3 \sum_{i=1}^n R_i \quad (5)$$

$$+ \omega_4 \sum_{i=1}^n W_i \quad (6)$$

$$+ \beta_0 \sum_{k \in K} \sum_{i=1}^n \max\{0, (B_{2n+1}^k x_{i2n+1}^k - D_0^k x_{0i}^k) - T_k\} \quad (7)$$

$$+ \beta_1 \sum_{i=1}^n W_{n+i} \quad (8)$$

$$+ \beta_2 \sum_{i=1}^n \max\{0, E_{n+i} - B_{n+i}\}, \quad (9)$$

$$+ \beta_3 \sum_{i=1}^n \max\{0, B_{n+i} - L_{n+i}\}. \quad (10)$$

Dabei werden die Terme (9) und (10) zunächst nicht verwendet. Die Optimierungsvariablen der Zielfunktion ergeben sich zu:

$$x_{in+i}^k = \begin{cases} 1, & \text{falls das Transportfahrzeug } k \text{ die Beladung } i \text{ und die Entladung } n+i \text{ wählt} \\ 0, & \text{sonst,} \end{cases}$$

$$x_{0i}^k = \begin{cases} 1, & \text{falls das Transportfahrzeug } k \text{ die Depotabfahrt und die Beladung } i \text{ wählt} \\ 0, & \text{sonst,} \end{cases}$$

$$x_{n+ij, j>i}^k = \begin{cases} 1, & \text{falls das Transportfahrzeug } k \text{ die Entladung } n+i \text{ und die Beladung } j \\ & > i \text{ wählt} \\ 0, & \text{sonst,} \end{cases}$$

$$x_{n+i2n+1}^k = \begin{cases} 1, & \text{falls das Transportfahrzeug } k \text{ die Entladung } n+i \text{ und das Verharren am Silo} \\ & \text{wählt} \\ 0, & \text{sonst,} \end{cases}$$

$m$  Anzahl der benutzten Fahrzeuge,

$D_0$  Abfahrtszeit des Fahrzeugs  $k$  vom Depot,

$B_{2n+1}^k$  Ankunftszeit des Fahrzeugs  $k$  am Depot,

$R_i$  Transportzeit des Häckselguts induziert durch den  $i$ -ten Serviceauftrag, die durch die nachfolgenden Nebenbedingungen einem Transportfahrzeug zugeordnet wird,  
 $W_i$  Wartezeit bei der  $i$ -ten Beladung,  
 $W_{n+i}$  Wartezeit bei der  $n + i$ -ten Entladung,  
 $B_i$  Servicebeginnzeit bei der  $i$ -ten Beladung, die durch die nachfolgenden Nebenbedingungen einem Transportfahrzeug zugeordnet wird,  
 $B_{n+i}$  Servicebeginnzeit bei der  $n + i$ -ten Entladung, die durch die nachfolgenden Nebenbedingungen einem Transportfahrzeug zugeordnet wird.

Ferner enthält die Zielfunktion diverse Parameter, die vor der Optimierung fest gewählt werden. Diese sind:

$c_{in+i}^k$  Fahrtkosten für die Beladung  $i$  und die Entladung  $n + i$  des Transportfahrzeugs  $k$ ,  
 $c_{0i}^k$  Fahrtkosten für die Depotabfahrt und die Beladung  $i$  des Transportfahrzeugs  $k$ ,  
 $c_{n+i>j}^k$  Fahrtkosten für die Entladung  $n + i$  und die Beladung  $j > i$  des Transportfahrzeugs  $k$ ,  
 $c_{n+i2n+1}^k$  Fahrtkosten für die Entladung  $n + i$  und die Depotanfahrt des Transportfahrzeugs  $k$ ,  
 $T_k$  Maximal erlaubte Routendauer des Transportfahrzeugs  $k$ ,  
 $Q_k$  Zulässige Beladung des Transportfahrzeugs  $k$ ,  
 $E_i$  Früheste optimale Ankunftszeit für die  $i$ -te Beladung,  
 $E_{n+i}$  Früheste optimale Ankunftszeit für die  $n + i$ -te Entladung,  
 $L_i$  Späteste optimale Ankunftszeit für die  $i$ -te Beladung,  
 $L_{n+i}$  Späteste optimale Ankunftszeit für die  $n + i$ -te Entladung.

Die oben beschriebenen Optimierungsparameter genügen Nebenbedingungen, die zur Auswahl der an der Ernte beteiligten Transportfahrzeuge dienen (11), (12), die Serviceauftragsabwicklung steuern und das Wegenetz repräsentieren (13), (14), (15), (16), (17), die Servicebeginnzeiten miteinander verknüpfen (18), (19), (20), die Be- und Entladung miteinander verknüpfen (21), (22), (23), (24), die impliziten Optimierungsvariablen Ankunfts- und Abfahrtszeiten am Schlag und Silo definieren (25), (26), (27), (28), (29), (30), (31), (32) und (33) die einzelnen Optimierungsvariablen restringieren (34). Diese lauten:

$$\sum_{k \in K} \sum_{i=1}^n x_{0i}^k = m \quad (11)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i=1}^n x_{n+i2n+1}^k = m, \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{0i}^k = 1, \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{n+i2n+1}^k = 1, \forall k \in K, \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{in+i}^k = 1, \forall k \in K, \quad (15)$$

$$\sum_{j=1, j < i}^n x_{n+j}^k - x_{in+i}^k = 0, \forall k \in K, \forall i \in \{1, \dots, n\}, \quad (16)$$

$$x_{in+i}^k - \sum_{j=1, j > i}^n x_{n+ij}^k = 0, \forall k \in K, \forall i \in \{1, \dots, n\}, \quad (17)$$

$$B_i + \sum_{k \in K} s_i^{(k)} x_{in+i}^k + \sum_{k \in K} T_{in+i}^{(k)} x_{in+i}^k + W_{n+i} = B_{n+i}, \forall i \in \{1, \dots, n\},$$

$$s_i^{(k)} := g_i \frac{q_i^k}{P_H} + t_i^{(k)}, t_i^{(k)} \dots \text{Zeitpuffer},$$

$$T_{in+i}^{(k)} := \text{Fahrzeit des Fahrzeugs } k \text{ von } i \text{ nach } n+i, \quad (18)$$

$$\sum_{i=1}^n (B_0^k + s_0^{(k)} (:= \text{Wiegezeit des Fahrzeugs } k) + T_{0i}^{(k)} + W_i) x_{0i}^k = \sum_{i=1}^n B_i x_{0i}^k, \forall k \in K, \quad (19)$$

$$\sum_{i=1}^n B_{n+i} x_{n+i2n+1}^k + \sum_{i=1}^n s_{2n+1}^{(k)} (:= 0) x_{n+i2n+1}^k$$

$$+ \sum_{k \in K} T_{n+i2n+1}^{(k)} (:= 0) x_{n+i2n+1}^k + W_{2n+1} (:= 0) = \sum_{i=1}^n B_{2n+1}^k x_{n+i2n+1}^k, \forall k \in K,$$

$$B_{n+i} + \sum_{k \in K} s_{n+i}^{(k)} x_{n+ij}^k + \sum_{k \in K} T_{n+ij}^{(k)} x_{n+ij}^k + W_j = B_j, \forall i \in \{1, \dots, n\}, \forall j \in \{1, \dots, n\}, j > i,$$

$$s_{n+i}^{(k)} := g_i \frac{q_j^k}{E_F} + t_{n+i}^{(k)}, t_{n+i}^{(k)} \dots$$

$$\text{Zeitpuffer } T_{n+ij}^{(k)} := \text{Fahrzeit des Fahrzeugs } k \text{ von } n+i, \text{ nach } j, j > i, \quad (20)$$

$$Q_i + \sum_{k \in K} g_i q_{n+i}^{(k)} x_{in+i}^k = Q_{n+i}, \forall i \in \{1, \dots, n\}, \quad (21)$$

$$Q_0 + \sum_{i=1}^n q_i^{(k)} x_{0i}^k = \sum_{i=1}^n Q_i x_{0i}^k, \forall k \in K, \quad (22)$$

$$\sum_{i=1}^n Q_{n+i} x_{n+i2n+1}^k + \sum_{i=1}^n q_{2n+1}^{(k)} (:= 0) x_{n+i2n+1}^k = Q_{2n+1}, \forall k \in K, \quad (23)$$

$$Q_{n+i} + \sum_{k \in K} g_i q_j^{(k)} x_{n+ij}^k = Q_j, \forall i \in \{1, \dots, n\}, \forall j \in \{1, \dots, n\}, j > i, \quad (24)$$

$$A_i = (B_i - W_i) \sum_{k \in K} x_{in+i}^k, \forall i \in \{1, \dots, n\}, \quad (25)$$

$$E_i \leq B_i \sum_{k \in K} x_{in+i}^k \leq L_i, \forall i \in \{1, \dots, n\}, \quad (26)$$

$$A_{n+i} = (B_{n+i} - W_{n+i}) \sum_{k \in K} x_{n+ij}^k, \forall i \in \{1, \dots, n\}, \forall j \in \{1, \dots, n\}, j > i, \quad (27)$$

$$\sum_{i=1}^n A_{2n+1}^k x_{n+i2n+1}^k = \sum_{i=1}^n (B_{2n+1}^k - W_{2n+1}^k) x_{n+i2n+1}^k, \forall k \in K, \quad (28)$$

$$D_i = B_i + \sum_{k \in K} s_i^{(k)} x_{in+i}^k, \forall i \in \{1, \dots, n\}, \quad (29)$$

$$D_{n+i} = B_{n+i} + \sum_{k \in K} s_{n+i}^{(k)} x_{n+i,j}^k, \forall i \in \{1, \dots, n\}, \forall j \in \{1, \dots, n\}, j > i, \quad (30)$$

$$\sum_{i=1}^n D_0^k x_{0,i}^k = \sum_{i=1}^n B_0 x_{0,i}^k + \sum_{i=1}^n s_0^{(k)} x_{0,i}^k, \forall k \in K, \quad (31)$$

$$R_i = (B_{n+i} - D_i) \sum_{k \in K} x_{in+i}^k, \forall i \in \{1, \dots, n\}, \quad (32)$$

$$A_0 = D_{2n+1} = Q_0 = Q_{2n+1} = W_0 = 0, \quad (33)$$

Variablenrestriktionen an die einzelnen Optimierungsvariablen

in Form von kompakten Intervallen. (34)

Die Nebenbedingungen definieren ferner weitere Optimierungsvariablen. Das sind:

$A_0$  Optimale Abfahrtszeit am Depot

$A_i$  Optimale Ankunftszeit für die  $i$ -te Beladung, die durch die obigen Nebenbedingungen einem Transportfahrzeug zugeordnet wird,

$A_{n+i}$  Optimale Ankunftszeit für die  $n+i$ -te Entladung, die durch die obigen Nebenbedingungen einem Transportfahrzeug zugeordnet wird,

$A_{2n+1}^k$  Optimale Ankunftszeit eines benutzten Fahrzeugs  $k$  für die Depotanfahrt

$D_i$  Optimale Abfahrtszeit für die  $i$ -te Beladung, die durch die obigen Nebenbedingungen einem Transportfahrzeug zugeordnet wird,

$D_{n+i}$  Optimale Abfahrtszeit für die  $n+i$ -te Entladung, die durch die obigen Nebenbedingungen einem Transportfahrzeug zugeordnet wird,

$D_0^k$  Optimale Abfahrtszeit eines benutzten Fahrzeugs  $k$  für die Depotabfahrt,

$D_{2n+1}$  Optimale Abfahrtszeit vom Depot nach dem Beenden einer Tour,

$Q_0$  Beladung bei der Abfahrt am Depot,

$Q_{2n+1}$  Beladung bei der Ankunft am Depot,

$W_0$  Wartezeit bei der Abfahrt am Depot.

Ferner enthalten die Nebenbedingungen diverse Parameter, die vor der Optimierung fest gewählt werden. Diese sind:

$P_H^{z_i}$  Häckslerleistung zum  $i$ -ten Serviceauftrag,

$E_F^k$  Entladungsfaktor des Transportfahrzeugs  $k$ ,

$q_i^{(k)}$  Zuladung des Transportfahrzeugs  $k$  bei der  $i$ -ten Beladung,

$q_{n+i}^{(k)}$  Entladung des Transportfahrzeugs  $k$  bei der  $i$ -ten Entladung,

$q_{2n+1}^{(k)}$  Entladung des Transportfahrzeugs  $k$  am Depot.

Zur Ermittlung der optimalen frühesten und spätesten Ankunftszeiten für die Schlag- und Siloanfahrten werden weitere Nebenbedingungen benötigt, wobei  $v_1, \dots, v_{|K|}$  die Feldfahrgeschwindigkeiten der Transportfahrzeuge bezeichnen,  $v_H$  die Geschwindigkeit des Feldhäckslers während des Häckselvorgangs,  $v_i^{HT}$  die Geschwindigkeit des Feldhäckslers während des  $i$ -ten Wendemanövers,  $t_i^T$  die  $i$ -te Wendezeit des Feldhäckslers und  $x_G$  den zurückgelegten Gesamtweg des Feldhäckslers nach der Abarbeitung des Feldes bezeichne. Das sind eine Nebenbedingung, die sicherstellt, dass der Feldhäckslers nicht länger häcksel als der Gesamtfahrweg des Feldhäckslers ausmacht (35), Nebenbedingungen zur Bestimmung der Feldfahrzeiten (37), mit denen mittels der Servicezeiten die optimalen frühesten und spätesten Ankunftszeiten für die Schlag- und Siloanfahrten berechnet werden können.

Diese Nebenbedingungen sind von der folgenden Bauart:

$$\begin{aligned}
& \sum_{i=1}^{n-1} \underbrace{\left( v_H \frac{q_i^1 x_{in+i}^1}{P_H^{z_i}} \right)}_{\text{Beladungsweg des ersten Abfuhrgespanns während des } i\text{-ten Serviceauftrages}} \\
& + \dots \\
& + \underbrace{\left( v_H \frac{q_i^{|K|} x_{in+i}^{|K|}}{P_H^{z_i}} \right)}_{\text{Beladungsweg des } |K|\text{-ten Abfuhrgespanns während des } i\text{-ten Serviceauftrages}} \\
& + \sum_{i=1}^n \underbrace{v_{HT}^i t_T^i \sum_{j=2 \vee 3}^q y_j^i}_{\text{Wendeweg des Feldhäckslers am Schlagrand während des } i\text{-ten Serviceauftrages}} + g = x_G, g \geq 0 \quad (35)
\end{aligned}$$

$$\frac{1}{P_H^{z_k}} = \sum_{j=1}^q y_k^j \frac{1}{P_H^j},$$

$$v_{HT}^k := \sum_{j=2 \vee 3}^q y_k^j v_j^{HT},$$

$$t_T^k := \sum_{j=2 \vee 3}^q y_k^j t_j^T,$$

$$\sum_{i=1}^k g_i \left( v_H \frac{q_i^1 x_{in+i}^1}{P_H^{z_i}} + \dots + v_H \frac{q_i^{|K|} x_{in+i}^{|K|}}{P_H^{z_i}} \right) - z_k \leq M y_k, y_k \in \{0, 1\}, k \in \{1, \dots, n\},$$

$$\text{Weglänge}_1 \leq z_k,$$

$$z_k = \sum_{j=1}^q y_k^j \text{Weglänge}_j,$$

$$\sum_{j=1}^q y_k^j = 1,$$

$$y_k^j \in \{0, 1\}$$

$\wedge$  Aufnahme von  $-z_k$  in die Zielfunktion,

$M > 0$  hinreichend groß,

$(\text{Weglänge}_j)_{j=1, \dots, q}$  eine passende Diskretisierung von  $x_G$ ,

$$\sum_{i=1}^k g_i \left( v_H \frac{q_i^1 x_{in+i}^1}{P_H^{z_i}} + \dots + v_H \frac{q_i^{|K|} x_{in+i}^{|K|}}{P_H^{z_i}} \right) - z_k \geq m^* y_k,$$

$$k \in \{1, \dots, n\}, m^* > 0 \text{ hinreichend klein.} \quad (36)$$

Mit den Nebenbedingungen in (36), (37), (38) und (39) wird nun unter Zuhilfenahme von Satz 1 b, c die Position des Feldhäckslers bestimmt. Von dieser Position aus kann für jeden Serviceauftrag der kürzeste Weg, d. h. die kürzeste Fahrzeit für die Feldfahrt von der Straße zum Feldhäckslers bzw. vom Feldhäckslers zurück zur Straße bestimmt werden. Dabei ergibt sich für die  $k$ -te Hinfahrtszeit ( $k \geq 2$ ) eines der Fahrzeuge  $r \in K$  die Formel

$$\min\{\text{Distanz}(\text{Schlagrandknoten}, w_k \mapsto \text{Position}_{w_k} := \sum_{j=1}^q o_j^k \text{Position}_j) \left( \sum_{r=1}^{|K|} \frac{1}{v_r} x_{kn+k}^r \right) + (w_k - c_k) \left( \sum_{r=1}^{|K|} \frac{1}{v_r} x_{kn+k}^r \right) + T_k^r,$$

$$\text{Distanz}(\text{Schlagrandknoten}, z_k \mapsto \text{Position}_{z_k} := \sum_{j=1}^q y_k^j \text{Position}_j) \left( \sum_{r=1}^{|K|} \frac{1}{v_r} x_{kn+k}^r \right) + c_k \left( \sum_{r=1}^{|K|} \frac{1}{v_r} x_{kn+k}^r \right) + t_k^r\},$$

$w_k \geq z_k + \epsilon, \epsilon > 0$  passend,

$$w_k = \sum_{j=1}^q o_j^k \text{Weglänge}_j,$$

$$\sum_{j=1}^q o_j^k = 1, o_j^k \in \{0, 1\}$$

$\wedge$  Aufnahme von  $+ w_k$  in die Zielfunktion,

$$c_k := \sum_{i=1}^k g_i \left( v_H \frac{q_i^1 x_{in+i}^1}{P_H^{z_i}} \dots + v_H \frac{q_i^{|K|} x_{in+i}^{|K|}}{P_H^{z_i}} \right) - z_k,$$

$$T_k^r, t_k^r := k\text{-te Wendezeit des } r\text{-ten Transportfahrzeugs am Feldhäcksler}, \quad (37)$$

die zugleich der  $k$ -ten Rückfahrtszeit eines der Fahrzeuge  $1, \dots, |K|$  entspricht. Der optimale Feldfahrweg für die Hinfahrt ergibt sich sodann aus der Bedingung

$$\min\{\text{Distanz}(\text{Schlagrandknoten}, w_k \mapsto \text{Position}_{w_k} := \sum_{j=1}^q o_j^k \text{Position}_j) + d_k$$

$$+ \sum_{r=1}^{|K|} S_k^r x_{kn+k}^r, h_k\},$$

$$h_k := \text{Distanz}(\text{Schlagrandknoten}, z_k \mapsto \text{Position}_{z_k} = \sum_{j=1}^q y_k^j \text{Position}_j) + w_k - d_k$$

$$+ \sum_{r=1}^{|K|} s_k^r x_{kn+k}^r$$

$$S_k^r, s_k^r := k\text{-te Wendestrecke des } r\text{-ten Transportfahrzeugs am Feldhäcksler}, \quad (38)$$

wobei  $d_k$  durch die Formel

$$w_k - \left( \sum_{i=1}^k g_i \left( v_H \frac{q_i^1 x_{in+i}^1}{P_H^{z_i}} + \dots + v_H \frac{q_i^{|K|} x_{in+i}^{|K|}}{P_H^{z_i}} \right) - z_k \right),$$

$$g_i = 1, i = 1, \dots, n-1,$$

$$g_n = \frac{g}{v_H \frac{q_n^1 x_{n2n}^1}{P_H^{z_n}} + \dots + v_H \frac{q_n^{|K|} x_{n2n}^{|K|}}{P_H^{z_n}}} \leq 1 \quad (39)$$

gegeben ist. Der Feldfahrweg für die  $k$ -te Hinfahrt entspricht dabei dem Feldfahrweg für die  $k$ -te Rückfahrt. Das Einbinden der Bedingung erfolgt nach Satz 1 c durch Ergänzen der Nebenbedingungen um

$$f_k \leq \text{Distanz}(\text{Schlagrandknoten}, w_k \mapsto \text{Position}_{w_k} = \sum_{j=1}^q o_j^k \text{Position}_j) + d_k, \quad (40)$$

$$f_k \leq h_k, \quad (41)$$

$$\begin{aligned} & (\text{Distanz}(\text{Schlagrandknoten}, w_k \mapsto \text{Position}_{w_k} = \sum_{j=1}^q o_j^k \text{Position}_j) + d_k) - f_k \\ & \leq M(1 - i_k), \end{aligned} \quad (42)$$

$$h_k - f_k \leq M i_k, i_k \in \{0, 1\}. \quad (43)$$

Ferner kann durch Hinzuaddieren der Ausdrücke

$$\sum_{i=1}^k g_i \underbrace{\left( \frac{q_i^1 x_{in+i}^1}{P_H^{z_i}} + \dots + \frac{q_i^{|K|} x_{in+i}^{|K|}}{P_H^{z_i}} \right)}_{\text{Summe der möglichen Servicezeiten bei der } i\text{-ten Schlaganfahrt}} + t_T^i \sum_{j=2 \vee 3}^q y_i^j \quad (44)$$

zu der Startzeit des Häckselprozesses die früheste optimale Ankunftszeit für die  $k$ -te Schlaganfahrt bestimmt werden, woraus sich durch Hinzuaddieren der Fahrzeit vom Feldhäcksler zum Silo, die sich wiederum aus der Feldfahrzeit vom Feldhäcksler zur Straße und der Straßenfahrzeit zusammensetzt, die früheste optimale Ankunftszeit für die  $k$ -te Siloanfahrt ergibt. Ist die Siloverdichtungskapazität kleiner als der Massenstrom des Häckselguts pro Stunde, so verzögert sich die Abfahrt der einzelnen Fahrzeuge anteilmäßig nach ihren Beladungskapazitäten, die dabei zeitlich auf den Massestrom umgeschlagen werden, der pro Stunde nicht verdichtet werden kann.

$$\begin{aligned} b_k &= (D_{n+1} - B_{n+1})x_{1n+1}^1 + \dots + (D_{n+1} - B_{n+1})x_{1n+1}^{|K|} \\ &+ \sum_{i=2}^k ((D_{n+i} - B_{n+i} + D_i - D_{i-1})x_{in+i}^1 + \dots + (D_{n+i} - B_{n+i} + D_i - D_{i-1})x_{in+i}^{|K|}), \end{aligned}$$

$$b_k \geq 0,$$

$$\frac{\sum_{i=1}^{k-1} (q_i^1 x_{in+i}^1 + \dots + q_i^{|K|} x_{in+i}^{|K|}) + (q_k^1 x_{kn+k}^1 + \dots + q_k^{|K|} x_{kn+k}^{|K|}) - v_k}{b_k}$$

– Siloverdichtungskapazität = 0,

$$a_k \geq v_k, a_k \geq 0, v_k - a_k \leq M(1 - j_k), -a_k \leq M j_k, j_k \in \{0, 1\}$$

$\wedge$  Aufnahme von  $+ a_k$  in die Zielfunktion,

$$t_k^{(u)} = a_k \frac{q_k^u}{\sum_{i=1}^k (q_i^1 x_{in+i}^1 + \dots + q_i^{|K|} x_{in+i}^{|K|})}, u \in \{1, \dots, |K|\}. \quad (45)$$

Um nun das Problem vollständig lösen zu können, muss noch die Anzahl der Serviceaufträge  $S_{\max}$  und  $S_{\min}$ , die notwendig ist, wenn nur das Transportfahrzeug mit der geringsten Beladungskapazität und nur der größten Beladungskapazität verwendet wird, bestimmt werden. Sodann muss die obige Optimierungsaufgabe für jedes  $n$  mit  $S_{\min} \leq n \leq S_{\max}$  gelöst werden, woraus letztendlich eine exakte Lösung für den Transportkreislauf resultiert. Dies geschieht durch Einführen binärer Variablen  $s_1, \dots, s_{S_{\max}-S_{\min}+1}$  und Aufnahme der Bedingung  $s_1 + \dots + s_{S_{\max}-S_{\min}+1} = 1$  in das Optimierungsproblem. Dabei sind die binären Variablen in die Zielfunktion und die Nebenbedingungen des Optimierungsproblems entsprechend einzuarbeiten.

Insgesamt resultiert ein gemischt ganzzahliges nichtlineares Optimierungsproblem mit optionalen Nebenbedingungen (9) und (10) - optional bedeutet, dass diese Nebenbedingungen zunächst nicht verwendet werden -, das genau dann lösbar ist, wenn der Zulässigkeitsbereich der dazugehörigen Problem Instanz mit minimalen Kostenkoeffizienten nicht leer ist. Zum Beweis dieser Aussage siehe den Abschnitt Material und Methoden. Da es viele Problem Instanzen mit minimalen Kostenkoeffizienten und leerem Zulässigkeitsbereich gibt, werden meistens die optionalen Nebenbedingungen (9) und (10) verwendet und die Nebenbedingung (26) weggelassen. Eine Problem Instanz mit minimalen Kostenkoeffizienten und leerem Zulässigkeitsbereich ist zum Beispiel gegeben durch:

Ein Feldhäcksler häckselt 4 Fuhren an Häckselgut, die von 2 homogenen Abfuhrgespannen vom Schlag zum Silo transportiert werden müssen. Er benötigt dabei für eine für die Abfuhrgespanne passende Fuhre 8 Minuten. Die Fahrzeit je Abfuhrgespanne beträgt jedoch vom Silo zum Schlag und vice versa  $t := 40$  Minuten.

**Satz 2 a:** In dieser Problem Instanz kann die obere Ungleichung der Doppelungleichung (26) im Allgemeinen nicht erfüllt werden.

*Beweis.* Angenommen die obere Ungleichung der Doppelungleichung (26) kann im Allgemeinen erfüllt werden. Häckselt sodann der Feldhäcksler ohne Unterbrechung, so muss immer ein Abfuhrgespann zum Abtransport des Häckselguts am Feldhäcksler bereit stehen. Da der Feldhäcksler aber nach der zweiten Fuhre mindestens 72 Minuten warten muss, bis die dritte Fuhre an Häckselgut durch ein Abfuhrgespann abtransportiert werden kann, ergibt sich ein Widerspruch zur Tatsache, dass immer ein Abfuhrgespann zum Abtransport des Häckselguts am Schlag bereitsteht. Deshalb kann die obere Ungleichung der Doppelungleichung (26) für die obige Problem Instanz im Allgemeinen nicht erfüllt werden.  $\square$

**Satz 2 b:** Das Optimierungsproblem aus Abschnitt 3 und alle anderen Optimierungsprobleme, die die Nebenbedingung (26) enthalten, sind im Allgemeinen nicht lösbar.

*Beweis.* Die Behauptung folgt aus Satz 2 a.  $\square$

**Satz 2 c:** Jede Instanz des Optimierungsproblem aus Abschnitt 3 mit optionalen Zielfunktionstermen und fehlender Nebenbedingung (26) besitzt einen nichtleeren Zulässigkeitsbereich, falls die Optimierungsvariablen nicht eingeschränkt werden.

*Beweis.* Genaues Hinsehen auf alle anderen Nebenbedingungen zeigt, dass sie keinen Einschränkungen unterliegen.  $\square$

**Satz 2 d:** Jede Instanz des Optimierungsproblem aus Abschnitt 3 mit optionalen Zielfunktionstermen und fehlender Nebenbedingung (26) besitzt eine Optimallösung, falls die Optimierungsvariablen nicht eingeschränkt werden.

*Beweis.* Wegen Satz 2 c besitzen sie nach dem Beweis zu Satz 6 a eine Optimallösung.  $\square$

Der Nachteil an den Lösungen aus Satz 2 d ist, dass sie aufgrund fehlender Variablenrestriktionen von sehr schlechter Qualität, sogar für  $t \rightarrow \infty$  in der obigen Problem Instanz von beliebig schlechter Qualität sein können. Ferner ist der Lösungsraum der Problem Instanzen unendlich.

Werden sie allerdings in kombinatorische Problem Instanzen übergeführt, so ist deren Lösungsraum endlich. Sie können deshalb mittels evolutionärer Algorithmen effizient gelöst werden. Alternativ dazu können die gemischt ganzzahligen nichtlinearen Problem Instanzen mithilfe der Äquivalenz  $y(x + \dots) \leq (z + \dots) \Leftrightarrow (x + \dots) - M(1 - y) \leq (z + \dots)$ ,  $y \in \{0, 1\}$ ,  $x, z$  beliebig,  $M > 0$  groß genug und konstant, in gemischt ganzzahlige lineare Problem Instanzen transformiert werden und mit einem MILP-Solver gelöst werden. Dabei müssen die freien Variablen durch Differenzen nicht negativer Variablen ersetzt werden. Für kleine Schläge mit 5 Abfuhrgepannen und 20 Abfahren ergibt das ca. 2850 Ungleichungsnebenbedingungen, 3600 ganzzahlige und 1130 reelle Optimierungsvariablen. Im Folgenden liegt deshalb der Fokus wegen des endlichen Lösungsraums der kombinatorischen Problem Instanzen auf der Entwicklung evolutionärer Algorithmen.

## 4 Material und Methoden

Nachfolgend wird das modifizierte Optimierungsproblem des letzten Abschnitts mittels vierer Metaheuristiken gelöst und der dabei verwendete Optimierungskalkül im Detail erläutert.

### 4.1 Präliminarien

In diesem Abschnitt werden die mathematischen Hilfsmittel für die Entwicklung der Optimierer bereitgestellt.

#### 4.1.1 Lösbarkeit von reellen Optimierungsaufgaben

Für eine reelle Optimierungsaufgabe ist oftmals vorab zu entscheiden, ob sie globale Optima besitzt. Dazu der folgende Kalkül:

**Satz 3 (Reelle Optimierungsaufgaben):**

**(a)(Stetigkeit der Restriktion einer stetigen Funktion):** Gegeben sei eine im metrischen Sinne stetige Funktion  $f : \mathbb{R}^{n \in \mathbb{N}} \rightarrow \mathbb{R}$ . Dann ist die Restriktion von  $f$  auf jede Teilmenge  $T$  des  $\mathbb{R}^{n \in \mathbb{N}}$  stetig.

*Beweis.* Trivial. □

**(b) (Definition: Kompakte Menge):** Eine Teilmenge  $E$  des metrischen Raumes  $T$  ist genau dann kompakt, wenn jede Folge aus  $E$  eine Teilfolge enthält, die gegen ein Element von  $E$  konvergiert.

**(c)(Optima stetiger Funktionen mit kompaktem Definitionsbereich):** Gegeben sei eine kompakte Teilmenge  $E$  eines metrischen Raumes  $T \subseteq \mathbb{R}^{n \in \mathbb{N}}$  und eine stetige Funktion  $f : T \rightarrow \mathbb{R}$ . Dann besitzt  $f$  auf  $E$  ein Maximum und Minimum.

*Beweis.* Da nach (a) die Restriktion von  $f$  auf  $E$  stetig und  $E$  kompakt ist, ist  $f(E)$  nach (b) eine kompakte Teilmenge von  $\mathbb{R}$  und somit nach Definition der Kompaktheit auch abgeschlossen und beschränkt.  $f(E)$  besitzt also ein kleinstes und größtes Element. □

**(d) (Urbild abgeschlossener Mengen unter stetigen Abbildungen):** Das Urbild einer abgeschlossenen Menge  $A \subseteq \mathbb{R}$  unter einer im metrischen Sinne stetigen  $f : T \subseteq \mathbb{R}^{n \in \mathbb{N}} \rightarrow \mathbb{R}$  Abbildung ist abgeschlossen.

*Beweis.* Trivial. □

**(e) (Vereinigung und Schnitt endlich vieler abgeschlossener Mengen):** Die Vereinigung und der Schnitt endlich vieler abgeschlossener Teilmengen eines metrischen Raumes  $T \subseteq \mathbb{R}^{n \in \mathbb{N}}$  ist abgeschlossen.

*Beweis.* Trivial. □

**(f) (Ein Satz von Weierstraß):** Eine unendliche beschränkte Teilmenge des  $\mathbb{R}^{n \in \mathbb{N}}$  besitzt einen Häufungspunkt.

*Beweis.* Trivial. □

**(g) (Kompakte Menge):** Ist  $T \subseteq \mathbb{R}^{n \in \mathbb{N}}$  ein metrischer Raum und ist  $E \subseteq T$  unendlich, beschränkt und abgeschlossen, so ist  $E$  kompakt.

*Beweis.* Sei  $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$  eine Folge in  $E$  mit o. B. d. A.  $|A := \{a_n \in E; n \in \mathbb{N}\}| = \infty$ . Da  $E$  beschränkt ist, ist auch  $A$  beschränkt, also besitzt  $A$  nach (f) einen Häufungspunkt  $x$ . Nach der Definition eines Häufungspunkts existiert eine Teilfolge von  $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$ , die gegen  $x$  konvergiert. Da  $E$  abgeschlossen ist, gilt  $x \in E$ . Somit enthält jede Folge von  $E$  eine Teilfolge, die gegen ein Element von  $E$  konvergiert - für  $|A| < \infty$  ist die letzte Aussage klar, denn die obige Folge ist dann eine Funktion von den natürlichen Zahlen in den  $\mathbb{R}^{n \in \mathbb{N}}$  mit endlichem Bild, was nach dem Schubfachprinzip impliziert, dass mindestens ein Element des Bildes unendlich oft auftritt -, was zeigt, dass  $E$  nach (b) kompakt ist.  $\square$

**(h) (Kompakte Menge):** Ist  $T \subseteq \mathbb{R}^{n \in \mathbb{N}}$  ein metrischer Raum und ist  $E \subseteq T$  endlich, so ist  $E$  kompakt.

*Beweis.* Trivial.  $\square$

**(i) (Kreuzprodukt kompakter Mengen: Spezialfall des Satzes von Tychonoff):** Ist  $T \subseteq \mathbb{R}^{n \in \mathbb{N}}$  ein metrischer Raum mit Metrik  $d$  und sind  $E_1, E_2 \subseteq T$  kompakt, so ist  $E_1 \times E_2$  bezüglich der Metrik  $d'((a, b), (c, d)) := d(a, b) + d(c, d)$  kompakt.

*Beweis.* Trivial.  $\square$

**(j) (Abgeschlossene Teilmengen kompakter Mengen):** Ist  $T \subseteq \mathbb{R}^{n \in \mathbb{N}}$  ein kompakter metrischer Raum und  $E \subseteq T$  abgeschlossen, so ist auch  $E$  kompakt.

*Beweis.* Trivial.  $\square$

#### 4.1.2 Etwas Komplexitätstheorie: NP-harte Probleme

Nachfolgend werden die Hilfsmittel zur Untersuchung der Komplexität von Optimierungsproblemen bereitgestellt. Formale Sprachen sind das grundlegende Konzept von Informationen.

**Definition 1:** Ein (endliches) Alphabet  $\Sigma = \{a, b, \dots\}$  ist eine (endliche) Menge von Symbolen (Zeichen). Eine endliche Folge  $w = a_1 \cdot \dots \cdot a_n$  von Symbolen  $a_i \in \Sigma$  heißt Wort (Zeichenkette) über  $\Sigma$ . Die Zahl ihrer Folgenglieder heißt die Länge des Wortes, in Zeichen:  $|w| = |a_1 \cdot \dots \cdot a_n| = n$ . Die Zahl der Vorkommen eines bestimmten Symbolen  $a \in \Sigma$  wird mit  $|w|_a$  bezeichnet. Das Wort der Länge 0 wird mit  $\epsilon$  bezeichnet und heißt auch das leere Wort. Mit  $\Sigma^*$  wird die Menge aller Wörter über dem Alphabet  $\Sigma$  bezeichnet.

**Beispiel 1:** Sei  $\Sigma = \{0, 1\}$ . Dann ist

$$\Sigma^* = \left\{ \underbrace{\epsilon}_{\text{Länge 0}}, \underbrace{0, 1}_{\text{Länge 1}}, \underbrace{00, 01, 10, 11, 000, \dots}_{\text{Länge 2}} \right\}$$

die Menge der Binärwörter.

**Definition 2:** Eine Teilmenge  $L \subset \Sigma^*$  der Wörter über einem Alphabet  $\Sigma$  heißt (formale) Sprache über  $\Sigma$ .

**Beispiel 2:** Die Menge aller Bytes (Binärwörter der Länge 8).

**Bemerkung 1:** Jede Sprache über  $\Sigma$  ist ein Element der Potenzmenge von  $\Sigma^*$ .

**Definition 3:** Eine (deterministische) Turingmaschine (D) TM  $\mathcal{A} = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, s, \_ , F)$  besteht aus

- einer endlichen Zustandsmenge  $Q$
- einem Eingabealphabet  $\Sigma$
- einem Bandalphabet  $\Gamma$  mit  $\Sigma \subset \Gamma$
- einem Leerzeichen (Blankosymbol)  $\_ \in \Gamma \setminus \Sigma$
- einer Übergangsfunktion  $\delta : Q \times \Gamma \rightarrow Q \times \Gamma \times \{L, N, R\}$
- einem Startzustand  $s \in Q$
- einer Menge von Endzuständen  $F \subset Q$ , wobei für alle  $q \in F, a \in \Gamma$  gilt:

$$\delta(q, a) = (q, a, N).$$

**Interpretation:** Eine Turingmaschine verfügt über ein zweiseitig unendliches Band, das Symbole des Bandalphabets enthält.

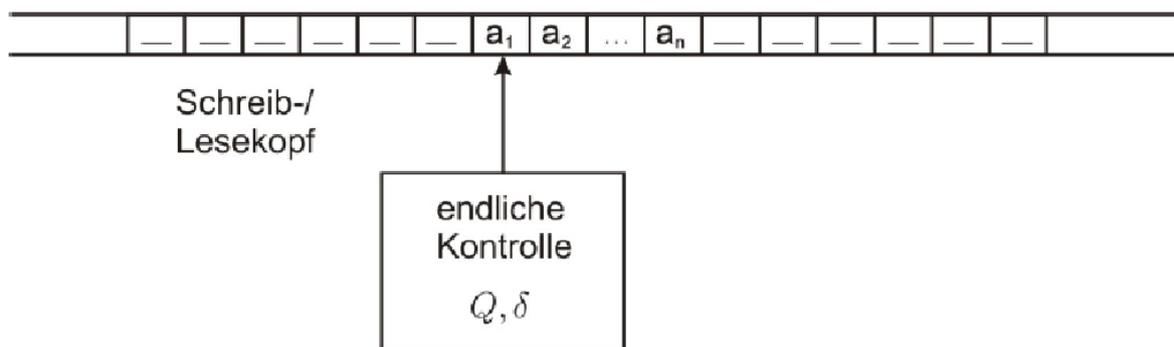


Abbildung 11: Darstellung einer Turingmaschine

**Startkonfiguration:** Im Startzustand  $s$  zeigt der Schreib-/Lesekopf der TM auf den Anfang des Eingabewortes, das auf dem ansonsten nur Leerzeichen enthaltenden Band steht.

Ein Übergang  $\delta(q, a) = (q', a', B)$  bedeutet, dass im aktuellen Zustand  $q$  bei aktuellem Bandinhalt  $a \in \Gamma$  die Maschine in den Zustand  $q'$  übergeht, dabei  $a$  durch  $a' \in \Gamma$  ersetzt und den Schreib-/Lesekopf entsprechend  $B \in \{L, N, R\}$  bewegt:

- $L$ : eine Position nach links,
- $R$ : eine Position nach rechts,
- $N$ : an der aktuellen Stelle stehen bleiben.

In Zeichen:  $q \xrightarrow{a|a',B} q'$ .

**Bemerkung 2:** Eine Turingmaschine stoppt im Zustand  $q$ , falls beim Lesen des Symbols  $a$  gilt:  $\delta(q, a) = (q, a, N)$ . Insbesondere stoppt sie also bei Erreichen eines Endzustandes

und es wird vereinbart, dass sie bei unvollständiger Angabe von  $\delta$  für nicht definierte Argumente  $q, a$  stoppt.

**Definition 4:** Eine Turingmaschine  $\mathcal{A} = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, s, -, F)$  akzeptiert ein Wort  $w \in \Sigma^*$ , falls sie bei Eingabe von  $w$  in einem Zustand aus  $F$  stoppt. Die Menge

$$\mathcal{L}(\mathcal{A}) = \{w \in \Sigma^*; \mathcal{A} \text{ stoppt bei Eingabe von } w \text{ in einem } q \in F\}$$

heißt die von  $\mathcal{A}$  akzeptierte Sprache.

**Definition 5:** Eine nichtdeterministische Turingmaschine (NTM)  $\mathcal{A} = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, s, -, F)$  besteht aus den gleichen Komponenten wie eine deterministische TM, jedoch mit einer Übergangsrelation  $\delta \subset (Q \times \Gamma) \times (Q \times \Gamma \times \{L, N, R\})$ .

Wenn eine Turingmaschine  $\mathcal{A}$  bei Eingabe von  $w \in \Sigma^*$  stoppt, kann die Bandinschrift als Ausgabe gedeutet werden. Sie berechnet damit eine (partielle) Funktion  $f_{\mathcal{A}} : \Sigma^* \rightarrow \Gamma^*$ .

**Definition 6:** Eine (partielle) Funktion  $f : \Sigma^* \rightarrow \Gamma^*$  heißt (Turing-)berechenbar, wenn es eine Turingmaschine gibt, die auf einer Eingabe  $w \in \Sigma^*$  genau dann stoppt, wenn  $f(w)$  definiert ist, und dabei  $f(w) \in \Gamma^*$  ausgibt. In diesem Fall realisiert die Turingmaschine die Funktion  $f$ .

**Bemerkung 3:** Eine NTM kann in einer gegebenen Situation (Zustand, gelesenes Zeichen) zwischen verschiedenen Aktionen (Zeichen schreiben, Kopfbewegung, Folgezustand) wählen. Dies gilt nicht für Endzustände.

**Definition 7:** Eine nichtdeterministische Turingmaschine  $\mathcal{A} = (Q, \Sigma, \Gamma, \delta, s, -, F)$  akzeptiert ein Wort  $w \in \Sigma^*$ , falls es mindestens eine Berechnung gibt, bei der sie in einem Endzustand stoppt. Die von  $\mathcal{A}$  akzeptierte Sprache  $\mathcal{L}(\mathcal{A}) \subseteq \Sigma^*$  ist die Menge der akzeptierten Wörter.

$$\mathcal{L}(\mathcal{A}) = \{w \in \Sigma^*; \mathcal{A} \text{ stoppt bei Eingabe von } w \text{ in einem } q \in F\}$$

Abschließend werden lösbare Probleme etwas genauer im Hinblick auf den für die Lösung benötigten Aufwand, d.h. die Effizienz von Lösungsverfahren untersucht. Dazu werden zunächst beliebige (formale) Probleme durch formale Sprachen ausgedrückt.

Ein Problem  $\Pi$  ist gegeben durch

- eine allgemeine Beschreibung der relevanten Parameter
- eine genaue Beschreibung der Eigenschaften einer Lösung.

Ein Problembeispiel  $I$  (Instanz) von  $\Pi$  entsteht durch Festlegung der Parameter. Ein Codierungsschema  $\sigma : \Pi \rightarrow \Sigma^*$  ordnet jeder Instanz eines Problems ein Wort über einem Alphabet zu.

**Beispiel 3:** Zahlen können dezimal, binär, unär, usw. codiert werden. Bei  $k$ -ärer Codierung (d. h. durch Wörter über  $\{0, \dots, k-1\}$ ) ist die Länge der Codierung

- einer natürlichen Zahl  $i \in \mathbb{N}$  gegeben durch  $|\sigma(i)| = \lceil 1 + \log_k i \rceil$
- einer rationalen Zahl  $r = \frac{p}{q} \in \mathbb{Q}$  gegeben durch  $|\sigma(p)| + |\sigma(q)| + 1$
- eines Vektors  $x = (x_1, \dots, x_d) \in \mathbb{Q}^d$  entsprechend  $|\sigma(x)| = \sum_{i=1}^d |\sigma(x_i)| + (d - 1)$ .

Ein Graph kann zum Beispiel durch eine Adjazenzmatrix codiert werden.

**Definition 8:** Sei  $\mathcal{A}$  eine deterministische Turingmaschine. Die Zeitkomplexitätsfunktion  $T_{\mathcal{A}} : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$  ist definiert durch

$$T_{\mathcal{A}}(n) = \begin{cases} \max\{t; \mathcal{A} \text{ stoppt bei Eingabe von } w \in \Sigma^n \text{ nach } t \text{ Schritten}\} \\ t = 1, \text{ falls } \mathcal{A} \text{ nicht stoppt} \end{cases}$$

**Definition 9:** Die Klasse  $\mathcal{P}$  ist die Menge aller Sprachen (Probleme), für die eine deterministische Turingmaschine mit polynomialer Zeitkomplexitätsfunktion existiert, d. h. es gibt eine DTM  $\mathcal{A}$  und ein Polynom  $p$  mit  $T_{\mathcal{A}}(n) \leq p(n)$  für alle  $n \in \mathbb{N}$ .

**Definition 10:** Sei  $\mathcal{A}$  eine nichtdeterministische TM und  $T_{\mathcal{A}} : \Sigma^* \cup \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$  definiert durch

$$T_{\mathcal{A}}(w) = \begin{cases} \min\{t; t \text{ ist die Länge einer akzeptierten Berechnung}\} \text{ falls } w \in \mathcal{L}(\mathcal{A}) \\ 1 \text{ falls } w \notin \mathcal{L}(\mathcal{A}) \end{cases}$$

und  $T_{\mathcal{A}}(n) = \max\{T_{\mathcal{A}}(w); w \in \Sigma^n\}$ .

**Bemerkung 4:** Für akzeptierende Berechnungen ist  $T_{\mathcal{A}}(n) = 1$ , falls es kein Wort  $w \in \Sigma^n \cap \mathcal{L}(\mathcal{A})$  gibt.

**Definition 11:** Die Klasse  $\mathcal{NP}$  ist die Menge aller Sprachen (Probleme), für die eine nichtdeterministische Turingmaschine mit polynomialer Zeitkomplexitätsfunktion existiert, d. h. es gibt eine NTM  $\mathcal{A}$  und ein Polynom  $p$  mit  $T_{\mathcal{A}}(n) \leq p(n)$  für alle  $n \in \mathbb{N}$ .

**Definition 12:** Eine polynomiale Transformation einer Sprache  $L_1 \subset \Sigma_1^*$  in eine Sprache  $L_2 \subset \Sigma_2^*$  ist eine Funktion  $f : \Sigma_1^* \rightarrow \Sigma_2^*$  mit folgenden Eigenschaften:

- es existiert eine polynomiale deterministische Turingmaschine, die  $f$  berechnet
- für alle  $w \in \Sigma_1^*$  gilt:  $w \in L_1 \Leftrightarrow f(w) \in L_2$

**Korollar 1:** Die polynomiale Transformation ist transitiv.

*Beweis.* Die Behauptung folgt aus der Definition 8, der Definition 12 und der Tatsache, dass die Zeitkomplexitätsfunktion monoton wachsend ist.  $\square$

**Definition 13:** Eine Sprache  $L$  heißt NP-hart, falls sich alle  $L' \in \mathcal{NP}$  polynomial in  $L$  transformieren lassen.

**Korollar 2:** Ist die Sprache  $L$  NP-hart und lässt sich  $L$  polynomial in die Sprache  $L'$  transformieren, so ist die Sprache  $L'$  NP-hart.

*Beweis.* Die Behauptung folgt aus der Definition 13, der Definition 12 und dem Korollar 1.  $\square$

### 4.1.3 Erzeugung von gleichverteilten Pseudozufallszahlen

Die Arbeitsweise eines genetischen Algorithmus beruht im Wesentlichen auf zufälligen Veränderungen von bestehenden Lösungskandidaten verbunden mit einem Selektionsprozess. Auf den heute gebräuchlichen Computern lassen sich jedoch echte Zufallszahlen nicht erzeugen, wie sie beispielsweise in physikalischen Zerfallsprozessen vorkommen. Daher wird mit sogenannten Pseudozufallszahlen gearbeitet. Die meisten Pseudozufallszahlengeneratoren zur Erzeugung gleichverteilter Zufallszahlen (z. B. im Intervall  $[0, 1]$ ) oder  $\{0, \dots, m - 1\}$  arbeiten mit der gemischt kongruenten Methode. Dabei gibt es einen Startwert  $u_0 \in \mathbb{N}$ , welcher iterativ mit einem Faktor  $a \in \mathbb{N}$  multipliziert, mit einem Inkrement  $c \in \mathbb{N}_0$  zusammenaddiert und durch eine Zahl  $m \in \mathbb{N}$  modulo geteilt wird.

$$u_i = (au_{i-1} + c) \bmod m \text{ für } i > 0$$

geteilt wird. Dabei muss  $0 \leq u_0, a, c < m$  gelten. Abhängig von den gewählten Einstellungen werden nacheinander verschiedene Zahlen zwischen 0 und  $m - 1$  angenommen. Das Ziel ist, eine möglichst große Periode zu haben, bis sich die Zahlen wiederholen, sodass möglichst viele Zahlen zwischen 0 und  $m - 1$  tatsächlich vorkommen. Sehr viele Zufallszahlengeneratoren, die bereits von Programmiersprachen und Bibliotheken angeboten werden, sind jedoch hier mit Vorsicht zu genießen, da entweder der Wert  $m$  relativ klein gewählt wird oder die Periode sehr klein ist. Für viele Anwendungen sind die Zufallszahlen aus einem Generator mit den Einstellungen

$$m = 2^{32}, a = 1664525, c = 1013904223$$

ausreichend. Durch die Programmiersprache und die Hardware muss dabei gewährleistet sein, dass entweder das exakte Produkt  $u_i a$  oder die 32 niederwertigen Bits des Produkts richtig berechnet werden - die 32 niederwertigen Bits reichen aus, da die restlichen Bits durch die Modulo-Rechnung sowieso entfernt werden. Zufallszahlen aus dem Intervall  $[0, 1]$  (bzw.  $[ug, og]$ ) erhält man als  $\frac{u_i}{m-1}$  (bzw.  $ug + (og - ug) \frac{u_i}{m-1}$ ). Ein systemunabhängiger Zufallsgenerator mit  $c = 0$  kann mittels einer angenäherten Faktorisierung von  $m = aq + r$  mit  $q = \lfloor \frac{m}{a} \rfloor$  und  $r = m \bmod a$  erreicht werden. Falls  $r < q$  ist, kann für ein  $0 < z < m - 1$  gezeigt werden, dass

$$(az) \bmod m = a(z \bmod q) - r \lfloor \frac{z}{q} \rfloor$$

gilt, falls der Term positiv ist. Andernfalls gilt

$$(az) \bmod m = a(z \bmod q) - r \lfloor \frac{z}{q} \rfloor + m.$$

Da die beiden Terme  $a(z \bmod q)$  und  $r \lfloor \frac{z}{q} \rfloor$  zwischen 0 und  $m - 1$  liegen, sind sie problemlos auf nahezu allen Rechnern berechenbar. Konkret wird das oben beschriebene Verfahren durch einen Algorithmus für die Initialisierung und einen Algorithmus für die Berechnung realisiert. Dabei werden die Werte

$$m = 2^{31} - 1, a = 16807, q = 127773, r = 2836$$

benutzt. Um Korrelationen geringer Ordnung zwischen den Zufallszahlen zu entfernen, werden die erzeugten Zufallszahlen noch umsortiert. Hierfür werden 32 Zufallszahlen in einer Tabelle `Tabelle = new int[32]` abgelegt. Wenn eine neue Zufallszahl benötigt wird, wird aus der zuletzt gelieferten Zufallszahl der nächste Index der Tabelle berechnet und

die dortige Zahl zurückgegeben. Der Tabelleneintrag wird durch eine neue Zufallszahl ersetzt.

**Algorithmus für die Initialisierung als C# Code:**

```
public void InitialisiereZufallszahlen(int Zustand, out int[] Tabelle, out int Index)
{
    Tabelle = new int[32];
    for (int i = 31; i >= 0; i--)
    {
        Zustand = 16807 * (Zustand % 127773) - 2836 * (Zustand / 127773);
        if (Zustand < 0)
        {
            Zustand = Zustand + (int)Math.Pow(2, 31) - 1;
        }
        if (i <= 31)
        {
            Tabelle[i] = Zustand;
        }
    }
    Index = Tabelle[0];
}
```

Abbildung 12: Erzeugung von gleichverteilten Pseudozufallszahlen.

**Algorithmus für die Berechnung als C# Code:**

```
public float UniformeZufallszahl(ref int Zustand, ref int[] Tabelle, ref int Index)
{
    Zustand = 16807 * (Zustand % 127773) - 2836 * (Zustand / 127773);
    if (Zustand < 0)
    {
        Zustand = Zustand + (int)Math.Pow(2, 31) - 1;
    }
    int i = Index / 67108864;
    Index = Tabelle[i];
    Tabelle[i] = Zustand;
    float Zufallszahl = Index / ((float)Math.Pow(2, 31) - 1);
    return Zufallszahl;
}
```

Abbildung 13: Erzeugung von gleichverteilten Pseudozufallszahlen auf  $[0, 1]$ .

#### 4.1.4 Dijkstra-Algorithmus

In diesem Abschnitt wird der Dijkstra-Algorithmus beschrieben und analysiert, der zur Berechnung eines kürzesten Weges in einem gerichteten Graphen dient. Viele Probleme können auf das soeben genannte Problem zurückgeführt werden. Da der Dijkstra-Algorithmus sehr effizient implementiert werden kann, können zurückgeführte Probleme oftmals wesentlich schneller gelöst werden, was Applikationen in vielen Fällen echtzeitfähig macht. Als Beispiel wäre hierbei die Routenplanung mittels linearer, binärer Programme zu nennen, deren Rechenzeit bei Verwendung des Dijkstra-Algorithmus enorm reduziert werden kann. Näheres dazu im nächsten Abschnitt.

Gegeben sei ein gerichteter Graph  $D = (V, A)$  mit Knotenmenge  $V, |V| = n \in \mathbb{N}$  und Kantenmenge  $A, |A| = m \in \mathbb{N}$ , Gewichte  $c(a) \geq 0$  für alle  $a \in A$ , ein Knoten  $s \in V$  (und ein Knoten  $v \in V \setminus \{s\}$ ). Gesucht sind die kürzesten gerichteten Wege von  $s$  nach  $v$  und ihre Länge (bzw. einfach nur ein kürzesten  $(s, v)$ -Wege).

**Definition 14 (Weg):** Ein Weg  $P$  von  $s$  nach  $t$  ist eine Folge  $v_0, v_1, \dots, v_k$  von Knoten, sodass  $v_0 = s, v_k = t$  und  $v_i v_{i+1} \in A$  für  $0 \leq i \leq k - 1$ .

Der Weg hat die Länge  $c(P) := \sum_{i=0}^{k-1} c(v_i v_{i+1})$ .

**Idee:** Dekomposition eines kürzesten  $(s, w)$ -Weges in einen kürzesten  $(s, u)$ -Weg plus kürzesten  $(u, w)$ -Weg.

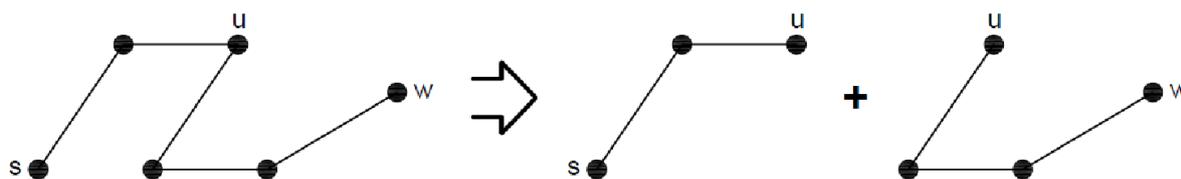


Abbildung 14: Dekomposition eines kürzesten  $(s, w)$ -Weges.

Dies kann dadurch erreicht werden, dass eine Menge markierter Knoten, für deren Elemente  $v$  bereits ein kürzester Weg nach  $v$  gefunden wurde, vergrößert wird. Für alle unmarkierten Knoten wird die Länge des bisher gefundenen kürzesten Weges zugeordnet.

Zur Lösung dieses kürzesten Wege-Problems werden die Datenstrukturen  $DIST(v)$  und  $VOR(v)$  definiert durch

$$\begin{aligned} DIST(v) &= \text{Länge eines kürzesten } (s, v) - \text{Weges,} \\ VOR(v) &= \text{Vorgänger von } v \text{ in einem kürzesten } (s, v) - \text{Weg,} \end{aligned}$$

verwendet. Initialisiert werden diese Datenstrukturen durch  $DIST(s) = 0, DIST(v) = \infty$  für alle  $v \in V \setminus \{s\}$  und  $VOR(v) = s$  für alle  $v \in V$ .

**Algorithmus 1 (Dijkstra-Algorithmus):**

1. Alle Knoten seien unmarkiert.
2. Sei  $u$  ein unmarkierter Knoten mit  $DIST(u) = \min\{DIST(x); x \text{ unmarkiert}\}$ . Markiere  $u$ . (Falls  $u = v$ , breche ab.)
3. Für alle unmarkierten Knoten  $v$  mit  $uv \in A$  führe aus:

$$\begin{aligned} &\text{Falls } DIST(v) > DIST(u) + c(uv) \text{ setze :} \\ &DIST(v) := DIST(u) + c(uv) \text{ und } VOR(v) := u. \end{aligned}$$

4. Sind noch nicht alle Knoten markiert, gehe zu 2..

**Bemerkungen 5:**

- Für alle markierten Knoten  $v$  ist  $DIST(v)$  die Länge des kürzesten  $(s, v)$ -Weges.
- Ist  $v$  markiert und  $DIST(v) < \infty$ , so ist  $VOR(v)$  der Vorgänger von  $v$  in einem kürzesten  $(s, v)$ -Weg. Durch Rückwärtsgehen bis  $s$  kann ein kürzester  $(s, v)$ -Weg bestimmt werden.
- Bricht das Verfahren nicht in Schritt 2 ab und gilt am Ende  $DIST(v) = \infty$ , so heißt das, dass es in  $D$  keinen (kürzesten)  $(s, v)$ -Weg gibt.
- Die Menge der markierten Knoten scheint sich kreisförmig um den Startknoten auszuweiten.
- In der Datenstruktur  $VOR$  wird zu jedem Knoten  $v$  sein Vorgänger in einem kürzesten  $(s, v)$ -Weg abgespeichert.
- Ein kürzester  $(s, v)$ -Weg ergibt sich gemäß:

$$v, \text{VOR}(v), \text{VOR}(\text{VOR}(v)), \dots, \text{VOR}(\dots \text{VOR}(v) \dots) = s.$$

- Offensichtlich ist durch  $VOR()$  eine Aboreszenz definiert.

**Satz 4:** Der Dijkstra-Algorithmus arbeitet korrekt.

*Beweis.* Über Induktion nach der Anzahl  $k$  der markierten Knoten wird gezeigt:

- Ist  $v$  markiert, so enthält  $DIST(v)$  die Länge des kürzesten  $(s, v)$ -Weges.
- Ist  $v$  unmarkiert, so enthält  $DIST(v)$  die Länge des kürzesten  $(s, v)$ -Weges, wobei nur markierte Knoten als innere Knoten zugelassen werden.

Induktionsanfang:  $k = 1$ : Dann ist nur  $s$  markiert und die Behauptung folgt direkt aus der Initialisierung  $DIST(s) = 0$ . Für alle unmarkierten  $v$  enthält der kürzeste  $(s, v)$ -Weg keine inneren Knoten und somit auch keine markierten inneren Knoten.

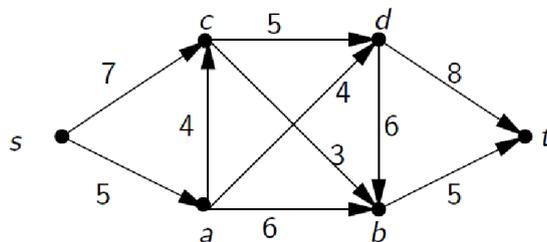
Sei die Behauptung richtig für  $k \geq 1$  markierte Knoten, wobei das Verfahren in Schritt 2 einen  $(k + 1)$ -sten Knoten  $u$  markiere (\*).

Induktionsschritt für (a): Nach Induktionsvoraussetzung (b) ist  $DIST(u)$  die Länge eines kürzesten  $(s, u)$ -Weges, der als innere Knoten nur die ersten  $k$  markierten Knoten benutzen darf (\*\*). Es wird nun gezeigt, dass  $DIST(u)$  die Länge eines kürzesten  $(s, u)$ -Weges ist. Angenommen es existiere ein kürzerer Weg  $P$  von  $s$  nach  $u$ . Dann muss er wegen (\*\*) ein Element aus  $A$  enthalten, das einen markierten mit einem unmarkierten Knoten verbindet. Sei  $vw \in A$  das erste Element auf dem Weg  $P$ . Dann besitzt der Teilweg  $\bar{P}$  von  $P$  von  $s$  nach  $w$  nur markierte Knoten als innere Knoten. Deshalb gilt  $DIST(w) \leq c(\bar{P})$  nach Induktionsvoraussetzung (b). Weiterhin gilt  $c(\bar{P}) \leq c(P)$  (nicht negative Kantengewichte) und  $c(P) < DIST(u)$  (Annahme über  $P$ ). Zusammen ergibt sich  $DIST(w) < DIST(u)$ . Aber dies widerspricht  $DIST(u) \leq DIST(w)$  entsprechend der Wahl von  $u$  in Schritt 2.

Induktionsschritt für (b): Es bleibt zu zeigen: Für die derzeit unmarkierten Knoten  $v$  ist  $DIST(v)$  die Länge eines kürzesten  $(s, v)$ -Weges, der nur markierte Knoten als innere Knoten hat. Wegen (\*) ist der vorletzte Knoten auf einem kürzesten  $(s, v)$ -Weg, der nur markierte Knoten als innere Knoten hat, entweder  $u$  (Fall 1) oder ein anderer vor  $u$  markierter Knoten (Fall 2). Da in Schritt 3 die Länge eines kürzesten  $(s, v)$ -Weges verglichen wird mit der Länge eines  $(s, v)$ -Weges, der sich aus einem kürzesten  $(s, u)$  Weg und der

Kante  $uv$  zusammensetzt, folgt, falls der  $(s, v)$ -Weg, der sich aus einem kürzesten  $(s, u)$  Weg und der Kante  $uv$  zusammensetzt, kein kürzester  $(s, v)$ -Weg ist, mit der Induktionsvoraussetzung (b) die Behauptung.  $\square$

**Beispiel 4: Beispiel zum Dijkstra-Algorithmus:**



	$DIST(s)$	$DIST(a)$	$DIST(b)$	$DIST(c)$	$DIST(d)$	$DIST(t)$	Unmarkiert
Start	0	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\{s, a, b, c, d, t\}$
Mark. s	0	$5s$	$\infty s$	$7s$	$\infty s$	$\infty s$	$\{a, b, c, d, t\}$
Mark. a	0	5	$11a$	7	$9a$	$\infty$	$\{b, c, d, t\}$
Mark. c	0	5	$10c$	7	9	$\infty$	$\{b, d, t\}$
Mark. d	0	5	10	7	9	$17d$	$\{b, t\}$
Mark. b	0	5	10	7	9	$15b$	$\{t\}$
(Mark. t)							$\emptyset$

Demnach ist  $s \rightarrow c \rightarrow b \rightarrow t$  ein kürzester Weg von  $s$  nach  $t$  und hat die Länge 15.

Abbildung 15: Beispiel zum Dijkstra-Algorithmus.

Es wird nun die Laufzeit des Dijkstra-Algorithmus analysiert.

Es bezeichne dazu  $T_{\text{EXTRACT-MIN}}(n)$  und  $T_{\text{DECREASE-KEY}}(n)$  die Zeitkomplexitäten zum Markieren des Minimums in Schritt 2 und zum Verringern des Schlüssels in Schritt 3 in einer Prioritätsschlange mit  $n$  Elementen. Ferner bezeichne  $M$  die Menge aller reellwertigen Funktionen  $f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}$  auf den natürlichen Zahlen. Dann sei  $O(g)$  definiert durch

$$O(g) = \{f \in M; \exists c \in \mathbb{R}^+, \exists n_0 \in \mathbb{N} : \forall n \geq n_0 : |f(n)| \leq c|g(n)|\}.$$

Die Laufzeit kann nun wie folgt abgeschätzt werden: Es wird in Schritt 2 maximal  $n$ -mal ein Minimum markiert. Weiterhin gibt es in Schritt 3 maximal  $2m = 2|E|$  Operationen, welche Schlüsselwerte verringern. Dies führt auf:

**Satz 5:** Die Laufzeit des Dijkstra-Algorithmus liegt in

$$O(nT_{\text{EXTRACT-MIN}}(n) + mT_{\text{DECREASE-KEY}}(n)).$$

*Beweis.* Der Beweis folgt aus den obigen Ausführungen.  $\square$

Wird nun ein Array für die Prioritätsschlange verwendet, so gilt  $T_{\text{EXTRACT-MIN}}(n) = O(n)$  und  $T_{\text{DECREASE-KEY}}(n) = O(1)$ . Mit dem letzten Satz führt das auf:

**Bemerkung 6:** Mit Hilfe eines Arrays als Datenstruktur für die Prioritätsschlange benötigt der Dijkstra-Algorithmus  $O(m + n^2)$  Zeit auf einem Graphen mit  $n$  Ecken und  $m$  Kanten.

Mit Hilfe von ausgeklügelten Datenstrukturen kann die oben angegebene Zeitschranke deutlich verbessert werden. Verwendet man einen binären oder einen Binomial-Heap, so gilt  $T_{\text{EXTRACT-MIN}}(n) = O(\log(n))$  und  $T_{\text{DECREASE-KEY}}(n) = O(\log(n))$ . Verwendet man einen  $d$ -nären Heap, so gilt  $T_{\text{EXTRACT-MIN}}(n) = O(d \log_d(n))$  und  $T_{\text{DECREASE-KEY}}(n) = O(\log_d(n))$ . Verwendet man einen Fibonacci-Heap, so gilt  $T_{\text{EXTRACT-MIN}}(n) = O(\log(n))$  und  $T_{\text{DECREASE-KEY}}(n) = O(1)$ . Mit dem letzten Satz führt dies auf:

**Bemerkung 7:** Mit Hilfe eines binären oder Binomial-Heaps als Datenstruktur für die Prioritätsschlange benötigt der Dijkstra-Algorithmus  $O((n + m) \log(n))$  Zeit auf einem Graphen mit  $n$  Ecken und  $m$  Kanten.

**Bemerkung 8:** Mithilfe eines  $d$ -nären Heaps ( $d := \max\{2, \lceil \frac{m}{n} \rceil + 1\}$ ) als Datenstruktur für die Prioritätsschlange benötigt der Dijkstra-Algorithmus  $O(m \log_d(n))$  Zeit auf einem Graphen mit  $n$  Ecken und  $m$  Kanten.

Für dünne Graphen, d. h.  $m = O(n)$ , ist die Laufzeit  $O(n \log(n))$ . Für dichtere Graphen mit  $m = \Omega(n^{1+\epsilon})$  ( $\Omega(g) := \{f \in M; \exists c \in \mathbb{R}^+, \exists n_0 \in \mathbb{N} : \forall n \geq n_0 : |f(n)| \geq c|g(n)|\}$ ) für ein  $\epsilon > 0$  gilt

$$O(m \log_d(n)) = O(m \frac{\log(n)}{\log(d)}) = O(m \frac{\log(n)}{\log(n^\epsilon)}) = O(\frac{m}{\epsilon}) = O(m),$$

wobei die letzte Gleichheit folgt, da  $\epsilon > 0$  konstant ist. Für diesen Fall ergibt sich also eine lineare Laufzeit. Dies ist sicherlich optimal, da jeder korrekte Algorithmus für kürzeste Wege zumindest jede der  $m$  Kanten einmal betrachten muss.

**Bemerkung 9:** Mithilfe eines **Fibonacci-Heaps** als Datenstruktur für die Prioritätsschlange benötigt der Dijkstra-Algorithmus  $O(m + n \log(n))$  Zeit auf einem Graphen mit  $n$  Ecken und  $m$  Kanten.

#### 4.1.5 Genetischer Algorithmus

Genetische Algorithmen (GA, engl. genetic algorithms) sind im Wesentlichen durch eine (probalistische) Elternselektion und die Rekombination als primären Suchoperator gekennzeichnet. Die Mutation ist meist ein Hintergrundoperator, der nur mit geringer Wahrscheinlichkeit zur Anwendung kommt. Er garantiert die Erreichbarkeit aller Punkte im Suchraum und erhält eine Grunddiversität in der Population. Die Schema-Theorie ist die theoretische Grundlage für die Wirkungsweise der genetischen Algorithmen.

Im Folgenden wird der grundsätzliche Aufbau des diversifizierten genetischen Algorithmus, kurz FEGA, der in dieser Arbeit verwendet wird, beschrieben und analysiert, der später auf ein kombinatorisches Optimierungsproblem spezialisiert wird. Dazu werden zunächst einige Definitionen benötigt, wobei  $\Omega$  eine beliebige Menge und  $f : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$  eine o. B. d. A. zu minimierende Funktion bezeichne.

**Definition 15 (Dekodierungsfunktion):** Eine Dekodierungsfunktion  $dec : \mathcal{G} \rightarrow \Omega$  ist eine Abbildung vom Genotypraum  $\mathcal{G}$  auf den Phänotyp  $\Omega$ .

**Definition 16 (Individuum):** Ein Individuum  $A$  ist ein Tupel  $(A.G, A.S, A.F)$  bestehend aus dem eigentlichen Lösungskandidaten, dem Genotyp  $A.G$ , den optionalen Zusatzinformationen  $A.S$  und dem Gütwert  $A.F = f(dec(A.G)) \in \mathbb{R}$ .

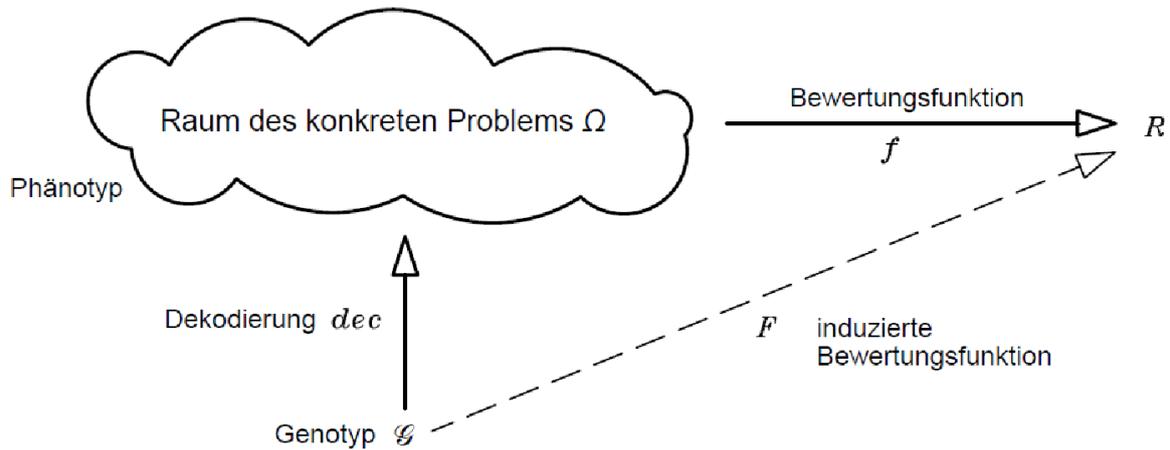


Abbildung 16: Kodierte Darstellung des Suchraums (Quelle: Weicker, 2007, pp. 35, Bild 2.14).

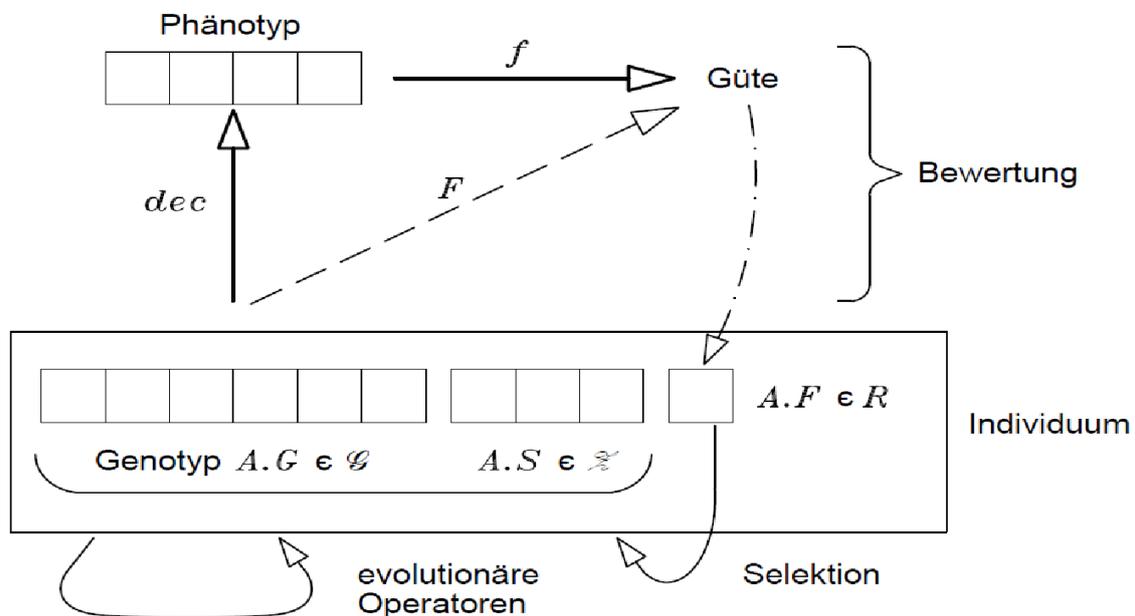


Abbildung 17: Unterschiedliche Aspekte eines Individuums: Genotyp  $A.G$ , Phänotyp  $dec(A.G)$ , Zusatzinformationen  $A.S$  und Güte  $A.F$  (Quelle: Weicker, 2007, pp. 36, Bild 2.15).

**Definition 17 (Genetische Operatoren):** Für ein durch die Menge  $\mathcal{G}$  der Genotypen

kodiertes Optimierungsproblem und die Menge  $\mathcal{L}$  der Zusatzinformationen, wird ein Mutationsoperator durch die Abbildung

$$Mut^\xi : \mathcal{G} \times \mathcal{L} \rightarrow \mathcal{G} \times \mathcal{L}$$

definiert, wobei  $\xi$  den Zustand des Zufallsgenerators darstellt.

Analog wird ein Rekombinationsoperator mit  $r \geq 2$  Eltern und  $s \geq 1$  Kindern ( $r, s \in \mathbb{N}$ ) durch die Abbildung

$$Rek^\xi : (\mathcal{G} \times \mathcal{L})^r \rightarrow (\mathcal{G} \times \mathcal{L})^s$$

definiert.

**Definition 18 (Selektionsoperator):** Ein Selektionsoperator wird auf eine Population  $P = (A^{(1)}, \dots, A^{(r)})$  angewandt:

$$Sel^\xi : (\mathcal{G} \times \mathcal{L} \times \mathbb{R})^r \rightarrow (\mathcal{G} \times \mathcal{L} \times \mathbb{R})^s, \\ (A^{(1)}, \dots, A^{(r)}) \mapsto (A^{(IS^\xi(c_1, \dots, c_r)_k)})_{1 \leq k \leq s}, A^{(i)} := (a_i, b_i, c_i) \in \mathcal{G} \times \mathcal{L} \times \mathbb{R}.$$

Die dabei zugrunde liegende Selektion hat die Form

$$IS^\xi : \mathbb{R}^r \rightarrow \{1, \dots, r\}^s.$$

**Bemerkung 10:** Da bei den heute gängigen Computern die Erzeugung von Zufallszahlen nur als Pseudozufallszahlen möglich ist, werden in der Beschreibung der genetischen Operatoren die ihnen zugeordneten Funktionen von einem Zustand  $\xi$  des Zufallsgenerators abhängig gemacht.

Mit den obigen Definitionen kann der grundsätzliche Aufbau eines GA's und der des in dieser Arbeit benutzten DEGA = Diversified Efficient GA und FEAGA = Fast Efficient GA wie folgt beschrieben werden:

#### Grundsätzlicher Aufbau eines GA's:

1. Erzeuge eine Anfangspopulation an Chromosomen.
2. Solange ein Abbruchkriterium nicht erfüllt ist, führe aus:
3. **Fitnesszuweisung:** Dekodiere die Chromosomen und ermittle ihre Fitness.
4. **Selektion:** Wähle aus der aktuellen Population einige Chromosomen (Eltern) nach einer vorgegebenen Regel aus.
5. **Rekombination:** Führe mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit ein Crossover zwischen den ausgewählten Chromosomen (Eltern) durch und erhalte dadurch neue Chromosomen (Kinder).
6. **Mutation:** Mutiere mit einer kleinen Wahrscheinlichkeit die neuen Chromosomen (Kinder) oder ausgewählte Eltern.
7. **Ersetzung:** Integriere die neu erzeugten Individuen in die alte Population.

#### Algorithmus DEGA:

1. Erzeuge mittels eines Diversitätsgenerators eine zufällige Anfangspopulation mit einer festen Anzahl  $n \in \mathbb{N}$  an verschiedenen Individuen, die den Variablenbereichsvorgaben (falls vorhanden) genügen. (**Initialisierung, Diversifizierung**).
2. Bestimme und fixiere den Güterwert der einzelnen Individuen (**Bewertung**, siehe auch Bemerkung 18).
3. Selektiere  $m \in \mathbb{N}, m \leq n$  beste Individuen nach ihren Güterwerten (**Bestenselektion**).
4. Erzeuge aus jedem selektierten Individuum durch  $o$ -malige Auswahl einer der genetischen Operatoren (Rekombinations-, Mutationsoperator) mit der Rekombinations- bzw. Mutationswahrscheinlichkeit ein neues Individuum (**Reproduktion**).
5. Falls die Gesamtanzahl an verschiedenen Individuen größer als die Größe der Anfangspopulation ist, so reduziere die Population der erzeugten Individuen durch Entfernen der güteschlechtesten Individuen auf die Größe der Anfangspopulation. Falls die erzeugte Anzahl an verschiedenen Individuen kleiner als die Größe der Anfangspopulation ist, so erzeuge mit dem Diversitätsgenerator zufällig weitere verschiedene Individuen bis die Größe der Anfangspopulation erreicht ist (**Diversifizierung**).
6. Ersetze die alte Population durch die neue Population (**Umweltselektion**).
7. Gehe zu 2., solange die Abbruchbedingung nicht erfüllt ist (**Terminierung**).

**Algorithmus 2 (FEGA):**

1. Erzeuge eine Anfangspopulation an verschiedenen zulässigen oder nichtzulässigen Lösungskandidaten, die den Variablenbereichsvorgaben (falls vorhanden) genügen.
2. Setze  $t = 0$ .
3. Bestimme diejenigen Lösungskandidaten mit dem besten und schlechtesten Güterwert.
4. Solange sich der Betrag des Güterwerts des besten Lösungskandidaten vom Güterwert des schlechtesten Lösungskandidaten um mehr als ein passendes positives vorgegebenes  $\epsilon$  unterscheidet und eine maximale Anzahl an Iterationen nicht überschritten ist, führe aus:
5. Wähle zufällig, gleichverteilt  $m \in \mathbb{N}$  Lösungskandidaten aus der aktuellen Population  $P(t)$  aus.
6. Erzeuge aus den ausgewählten Individuen mittels einem passenden Rekombinations- und Mutationsoperator  $s \in \mathbb{N}$  (neue) Individuen.
7. Bestimme unter diesen Individuen das beste Individuum.
8. Ist dieses Individuum besser als das schlechteste Individuum, so ersetze das schlechteste Individuum durch dieses beste Individuum.
9. Setze  $t = t + 1$ .
10. Bestimme diejenigen Individuen mit dem besten und schlechtesten Güterwert.
11. Falls sich der Betrag des Güterwerts des besten Individuums vom Güterwert des schlechtesten Individuums um weniger als ein passendes positives vorgegebenes  $\eta$  unterscheidet und  $m \geq 5$  gilt, setze  $m = m - 1$ . Ende solange.

**Bemerkung 11:** Konkret kann für reellwertige Probleme ein Diversitätsgenerator wie folgt implementiert werden: Für jede Suchraumdimension wird der gültige Wertebereich in vier Teile zerlegt und für jeden Teil wird gespeichert, wie viele Werte in diesem Bereich bereits erzeugt wurden. Dann wird invers proportional zur bisherigen Häufigkeit für jede Suchraumdimension der Wertebereich und ein zufälliger Wert aus diesem Bereich gewählt.

**Bemerkung 12:** Der Parameter  $m$  wird als Selektionsgröße bezeichnet, der Parameter  $s$  als Nachbarschaftsgröße.

**Bemerkung 13:** Als Abbruchkriterium kann verwendet werden:

- Maximale Anzahl an Iterationen (Generationen): Der DEGA oder FEGA bricht ab, falls eine maximale Anzahl an Generationen erreicht ist.
- Maximales Zeitlimit: Der DEGA oder FEGA bricht ab, falls ein maximales Zeitlimit erreicht ist.
- Minimaler Gütewert: Der DEGA oder FEGA bricht ab, falls der Gütewert des besten Individuums den minimalen Gütewert unterschreitet.
- Degeneriertes Zeitlimit: Der DEGA oder FEGA bricht ab, falls der Gütewert des besten Individuums während eines gewissen Zeitlimits nicht verbessert werden kann.
- Degenerierte Generationen: Der DEGA oder FEGA bricht ab, falls der Gütewert des besten Individuums während einer gewissen Anzahl an Generationen nicht verbessert werden kann.
- Mittlerer Gütewert: Der DEGA oder FEGA bricht ab, falls der Mittelwert der Gütewerte der Individuen einen vorgegebenen mittleren Gütewert unterschreitet.

**Bemerkung 14:** Neben der Bestenselektion existieren weitere Selektionsmechanismen wie die Q-Stufige-Turnier-Selektion, die fitnessproportionale-Selektion, die Turnier-Selektion und das Stochastische-Universelle-Sampling. Alle diese Selektionsmechanismen zielen darauf ab, dass einerseits die besten Individuen ausgewählt werden, andererseits auch die Diversität erhalten bleibt. Aufgrund der hohen Diversität des FEGA, wird in dieser Arbeit ausschließlich die Besten-Selektion verwendet.

**Bemerkung 15:** Bei nicht diversifizierten genetischen Algorithmen kann es passieren, dass er aufgrund vieler schlechter und weniger guter Individuen vorzeitig gegen ein schlechtes lokales Minimum konvergiert. Ist das der Fall, so kann der Suchraum nur eingeschränkt abgesucht werden. Dabei Abhilfe schaffen kann eine Diversifizierung. Diese Diversifizierung erfolgt im DEGA in Schritt 5 und im FEGA in Schritt 5 - 8.

Bemerkung 15 induziert folgende Definitionen:

**Definition 19 (Konvergierte Population):** Eine Population  $P = (A^{(1)}, \dots, A^{(r)})$  heißt konvergiert, wenn alle Individuen identisch sind, d. h. für alle  $1 \leq i, j \leq r$  gilt

$$A^{(i)}.G = A^{(j)}.G.$$

**Definition 20 (Nachbarschaftsgraph):** Sei  $Mut^\xi : \mathcal{G} \times \mathcal{L} \rightarrow \mathcal{G} \times \mathcal{L}$  ein Mutationsoperator und  $\mathcal{L} = \{\perp := \text{Keine Zusatzinformation}\}$ , dann ist der Nachbarschaftsgraph zu  $Mut^\xi$  definiert als gerichteter Graph  $G := (V, E)$  mit Knotenmenge  $V := \mathcal{G}$  und Kantenmenge  $E := \{(A.G, B.G) \in V \times V; \exists \xi : Mut^\xi(A) = B\}$ .

**Definition 21 (Gütelandschaft, Weg):** Eine Gütelandschaft  $(G, F)$  wird durch einen Nachbarschaftsgraphen  $G := (\mathcal{G}, E)$  und eine induzierte Bewertungsfunktion  $F : \mathcal{G} \rightarrow \mathbb{R}$  definiert, die jedem Knoten seine Höhe in der Landschaft zuordnet. Ferner ist  $w = w_1 \dots w_k$  ein Weg in der Landschaft, falls für alle  $i \in \{1, \dots, k\}$  die Kante  $(w_i, w_{i+1}) \in E$  existiert.

**Definition 22 (Lokales Minimum, Plateau):** Sei  $Mut^\xi : \mathcal{G} \times \mathcal{L} \rightarrow \mathcal{G} \times \mathcal{L}$  ein Mutationsoperator,  $G := (\mathcal{G}, E)$  der zugehörige Nachbarschaftsgraph und  $(G, F)$  eine Gütelandschaft. Dann heißt Lösungskandidat  $A.G \in \mathcal{G}$  ein

- lokales Minimum, falls alle möglichen Mutationen  $B = Mut^\xi(A)$  nicht besser sind ( $F.B \geq F.A$ ) und für alle Wege  $w_1(= A.G)w_2\dots w_k$  mit  $F(w_k) < F(A.G)$  gilt, dass mindestens einer der Lösungskandidaten  $w_i$ , ( $2 \leq i < k$ ) eine schlechtere Güte hat:  $F(A.G) < F(w_i)$ .
- Plateau-Punkt, falls alle möglichen Mutationen  $B = Mut^\xi(A)$  (mit  $(A.G, B.G) \in E$ ) nicht besser sind ( $F.B \geq F.A$ ) und wenigstens ein benachbarter Lösungskandidat  $C$  mit  $(A.G, C.G) \in E$  existiert, der gleiche Güte hat:  $F(A.G) = F(C.G)$ .

**Definition 23 (Diversität):** Sei die Population  $P = (A^{(1)}, \dots, A^{(r)})$  zum Genotyp  $\mathcal{G}$  gegeben, d. h.  $A^{(i)}.G \in \mathcal{G}$ . Dann werden die folgenden Maße für die Diversität definiert. Der mittlere Abstand der Individuen in der Population beträgt

$$DIVERS_{Abstand, d}(P) = \frac{1}{r(r-1)} \sum_{1 \leq i, j \leq r} d(A^{(i)}.G, A^{(j)}.G),$$

wobei  $d : \mathcal{G} \times \mathcal{G} \rightarrow \mathbb{R}$  ein beliebiges Abstandsmaß ist. Die teilstringorientierte Diversität ist definiert als

$$Divers_{Teilstring}^{m, n \in \mathbb{N}, m \leq n}(P) = \frac{r \#(\bigcup_{1 \leq i \leq r} Teil(A_{m,n}^{(i)}))}{\sum_{1 \leq i \leq r} \#Teil(A_{m,n}^{(i)})},$$

wobei  $Teil(A_{m,n}^{(i)}) := \bigcup_{m \leq i \leq j \leq n} \{A^{(i)}.G_i, \dots, A^{(i)}.G_j\}$  und  $\#A$  die Mächtigkeit der Menge  $A$  bezeichne.

**Bemerkung 16:** Beide Diversitätsmaße sind wohldefiniert. Je größer die gemessene Diversität ist, desto größer ist die Vielfalt in der Population.

**Definition 24 (Formae):** Sei  $\mathcal{M}$  die Menge der zu berücksichtigenden Merkmale. Ein Merkmal (oder Eigenschaft)  $Merk \in \mathcal{M}$  induziert eine Äquivalenzrelation  $\sim_{Merk}$ , so dass für beliebige Individuen mit  $A.G, B.G \in \mathcal{G}$  entweder  $A.G \sim_{Merk} B.G$  gilt, falls das Merkmal identisch bei beiden Individuen ausgeprägt ist, oder sonst  $A.G \not\sim_{Merk} B.G$ . Damit ergibt sich zu jedem Individuum  $A.G$  seine Äquivalenzklasse bzw. Forma

$$[A.G]_{\sim_{Merk}} := \{B.G \in \mathcal{G}; A.G \sim_{Merk} B.G\}.$$

Die Anzahl der Formae, die durch die Äquivalenzklassen eines Merkmals eingeführt wird, heißt Genauigkeit des Merkmals. Ferner sollen zwei Formae  $\Delta$  und  $\Delta'$  miteinander verträglich ( $\Delta \bowtie \Delta'$ ) heißen, wenn es ein Individuum gibt, das beide Eigenschaften vereinbaren kann, d. h.

$$(\Delta \bowtie \Delta') :\Leftrightarrow \Delta \cap \Delta' \neq \emptyset$$

Sei  $M$  eine beliebige Menge. Für einen gegebenen Genotyp  $\mathcal{G} = M^l$  kann ein beliebiges Schema

$$H \in (M \cup \{*\})^l (\{(A.G_1, \dots, A.G_l); \forall 1 \leq i \leq l : (H_i \neq *) \Rightarrow (A.G_i = H_i)\} =: \mathcal{J}(H))$$

über ein Merkmal

$$Merk := \{i; (1 \leq i \leq l) \wedge (H_i \neq *)\}$$

und einen Vertreter aus der Menge der Instanzen  $A.G \in \mathcal{J}(H)$  beschrieben werden. Schreibweise:  $H = H_{Merk}(A.G)$ .

Entsprechend der obigen Definition gilt ebenso  $\mathcal{J}(H) = [A.G]_{\sim_{Merk}}$ . Auf dieser Grundlage lässt sich das folgende Korollar formulieren, das die Grundidee des Schema-Theorems (Weicker, 2007, pp. 87, Satz 3.5) extrahiert.

**Korollar 3 (Allgemeines Schema-Theorem):** Sei  $P(t) := (A^{(t,1)}, \dots, A^{(t,r)})$  eine Population zum Zeitpunkt  $t$  und  $\Delta$  ein Forma. Die Selektion  $Sel$  entspricht der  $\mu$ -maligen Anwendung einer Selektion  $\widetilde{Sel}$ , die durch die Indexselektion  $\widetilde{IS}^\xi : \mathbb{R}^\mu \rightarrow \{1, \dots, \mu\}$  definiert ist, d. h. die Wahl der einzelnen Individuen ist voneinander unabhängig. Ferner sei  $Rek^\xi : (\mathcal{G} \times \mathcal{L})^2 \rightarrow (\mathcal{G} \times \mathcal{L})^2$  ein Rekombinations- und  $Mut^\xi : \mathcal{G} \times \mathcal{L} \rightarrow \mathcal{G} \times \mathcal{L}$  ein Mutationsoperator mit  $\mathcal{L} = \{\perp := \text{Keine Zusatzinformation}\}$ . Dann gilt bei Anwendung in dieser Reihenfolge für die erwartete Anzahl  $Erw[p_H^{t+1}]$  der Instanzen von  $H$  in  $P(t+1)$

$$Erw[p_H^{t+1}] \geq p_{sel}(\Delta, t)p_{-mut}(\Delta, t)p_{-rek}(\Delta, t),$$

wobei

$$p_H^{t+1} := \frac{1}{r} \#\{1 \leq i \leq r; A^{(t+1,i)}.G \in J(H)\},$$

$$p_{sel}(\Delta, t) := \sum_{A \in P(t) \text{ mit } A \in \Delta} \text{Wahrscheinlichkeit}_\xi[\widetilde{Sel}(P(t)) = A],$$

$$p_{-mut}(\Delta, t) := \text{Wahrscheinlichkeit}_\xi[Mut^\xi(A).G \in \Delta; A \in P(t) \wedge A.G \in \Delta],$$

$$p_{-rek}(\Delta, t) := \text{Wahrscheinlichkeit}_{\xi, B.G \in \mathcal{G}}[Rek^\xi(A, B).G \in \Delta^2; A \in P(t) \wedge A.G \in \Delta].$$

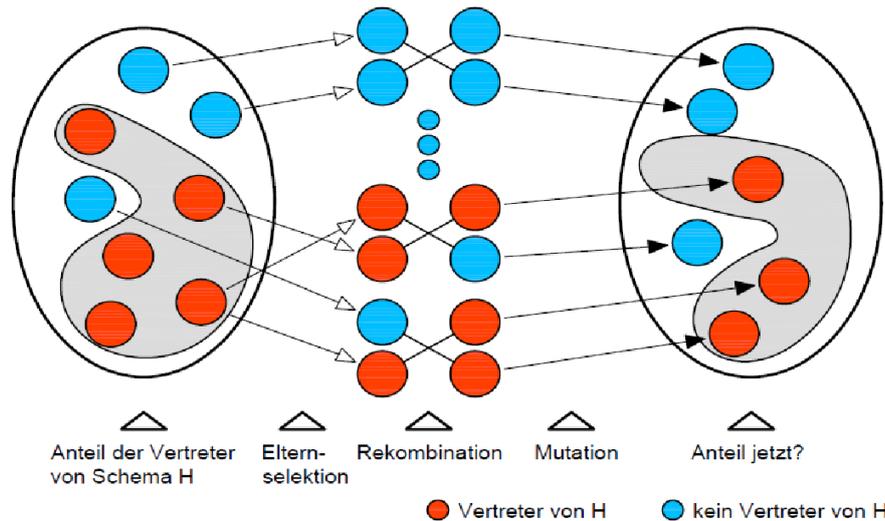


Abbildung 18: Untersuchungsgegenstand des Schematheorems: Wie verändert die einmalige Anwendung von Elternselektion, Rekombination und Mutation den Anteil der Instanzen eines Schemas in der Population? (Erstellt von Martin Berchthold, technischer Angestellter am Lehrstuhl für Agrarsystemtechnik der Technischen Universität München).

Um den Effekt zu erreichen, dass qualitativ hochwertige Formae überproportional stark wachsen (Abb. 19), müssen durch die Formae beschriebenen Eigenschaften der Lösungskandidaten, das Optimierungsproblem und die betrachteten Operatoren zusammenpassen. Im Folgenden werden einige Regeln vorgestellt, die den gewünschten Effekt nachhaltig unterstützen. Zunächst müssen die Formae die Population so partitionieren, dass sich während des Optimierungsprozesses die beobachteten Güterwerte verschiedener Formae wesentlich unterscheiden und auch tatsächlich repräsentativ für die Formae sind. Dadurch wird der erste Term  $p_{sel}(\Delta, t)$  aussagekräftiger. Zwei Regeln lassen sich hierfür formulieren: Erstens soll die Dekodierfunktion eine minimale Redundanz aufweisen, d. h. jede Information im Genotyp  $\mathcal{G}$  soll auch zusätzliche Information liefern. Idealerweise stellt daher die Dekodierfunktion eine Bijektion dar. Ist dies nicht möglich, existieren mindestens zwei Individuen  $A$  und  $B$  mit  $A.G, B.G \in \mathcal{G}$  ( $A.G \neq B.G$ ), die durch die Dekodierfunktion  $dec$  auf denselben Wert  $dec(A.G) = dec(B.G)$  abgebildet werden. Dann sollten die Individuen in denselben Formae enthalten sein, d. h.  $[A.G]_{\sim_{Merk}} = [B.G]_{\sim_{Merk}}$ . Damit wird gewährleistet, dass die den Formae zugrundeliegenden Eigenschaften phänotypisch relevant sind. Zweitens sollen darüber hinaus Individuen mit ähnlicher Güte oder phänotypischer Ausprägung in einer Forma zusammengefasst werden - das Prinzip der Ähnlichkeit in Formae. Dadurch wird der Kritik am Schema-Theorem hinsichtlich der hohen Gütevarianz bei kleinen Populationen entgegengewirkt. Dies sollte insbesondere für Merkmale mit geringer Genauigkeit gelten, da für solche Formae leicht Informationen angesammelt werden können - allerdings auch meist nur mit einer sehr hohen Varianz oder Fehlerrate. Nach der Baustein-Hypothese sollen sich kleine positive Eigenschaften an Individuen zu großen (hoffentlich auch positiven) Eigenschaften verbinden. Dies ist bei den Formae nur dann möglich, wenn die zugrundeliegende Eigenschaft eine mannigfaltige Granularität aufweist und es feingranulare Formae gibt, die Teil grobgranularer Formae werden können. Mathematisch kann man dies über einen geforderten Abschluss gegen den Schnitt von Formae formulieren d. h.

$$\forall \text{Formae } \Delta, \Delta' \exists \text{Forma } \Delta'' \text{ mit } \Delta \cap \Delta' = \Delta''.$$

Abschließend muss die Rekombination die Kombination der verschiedenen Merkmale und deren Wachstum in der Population entsprechend unterstützen. Diesbezüglich werden drei unterschiedliche Aspekte im Weiteren vorgestellt. Erstens sollte der Rekombinationsoperator eine betrachtete Forma möglichst erhalten, d. h. die Wahrscheinlichkeit  $p_{rek}$  sollte möglichst groß sein. Dies wird unter anderem durch eine Verträglichkeit der Formae mit dem Rekombinationsoperator erreicht, die besagt, dass alle möglichen Nachkommen zweier Instanzen einer Forma ebenfalls eine Instanz der Forma sind, d. h.

$$\forall \text{Forma } \Delta \forall \text{Individuen } A, B \text{ mit } A.G, B.G \in \Delta \forall \xi : Rek^\xi(A, B).G \in \Delta^2.$$

Neben der Eigenschaft, dass gemeinsame Eigenschaften der Eltern auf die Kinder übergehen, sollte sich zusätzlich jede im Kindindividuum auftretende Eigenschaft auf mindestens ein Elternindividuum zurückführen lassen. Man spricht auch von der Übertragung von Genen oder phänotypischen Allelen. Dies wird vor allem für die Merkmale mit geringer Genauigkeit formuliert, die sich nicht weiter zerlegen lassen, d. h.

$$\begin{aligned} \forall \text{Individuen } A, B \forall \xi \forall \text{Forma } \Delta, \Delta' \text{ aus } \mathcal{G}/\sim_{Merk} \text{ mit } |\mathcal{G}/\sim_{Merk}| \text{ minimal: } Rek^\xi(A, B).G \in \\ \Delta \times \Delta' \Rightarrow \exists \text{Forma } \Delta'', \Delta''' \text{ aus } \mathcal{G}/\sim_{Merk} \text{ (mit } |\mathcal{G}/\sim_{Merk}| \text{ minimal):} \\ A.G \in \Delta'' \vee B.G \in \Delta'''. \end{aligned}$$

Ist dieses Entwurfsprinzip erfüllt, handelt es sich um einen rein kombinierenden Operator. Andernfalls wird der Rekombinationsoperator als auch implizite Mutation bezeichnet. Und drittens sollte ein Rekombinationsoperator auch alle möglichen Kombinationen von verschiedenen Merkmalen erzeugen können. Dies ist die Verschmelzungseigenschaft, d. h.

$$\forall \text{verträglichen Formae } \Delta, \Delta' \forall \text{Ind. } A \text{ mit } A.G \in \Delta \forall B \text{ Ind. mit } B.G \in \Delta' \exists \xi : \\ \text{Rek}^\xi(A, B).G \in (\Delta \cap \Delta')^2.$$

**Korollar 4:** Werden diese Forderungen an das Optimierungsproblem, die Formae, und den Rekombinationsoperator gestellt, so sollte sich der positive Effekt des Schema-Theorems auch bei den genetischen Algorithmen FEGA und DEGA einstellen und die Voraussetzungen des in He und Kang (1999) formulierten globalen Konvergenztheorems (Theorem 6) für elitäre genetische Algorithmen sichern.

*Beweis.* Sei dazu  $|f(x)| > \infty$  für alle  $x \in X := \Omega$  und  $\Omega$  o. B. d. A. endlich (der Populationsraum ist in den weiteren Betrachtungen endlich). Dann ist die Menge der globalen Minima von  $f$  gegeben durch  $S_{opt} := \{x \in \Omega; |f(x) - f_{\min}| = 0\}$ . Ferner bezeichne die Menge  $X^{N \in \mathbb{N}}$  den Populationsraum und es sei  $S_{opt}^N := \{x \in X^{N \in \mathbb{N}}; \exists y \in x, y \in S_{opt}\}$ . Sei nun  $\xi(t)$  die Population zur Zeit  $t$ ,  $\xi_R(t)$  die Population zur Zeit  $t$  nach einer Rekombination,  $\xi_M(t)$  die Population zur Zeit  $t$  nach einer Mutation und  $\xi_S(t)$  die Population zur Zeit  $t$  nach einer Selektion, wobei jede der Populationen durch eine zur Zeit  $t$  gehörige Zufallsvariable eines stochastischen Prozesses gegeben sei, und  $\xi(t+1)$  gegeben durch  $\xi(t+1) = \xi_S(t)$ . Dann ist auch  $\xi(t+1)$  als Kompositum von Zufallsvariablen eine Zufallsvariable zur Zeit  $t$  eines stochastischen Prozesses. Mit der diskreten Gleichverteilung (Laplace-Verteilung)  $P$  auf  $X^N$  werden dazu Übergangsmatrizen wie folgt definiert:

$$\begin{aligned} P_R(t) &= (P_R(t; x, y))_{x, y \in X^N}, \\ P_R(t; x, y) &:= P(\xi_R(t) = y \mid \xi(t) = x), \\ P_M(t) &= (P_M(t; x, y))_{x, y \in X^N}, \\ P_M(t; x, y) &:= P(\xi_M(t) = y \mid \xi(t) = x), \\ P_S(t) &= (P_S(t; x, y))_{x, y \in X^N}, \\ P_S(t; x, y) &:= P(\xi_S(t) = y \mid \xi(t) = x). \end{aligned}$$

Dann folgt für die nicht stationäre Markovkette  $\{\xi(t); t = 1, 2, 3, \dots\}$  mit der Kolmogorov-Chapman-Gleichung

$$P(t; x, y) = P(\xi(t+1) = y \mid \xi(t) = x) = \sum_{u \in X^{N \in \mathbb{N}}} \sum_{v \in X^{N \in \mathbb{N}}} P_R(t; x, u) P_M(t; u, v) P_S(t; v, y)$$

mit Übergangsmatrix  $P(t) := P_R(t) P_M(t) P_S(t)$ .

Ferner seien die folgenden Voraussetzungen erfüllt:

$$\begin{aligned} \xi_R(t+1) &\in S_{opt}^N \text{ für } \xi(t) \in S_{opt}^N \text{ (Elitäre Strategie),} \\ \text{Für } (P_R(t))_{t=1,2,3,\dots} &\exists P_R : \lim_{t \rightarrow \infty} \|P_R(t) - P_R\|_\infty = 0, \end{aligned}$$

$$\sum_{t=1}^{\infty} \sup_{m>0} \|P_R(m+t) - P_R\|_{\infty} < \infty;$$

$\xi_M(t+1) \in S_{\text{opt}}^N$  für  $\xi_R(t) \in S_{\text{opt}}^N$  (Elitäre Strategie),

Für  $(P_M(t))_{t=1,2,3,\dots} \exists P_M : \lim_{t \rightarrow \infty} \|P_M(t) - P_M\|_{\infty} = 0$ ,

$$\sum_{t=1}^{\infty} \sup_{m>0} \|P_M(m+t) - P_M\|_{\infty} < \infty;$$

$\xi_S(t+1) \in S_{\text{opt}}^N$  für  $\xi_M(t) \in S_{\text{opt}}^N$  (Elitäre Strategie),

Für  $(P_S(t))_{t=1,2,3,\dots} \exists P_S : \lim_{t \rightarrow \infty} \|P_S(t) - P_S\|_{\infty} = 0$ ,

$$\sum_{t=1}^{\infty} \sup_{m>0} \|P_S(m+t) - P_S\|_{\infty} < \infty;$$

$\exists t_0$  derart dass  $\forall x \in X^{N \in \mathbb{N}} \forall y \in S_{\text{opt}}^N \exists \delta(x, y) > 0$  so dass  $\forall m : P(m, m+t_0; x, y) > \delta(x, y)$ .

Sei nun  $P_{\xi}(t)$  das zu  $\xi(t), t = 1, 2, 3, \dots$  gehörige Wahrscheinlichkeitsmaß (Verteilung von  $\xi(t)$  unter  $P(t)$ ). Dann konvergiert  $P_{\xi}(t)$  für  $t \rightarrow \infty$  gegen ein Wahrscheinlichkeitsmaß  $P_*$ , falls  $\lim_{t \rightarrow \infty} \|P_{\xi}(t) - P_*\|_{\infty} = 0$ . Gilt ferner  $P_*(A) = 1$  für eine Teilmenge  $A$  von  $X^{N \in \mathbb{N}}$ , so konvergiert  $(P_{\xi}(t))_{t=1,2,3,\dots}$  global gegen  $A$ .

Damit kann die Aussage des Theorem 6 in He und Kang (1999) wie folgt formuliert werden:

Es ist  $P_*(S_{\text{opt}}) = 1$  und es gilt für jedes  $\xi(0)$  die Abschätzung

$$\|P_{\xi}(t) - P_*\|_{\infty} \leq \inf \left\{ (1 - \delta)^{\lfloor \frac{t}{t_0} \rfloor - 1} + \sum_{k=l}^{\infty} \frac{a_k}{\delta}; t_0 \leq l < t \right\} \rightarrow 0, t \rightarrow \infty$$

wobei  $\sum_{k=1}^{\infty} a_k, a_k := \sup_{m'>0} \sup_{m''>0} \|P(m'+k) - P(m''+k)\|_{\infty}$  konvergiert und  $0 < \delta \leq 1$  gilt.

*Beweis.* He und Kang (1999). □

□

**In Worten:** Mit zunehmender Iterationszahl und kleinen Änderungen in der Matrix  $P(t)$  strebt bei elitärer Strategie (Übernahme eines globalen Optimums in Form desselben oder eines anderen globalen Optimums in die nächste Population) die Wahrscheinlichkeit, eine Optimallösung zu erhalten, gegen 1.

**Bemerkung 17:** Da sich jede Gleichung durch zwei Ungleichungen der Form  $\dots \leq 0$  darstellen lässt, bezeichne  $W$  o. B. d. A. die Summe der Nebenbedingungsverletzungen eines Individuums. Dann wird die Relation "  $Z_1$  ist besser als  $Z_2$  " für zwei Individuen  $Z_1, Z_2$  wie folgt definiert:

$$Besser(Z_1, Z_2) := \begin{cases} \text{True, falls } W(Z_1) < W(Z_2) \\ \text{False, falls } W(Z_1) > W(Z_2) \\ \text{True, falls } (W(Z_1) = W(Z_2)) \wedge (Z_1.F \leq Z_2.F) \\ \text{False, falls } (W(Z_1) = W(Z_2)) \wedge (Z_1.F > Z_2.F). \end{cases}$$

**Bemerkung 18:** Sind keine Nebenbedingungen vorhanden, so fokussiert sich Besser ausschließlich auf den Vergleich der Güterwerte der beiden Individuen  $Z_1, Z_2$ .

**Bemerkung 19:** Wird FEGA zur Lösung beliebiger gemischt-ganzzahliger Optimierungsaufgaben verwendet, so werden die nichtganzzahligen Werte, wo Ganzzahligkeit gefordert wird, vor dem Einsetzen in die Nebenbedingungen und in die Zielfunktion abgerundet.

## 4.2 Optimierungsproblem aus 3 und Dijkstra-Algorithmus

Zulässigkeitsbereich ein Minimum besitzt. Zunächst definiert die Zielfunktion aus Abschnitt 3 eine stetige Funktion über dem  $\mathbb{R}^p$ ,  $p \in \mathbb{N}$  passend gewählt. Nach Satz 3 a sind auch alle ihre Restriktionen stetig. Ferner lassen sich die Zulässigkeitsbereiche der einzelnen Gleichungen und Ungleichungen jeder Instanz des Optimierungsproblem aus 3 jeweils als Urbild einer abgeschlossener Menge unter einer passenden wie oben bereits erwähnten auch stetigen Restriktion  $f: T \subseteq \mathbb{R}^p \rightarrow \mathbb{R}$  schreiben. Diese Urbilder sind nach Satz 3 c abgeschlossen in  $T$ . Der Zulässigkeitsbereich jeder Instanz des Optimierungsproblem aus Abschnitt 3 ergibt sich nun als Schnitt über die soeben genannten abgeschlossenen Urbilder. Nach Satz 3 d ist dieser Schnitt ebenfalls abgeschlossen in  $T$ . Da in jeder Instanz des Optimierungsproblems aus Abschnitt 3 Variablenrestriktionen in Form von kompakten Intervallen gefordert werden, ist der soeben genannte Schnitt auch beschränkt. Nach Satz 3 g, h ist er also kompakt in  $T$ . Deshalb besitzt nach Satz 3 b jede Instanz des Optimierungsproblems aus Abschnitt 3 mit nichtleerem Zulässigkeitsbereich ein (globales) Minimum, nach dem (denen) im Weiteren gesucht wird.

**Satz 6 (Existenz von Optima):** a) Jede Instanz des Optimierungsproblems aus Abschnitt 3 mit nichtleerem Zulässigkeitsbereich besitzt ein Minimum.

*Beweis.* Die Behauptung folgt aus den obigen Betrachtungen. □

**Bemerkung 20:** Ein (globales) Minimum bedeutet im obigen Kontext, dass zwar ein (globales) Minimum existiert, aber eventuell auch mehrere (globale) Minima existieren können. Eine Verschärfung wäre der Zusatz "genau ein", der aber hier nicht weiter verfolgt wird.

Nun wird geklärt, wie die Kostenkoeffizienten  $c_{ij}$  der Zielfunktionen der einzelnen Optimierungsprobleme aus 3 zu wählen sind. Dazu der folgende Satz:

**Satz 7 (Kostenkoeffizienten):** Die Kostenkoeffizienten  $c_{ij}$  der Zielfunktion des Optimierungsproblems aus Abschnitt 3 ergeben sich bei nichtleerem Zulässigkeitsbereich als Lösung binärer linearer Programme der Form

$$c_{ij} = \min_{(i,j) \in A} c_{ij} x_{ij}, c_{ij} > 0$$

jeweils für jedes Fahrzeug und jede Einsatzzeit passend gewählt (Zielfunktion),

$$\text{u. d. N. } \sum_{k \in V^+(i)} x_{ik} = 1 \text{ für } i = y, (\text{Start}),$$

$$\begin{aligned} \sum_{k \in V^+(i)} x_{ik} - \sum_{k \in V^-(i)} x_{ki} &= 0 \text{ für } i \in V \setminus \{y, z\}, \text{ (Quelle-Senke),} \\ \sum_{k \in V^-(i)} x_{ki} &= 1 \text{ für } i = z, \text{ (Ziel),} \\ x_{ij} &\in \{0, 1\} \text{ für alle } (i, j) \in A \text{ (Variablen),} \end{aligned}$$

vgl. auch (Wörz et al., 2013, 2014, Gaese et. al, 2013, 2014). Dabei bezeichne  $A$  die Menge der Kanten,  $V^+(i)$  die Nachfolgermenge eines Knoten  $i$  und  $V^-(i)$  die Vorgängermenge eines Knoten  $i$ . Ferner nehme  $(y, z)$  folgende Paare an:  $(y = \text{Silo}, z = \text{Schlag})$  und  $(y = \text{Schlag}, z = \text{Silo})$ .

*Beweis.* Zunächst ist zu bemerken, dass ein Weg zwischen zwei verschiedenen Punkten in einem gerichteten Graphen genau dann minimale Kosten besitzt, wenn alle Teilwege dazwischen minimale Kosten besitzen, was sofort aus der Definition der Länge eines Weges folgt (vgl. Definition 6). Angenommen  $x^*$  sei eine optimale Lösung des Optimierungsproblems aus Abschnitt 3 und es existiere eine dazugehörige Problem Instanz  $I$  mit nicht minimalen Kostenkoeffizienten. Dann könnten nach Satz 3 mit den obigen binären linearen Programmen für die nicht minimalen Kostenkoeffizienten minimale Kostenkoeffizienten bestimmt werden. Werden nun die nicht minimalen Kostenkoeffizienten durch die soeben berechneten minimalen Kostenkoeffizienten ersetzt, so resultiert eine neue Problem Instanz  $I'$ , für die  $x^*$  nicht notwendigerweise optimal, aber zulässig ist. Ist  $x^*$  allerdings optimal, so schadet die Ersetzung der nicht minimalen Kostenkoeffizienten durch die minimalen Kostenkoeffizienten nicht. Ist aber  $x^*$  nicht optimal, so kann nach Satz 6 a eine optimale Lösung  $x^{**}$  für die Problem Instanz  $I'$  bestimmt werden. Die Lösung  $x^{**}$  liefert dann für die Problem Instanz  $I'$  einen kleineren Zielfunktionswert als die Lösung  $x^*$ . Somit ist auch eine bessere Lösung für das Optimierungsproblem aus Abschnitt 3 gefunden, was der Tatsache widerspricht, dass  $x^*$  eine optimale Lösung des Optimierungsproblems aus Abschnitt 3 ist.  $\square$

**Satz 6 (Fortsetzung: Existenz von Optima):** b) Das Optimierungsproblem aus Abschnitt 3 besitzt ein Minimum, falls die Problem Instanz mit minimalen Kostenkoeffizienten einen nichtleeren Zulässigkeitsbereich besitzt.

*Beweis.* Nach Satz 6 a besitzt die Problem Instanz  $I$  mit minimalen Kostenkoeffizienten und nichtleerem Zulässigkeitsbereich ein Minimum  $x$ . Angenommen  $x$  ist keine optimale Lösung des Optimierungsproblems aus Abschnitt 3. Dann existiert eine Problem Instanz  $I'$  mit nicht minimalen Kostenkoeffizienten, nichtleerem Zulässigkeitsbereich und einem Minimum  $y$  derart, dass  $y$  auch für  $I$  zulässig ist und einen kleineren Funktionswert liefert als  $x$ , ein Widerspruch zur Tatsache, dass  $x$  ein Minimum von  $I$  ist.  $\square$

**Bemerkung 21:** Da die obigen binären linearen Programme relativ aufwendig zu lösen sind, wird zu deren Lösung der Dijkstra-Algorithmus verwendet. Die Nebenbedingungen der obigen binären linearen Programme repräsentieren einen gerichteten Graphen mit positiven Kantengewichten, sodass einer Anwendung des Dijkstra-Algorithmus nichts im Wege steht.

**Bemerkung 22:** Ferner muss noch mittels der binären linearen Programme aus Satz 7 für die Transportfahrzeuge die kostengünstigste Route für die Paare  $(y = \text{Silo}, z =$

Lohnunternehmer), ( $y = \text{Lohnunternehmer}, z = \text{Silo}$ ) bestimmt werden. Dabei wird zur dessen Lösung wie in Bemerkung 25 ebenfalls der Dijkstra-Algorithmus verwendet, vgl. auch (Wörz et al., 2013, 2014, Gaese et. al, 2013, 2014).

### 4.3 Transformation des Optimierungsproblems aus 3 in ein kombinatorisches Optimierungsproblem

In diesem Abschnitt wird das reell kodierte Optimierungsproblem aus dem Abschnitt 3 in kombinatorisches Optimierungsproblem überführt. Dazu müssen die meist reellwertigen Optimierungsvariablen in der Zielfunktion und in den Nebenbedingungen der einzelnen Optimierungsprobleme über einen kombinatorischen Optimierungskalkül mit einem kombinatorischen Lösungsraum in Verbindung gebracht werden. Über diesen Lösungsraum soll dann die Optimierung gesteuert werden. Dies motiviert die folgende Definition:

**Definition 25 (Serviceauftrag, Route):** Es bezeichne  $n \in \mathbb{N}$  die Anzahl der Serviceaufträge. Ein Serviceauftrag ist eine Sequenz bestehend aus einer Beladung zur Zeit  $t$  und der dazugehörigen Entladung zur Zeit  $t + \Delta t, \Delta t > 0$ . Eine Route ist ein Vektor mit der ersten Komponente 0, mit zweiter Komponente Beladung, dritter Komponente der zu Beladung gehörigen Entladung, vierter Komponente Beladung, fünfter Komponente der zu Beladung gehörigen Entladung, ... und der letzten Komponente  $2n + 1$ . Dabei definieren die Sequenzen  $\text{Sequenz}_1 = \text{Entladung, Beladung, Sequenz}_2 = \text{Entladung, Beladung, ...}$  die Serviceaufträge und somit die Länge der Route. Eine Route heißt zeit-chronologisch geordnet, wenn ihre Serviceaufträge zeit-chronologisch geordnet sind.

Wie in Abschnitt 3 beschrieben, können mithilfe der Nebenbedingungen die frühesten und spätesten optimalen Ankunftszeiten für die Be- und Entladestellen berechnet werden. Diese frühesten und spätesten optimalen Ankunftszeiten induzieren nun Zeitfenster für die jeweilige Be- und Entladung, also nach der obigen Definition Zeitfenster für den Servicebeginnzeiten der jeweiligen Serviceaufträge. Durch ein Clustering der zu bearbeitenden Serviceaufträge können diese in Cluster eingeteilt werden. Diese Cluster, genauer die Serviceaufträge in diesen Clustern, können jeweils an einzelne Fahrzeuge aus einem Satz von Fahrzeugen zugewiesen werden. Durch zeit chronologisches Ordnen der Serviceaufträge eines Fahrzeuges entsteht dann eine zeit-chronologisch geordnete Route. Dabei induziert jeder Serviceauftrag eine optimale Ankunftszeit, eine optimale Servicebeginnzeit, eine optimale Abfahrtszeit und eine optimale Wartezeit, die sich als Differenz der optimalen Servicebeginn- und der Ankunftszeit ergibt. Ferner induziert die Differenz aus optimaler Abfahrts- und Servicebeginnzeit eine optimale Servicezeit und die Differenz aus der optimalen Servicebeginnzeit an der Entladestelle und der optimalen Abfahrtszeit an der Beladestelle eine optimale Transportzeit. Darüber hinaus können jedem Serviceauftrag Transportkosten zugeordnet werden. Enthält eine Route keine Serviceaufträge, so wird das dazugehörige Transportfahrzeug nicht benutzt. Es zeigt sich, dass über die Serviceaufträge der zeit-chronologisch geordneten Routen die einzelnen Optimierungsvariablen identifiziert werden können. Deshalb kann als kombinatorischer Lösungsraum die Menge aller zeit-chronologisch geordneten Routen eines Satzes von Transportfahrzeugen gewählt werden. Im nächsten Abschnitt wird die Mächtigkeit dieses endlichen Lösungsraums bestimmt.

#### 4.4 Das kombinatorische Optimierungsprobleme ist NP-hart

Zunächst wird eine Abschätzung für die Größe des Lösungsraums des kombinatorischen Problems aus dem letzten Abschnitt für homogene Transportfahrzeuge gegeben, bevor gezeigt wird, dass es NP-hart ist. Es wird dazu die Anzahl  $|K|$  der homogenen Fahrzeuge, die Anzahl der Serviceaufträge  $n$  und die Menge  $VS := \{(k_1, \dots, k_{|K|}) \in \mathbb{N}_0^{|K|}; k_1 + \dots + k_{|K|} = n\}$  betrachtet. Letztere gibt an, wie die Serviceaufträge auf die einzelnen Fahrzeuge verteilt werden können. Ihre Mächtigkeit entspricht deshalb der Größe des Lösungsraums. Da die einzelnen Serviceaufträge zeit-chronologisch nach den frühesten- und spätesten optimale Beladezeiten abgearbeitet werden müssen, gibt es  $\binom{n}{k_1}$  Möglichkeiten ( $k_1 \leq n$ ), dem Fahrzeug 1  $k_1$  Serviceaufträge zuzuweisen. Nach der Zuweisung der  $k_1$  Serviceaufträge an Fahrzeug 1, gibt es noch  $\binom{n-k_1}{k_2}$  Möglichkeiten ( $k_2 \leq n - k_1$ ), dem Fahrzeug 2  $k_2$  Serviceaufträge zuzuweisen. So fortfahrend gibt es noch  $\binom{n-k_1-\dots-k_{|K|-1}}{k_{|K|}}$  Möglichkeiten  $k_{|K|} \leq n - k_1 - \dots - k_{|K|-1}$ , dem Fahrzeug  $|K|$   $k_{|K|}$  Serviceaufträge zuzuweisen. Insgesamt gibt es

$$\binom{n}{k_1} \binom{n-k_1}{k_2} \dots \binom{n-k_1-\dots-k_{|K|-1}}{k_{|K|}} = \frac{n!}{k_1! k_2! \dots k_{|K|}!}$$

Möglichkeiten, die  $k_1$  Serviceaufträge auf Fahrzeug 1,  $k_2$  Serviceaufträge auf Fahrzeug 2, ..., und  $k_{|K|}$  Serviceaufträge auf Fahrzeug  $|K|$  zu verteilen. Um zu bestimmen, wie viele Möglichkeiten es insgesamt gibt,  $n$  Serviceaufträge auf  $|K|$  Fahrzeuge zu verteilen, wird nun der Multinomialssatz benutzt. Er lautet:

**Satz 8 (Multinomialssatz):** Für  $n \in \mathbb{N}_0$  und  $x_1, \dots, x_r \in \mathbb{R}, r \in \mathbb{N}$  gilt

$$(x_1 + \dots + x_r)^n = \sum_{(k_1, \dots, k_r) \in \mathbb{N}_0^r: k_1 + \dots + k_r = n} \frac{n!}{k_1! \dots k_r!} x_1^{k_1} \dots x_r^{k_r}.$$

*Beweis.* Die Behauptung ergibt sich aus den obigen Ausführungen. □

Wird nun in diesem Satz  $x_1 = \dots = x_r = 1$  gesetzt, so folgt

$$r^n = \sum_{(k_1, \dots, k_r) \in \mathbb{N}_0^r: k_1 + \dots + k_r = n} \frac{n!}{k_1! \dots k_r!}.$$

Wird nun weiter  $r = |K|$  gesetzt, so folgt

$$|K|^n = \sum_{(k_1, \dots, k_{|K|}) \in \mathbb{N}_0^{|K|}: k_1 + \dots + k_{|K|} = n} \frac{n!}{k_1! \dots k_{|K|}!}.$$

**Satz 9 (Größe des Lösungsraums für homogene Transportfahrzeuge):** Es gibt es  $|K|^n$  Möglichkeiten,  $n$  Serviceaufträge zeit-chronologisch auf  $|K|$  homogene Fahrzeuge zu verteilen.

*Beweis.* Die Behauptung ergibt sich aus den obigen Ausführungen. □

**Bemerkung 23:** Bei 5 homogenen Transportfahrzeugen und 30 Serviceaufträgen entspricht das schon  $5^{30} = 931322574615478515625$  Möglichkeiten, 30 Serviceaufträge zeit-chronologisch auf 5 homogene Transportfahrzeuge zu verteilen.

**Bemerkung 24:** Die Größe des Lösungsraums zeigt noch nicht, dass das kombinatorische Optimierungsproblem NP-hart ist.

Es wird nun gezeigt, dass das kombinatorische Optimierungsproblem tatsächlich NP-hart ist. Dazu wird das Taveling Salesman Problem with Time Windows (TSPTW) (Ascheuer et al. (2000), Ascheuer et al. (2001), Baker (1983), Balas et al. (1995), Balas und Simonetti (2001), Caseau und Koppstein (1992), Caseau und Laburthe (1994), Caseau und Laburthe (1996), Caseau und Laburthe (1997), Desrochers et al. (1992), Desrosiers et. al. (1995), Dumas et al. (1995), Focacci et al. (1999 b), Focacci et al. (2002), Langevin et al. (1993), Mingozi et al. (1997), Pesant et al. (1998), Pesant et al. (1999), Solomon (1987), Taillard et al. (1993)) und positiven Kantengewichten betrachtet. Beim Travelling Salesman Problem with Time Windows geht es um die Ermittlung einer Rundtour minimaler Kosten, die jede von  $n \in \mathbb{N}$  Städten innerhalb vorgegebener Zeitfenster genau einmal besucht. Dieses TSPTW ist nach (Baugh et al., (1998), Savelsberg (1985)) NP-hart. Es sei nun  $L_{TSPTW}$  die Sprache, die aus allen lösbaren Travelling Salesman Probleminstanzen mit Zeitfenstern besteht. Diese Sprache wird nun mittels einer polynomialen Transformation in eine Sprache transformiert, die zum Beweis geeignet ist, dass das kombinatorische Optimierungsproblem NP-hart ist. Zu jedem Knoten  $i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) eines lösbaren TSPTW außer dem Startknoten werden zwei Knoten  $\{i, n + i\}$  mit einem Turing-Aufwand von  $O(n)$  konstruiert. Ferner werden zum Startknoten 0 des TSPTW zwei Knoten  $\{0, 2n + 1\}$  konstruiert. Die Knoten  $i, i = 1, \dots, n$  des geordneten Paares  $\{i, n + i\}$  werden nun mit einem Turing-Aufwand von  $O(n)$  mit den Zeitfenstern für die Beladungen versehen, da es genügt, entweder die optimale Be- oder Entladungszeit für das kombinatorische Optimierungsproblem anzugeben. Ferner werden die Knoten  $\{i, n + i\}$  für  $i = 1, \dots, n$  und  $\{0, 2n + 1\}$  mit einem Turing-Aufwand von  $O(n)$  durch 0-Kanten verbunden. Sodann - es sei bemerkt, dass die Abbildung

$$\pi : \{0, \dots, n\} \rightarrow \{\{i, n + i\}; i = 1, \dots, n\} \cup \{\{0, 2n + 1\}\}, \begin{cases} i \mapsto \{i, n + i\}, i = 1, \dots, n \\ 0 \mapsto \{0, 2n + 1\} \end{cases}$$

bijektiv ist - werden die gerichteten 0-Kanten  $\overline{\{i, n + i\}}$  für  $i = 1, \dots, n$  mit einem Turing-Aufwand von  $O(n^2)$  untereinander durch Kanten verbunden. Dabei wird für  $i = 1, \dots, n$  der Endpunkt einer Kante  $\overline{\{i, n + i\}}$  mit dem Anfangspunkt einer anderen Kante  $\overline{\{j, n + j\}}$ ,  $j > i$ , verbunden und diese Kanten mit den dazugehörigen Kostenkoeffizienten des kombinatorischen Optimierungsproblems (Satz 7) belegt, die, da  $\mathbb{Q}$  dicht in  $\mathbb{R}$  liegt, als rational angenommen werden können. Alle übrigen Kanten erhalten das Kantengewicht  $\infty$ . Ferner wird der Knoten 0 mit jedem Knoten  $i, i = 1, \dots, n$  und jeder Knoten  $i + n, i = 1, \dots, n$  mit dem Knoten  $2n + 1$  mit einem Turing-Aufwand von  $O(n)$  durch Kanten verbunden und mit einem Kantengewicht versehen. Die Kantengewichte ergeben sich dabei wiederum als Kostenkoeffizienten des kombinatorischen Optimierungsproblems (Satz 7). Dadurch entsteht ein gerichteter Graph, der das kombinatorische Optimierungsproblem repräsentiert. Das Kompositum der einzelnen polynomialen Transformationen stellt deshalb nach Korollar 1 eine polynomiale Transformation dar, (wobei sich ihr Turing-Aufwand zu  $O(n^2)$  ergibt). Deshalb ist nach Korollar 2 das kombinatorische Optimierungsproblem NP-hart.

**Satz 10:** Das kombinatorische Optimierungsproblem ist NP-hart.

*Beweis.* Der Satz folgt aus den obigen Ausführungen. □

## 4.5 Umordnungs-, Umverteilungs- und Austauschoperatoren für homogene Abfuhrgespanne

Mittels einer Startheuristik (Distributionsheuristik), die in den nächsten Abschnitten näher erläutert wird, erfolgt zunächst ein mehrmaliges Clustering der Serviceaufträge und eine mehrmalige zeit-chronologische Zuweisung an die einzelnen Fahrzeuge, was gleichbedeutend damit ist, dass zeit-chronologische geordnete Starttrouten zu einem Satz an Fahrzeugen generiert werden.

**Bemerkung 25:** Ein Serviceauftrag besteht also aus einer Be- und der dazugehörigen Entladung. Es kann vorkommen, dass eine Route im  $\mathbb{N}_0^2$  liegt. In diesem Fall wird das dazugehörige Fahrzeug nicht benutzt, da die Route keine Serviceaufträge enthält.

Meistens sind die zu einem Satz an Fahrzeugen entstehenden Starttrouten von schlechter Qualität, womit gemeint ist, dass die Stillstandszeiten der einzelnen Maschinen und die Gesamttransportkosten hoch sind. Wird nun eine Iterationsalgorithmus wie z. B. ein evolutionärer Algorithmus verwendet, so müssen die Serviceaufträge zwischen den einzelnen Routen eines jeweiligen Satzes an Fahrzeugen ausgetauscht, umverteilt und umgeordnet werden, um Routen mit besserer Qualität für den jeweiligen Satz an Fahrzeugen zu erhalten. Dies kann dadurch erreicht werden, dass mehrere Rekombinationsoperatoren  $Rek^\xi$  und ein Mutationsoperator  $Mut^\xi$  wie in Definition 17 konstruiert werden. Dabei müssen jedoch die einzelnen Routen eines jeweiligen Satzes an Fahrzeugen, da sie in der Regel unterschiedlich viele Serviceaufträge enthalten, monomorph in einen geeigneten Phänotyp bzw. Genotyp eingebettet werden. Vorab sei bemerkt, dass in der vorliegenden Arbeit als Dekodierungsfunktion die Identität verwendet wird. Es bezeichne dazu  $n \in \mathbb{N}$  die Anzahl der Serviceaufträge, 0 das Wiegen am Silo,  $i$  die  $i$ -te Beladung,  $n + i$  die dazugehörige  $i$ -te Entladung  $i$ ,  $j$  die  $j$ -te Beladung,  $n + j$  die dazugehörige  $j$ -te Entladung ( $i \neq j$ ) und  $2n + 1$  das Verharren am Silo. Dann kann als Genotyp bzw. Phänotyp die Menge

$$\mathcal{G} := \{0, \dots, 2n + 1\}^{2n+2}$$

gewählt werden, in den alle Routen, die immer mit der 0 beginnen und der  $2n + 1$  enden, und dazwischen die jeweiligen Serviceaufträge enthalten, durch so oftmaliges Anhängen der  $2n + 1$  an die  $2n + 1$  der jeweiligen Route, bis die jeweilige Route in  $\mathcal{G}$  liegt, eingebettet werden. Diese Einbettung besitzt also die folgende Bauart:

$$\iota: \text{Menge der Routen} \rightarrow \mathcal{G}, x \mapsto (x, 2n + 1, \dots, 2n + 1)$$

**Satz 11 (Einbettung):** Die Einbettung  $\iota$  ist wohldefiniert und bijektiv.

*Beweis.* Nach Konstruktion ist  $\iota(\bullet)$  ein Element von  $\mathcal{G}$ . Stimmen zwei Routen  $x$  und  $y$  überein, so stimmen sie auch nach ihrer Einbettung in  $\mathcal{G}$  überein. Das zeigt die Wohldefiniiertheit. Zwei verschiedene Routen  $x$  und  $y$  stimmen auch nach ihrer Einbettung in  $\mathcal{G}$  nicht überein. Das zeigt die Injektivität.  $\square$

**Bemerkung 26:** Wegen Satz 11 kann  $J(H)$  in Korollar 3 als Menge aller eingebetteten zeit-chronologischen Routen mit derselben Länge festgelegt werden. Dann gibt Korollar 3 Auskunft über die erwartete Fortpflanzung aller zeit-chronologischen Routen mit derselben Länge.

**Bemerkung 27:** Der Mutationsoperator (Abb. 15) besitzt in dieser Arbeit die Bauart:

$$\begin{aligned}
 & Mut^{\xi} : \mathcal{G} \times \mathcal{L} := \{\perp := \text{Keine Zusatzinfo}\} \rightarrow \mathcal{G} \times \mathcal{L}, \\
 & \left\{ \begin{array}{l}
 (\text{Nichtzeitchronologisch geordnete Route}, 2n+1, \dots, 2n+1, \perp) \\
 \mapsto (\text{Zeitchronologisch geordnete Route}, 2n+1, \dots, 2n+1, \perp) \\
 (\text{Zeitchronologisch geordnete Route}, 2n+1, \dots, 2n+1, \perp) \\
 \mapsto (\text{Zeitchronologisch geordnete Route}, 2n+1, \dots, 2n+1, \perp) \\
 (x, \perp) \mapsto (x, \perp), x \neq \text{Nichtzeitchronol. geordnete Route, Zeitchronol. geordnete Route}
 \end{array} \right.
 \end{aligned}$$

Zeit chronologisch bedeutet dabei, dass für  $i > j, i, j \in \{1, \dots, n\}$  die  $i$ -te Be- und  $n+i$ -te Entladung nicht vor der  $j$ -ten Be- und  $n+j$ -ten Entladung erfolgen kann, sondern die  $j$ -te Be- und  $n+j$ -te Entladung vor der  $i$ -ten Be- und  $n+i$ -ten Entladung erfolgt.

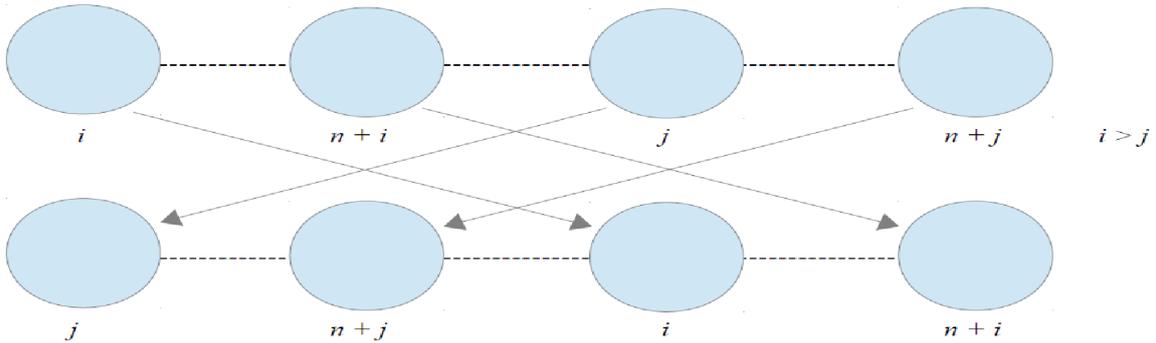


Abbildung 19: Umordnung der Serviceaufträge  $i, n+i$  und  $j, n+j, i > j$ .

**Bemerkung 28:** Zur Erfüllung der Gleichung

$$Mut^{\xi}((\text{Nichtzeitchronol. geordnete Route}, \perp)) = (\text{Zeitchronol. geordnete Route}, \perp)$$

wird in der Programmierung ein Sortieralgorithmus, in unserem Fall ein Quicksort mit mittlerem Aufwand von  $O(n \log n)$  und einem worst-case Aufwand  $O(n^2)$  (Hoare (1962), Sedgewick (1978)) verwendet (Abb. 20).

```

// Die Implementierung wurde der Pseudocode-Version des Hauptartikels von Hoare (1962)
nachempfunden.
public class Quicksort
{
    public static void Sort(ref int[] Array)
    {
        Quicksort(0, Array.Length - 1, ref Array);
    }
    private static void Quicksort(int Links, int Rechts, ref int[] Daten)
    {
        if (Links < Rechts)
        {
            int Teiler = Teile(Links, Rechts, ref Daten);
            Quicksort(Links, Teiler - 1, ref Daten);
            Quicksort(Teiler + 1, Rechts, ref Daten);
        }
    }
    private static int Teile(int Links, int Rechts, ref int[] Daten)
    {
        int i = Links;
        // Starte mit j links vom Pivotelement.
        int j = Rechts - 1;
        int Pivot = Daten[Rechts];
        do
        {
            // Suche von links ein Element, welches größer als das Pivotelement ist.
            while (Daten[i] <= Pivot && i < Rechts)
            {
                i += 1;
            }
            // Suche von rechts ein Element, welches kleiner als das Pivotelement ist.
            while (Daten[j] >= Pivot && j > Links)
            {
                j -= 1;
            }
            if (i < j)
            {
                int z = Daten[i];
                Daten[i] = Daten[j];
                // Tausche Daten[i] mit Daten[j].
                Daten[j] = z;
            }
        } while (i < j);
        // Solange i an j nicht vorbeigelaufen ist.
        // Tausche Pivotelement (Daten[Rechts]) mit neuer endgültiger Position (Daten[i]).
        if (Daten[i] > Pivot)
        {
            int z = Daten[i];
            Daten[i] = Daten[Rechts];
            // Tausche Daten[i] mit Daten[Rechts].
            Daten[Rechts] = z;
        }
        return i; // Gib die Position des Pivotelements zurück.
    }
}

```

Abbildung 20: Implementierung des Quicksort-Algorithmus in C#.

Für weitere Sortieralgorithmen siehe Aho et al. (1983), Bentley (1983), Bentley und McIlroy (1993), Bentley und Sedgewick (1997), Chaudhuri und Dempster (1993), Dijkstra (1976), Dobosiewicz (1978), Floyd Rivest (1975), Knuth (1973), Khreisat (2007), Loeser (1974), Martinez (2004), Matsumoto und Nishimura (1998), McDaniel (1991), Mehlhorn (1984), Motzkin (1984), Neubert (1997), Scowen (1965), Sedgewick (1977), Sedgewick (1998), Singleton (1969), Schoenhage (1976), Wainwright (1985, 1987), Wirth (1983) und Sundararajan und Chakraborty (2006). Dabei werden entweder die Beladungen oder Entladungen der Serviceaufträge einer Route aufsteigend sortiert und daraus die dazugehörigen Entladungen durch Addition der Anzahl der Serviceaufträge in der Route oder Beladungen durch Subtraktion der Anzahl der Serviceaufträge in der Route berechnet. Das Konkatenieren zusammengehöriger Be- und Entladungen gemäß der aufsteigenden Sortierung ergibt eine zeit-chronologisch geordnete Route. Die soeben beschriebene Prozedur entspricht einer mehrmaligen Anwendung des Umordnungsoperators, bis alle Serviceaufträge zeit-chronologisch geordnet sind.

Nachfolgend werden der Austausch- und die Umverteilungsoperatoren als Rekombinationsoperatoren formuliert. Der Austauschoperator dient zum Austauschen zweier verschiedener Serviceaufträge aus zwei verschiedenen zum einem Satz von Fahrzeugen gehörenden Routen. Um den Austauschoperator (Abb. 21) anwenden zu können, müssen die jeweiligen Routen mindestens einen Serviceauftrag enthalten. Wegen Satz 11 kann o. B. d. A. von zwei zeit-chronologisch geordneten Routen  $x = (0, \dots, i, n + i, \dots, 2n + 1)$  und  $y = (0, \dots, j, n + j, \dots, 2n + 1)$ ,  $i \neq j$ ,  $i, j \in \{1, \dots, n\}$  ausgegangen werden. Es werden nun der Serviceauftrag  $i, n + i$  gegen den Serviceauftrag  $j, n + j$  ausgetauscht. Dabei entstehen die Routen  $x' = (0, \dots, j, n + j, \dots, 2n + 1)$  und  $y' = (0, \dots, i, n + i, \dots, 2n + 1)$ . Für den Rekombinationsoperator empfiehlt sich folgende Bauart:

$$\begin{aligned}
 & \text{Rek}^{\xi} : (\mathcal{G} \times \mathcal{L})^2 \rightarrow (\mathcal{G} \times \mathcal{L})^2, \\
 & \left\{ \begin{array}{l} ((x, 2n + 1, \dots, 2n + 1, \perp), (y, 2n + 1, \dots, 2n + 1, \perp)) \\ \mapsto ((x', 2n + 1, \dots, 2n + 1, \perp), (y', 2n + 1, \dots, 2n + 1, \perp)) \\ a \mapsto a, a \neq ((x, 2n + 1, \dots, 2n + 1, \perp), (y, 2n + 1, \dots, 2n + 1, \perp)) \end{array} \right.
 \end{aligned}$$

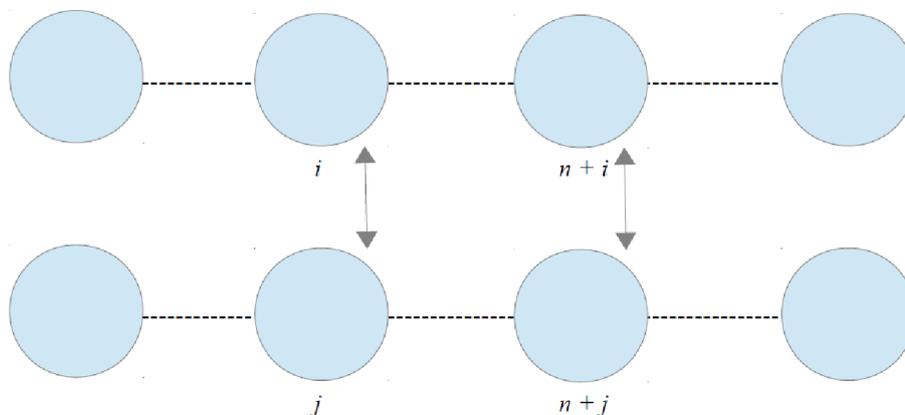


Abbildung 21: Austausch der Serviceaufträge  $i, n + i$  und  $j, n + j$ .

Es werden im Weiteren 2 Umverteilungsoperatoren betrachtet. Der erste Umverteilungsoperator (Abb. 22) entnimmt einer zum einem Satz von Fahrzeugen gehörenden Route einen Serviceauftrag und fügt ihn in eine andere Route zum selben Satz von Fahrzeugen gehörenden Route ein. Wegen Satz 11 kann o. B. d. A. von zwei zeit-chronologisch geordneten Routen  $x = (0, \dots, i, n + i, \dots, 2n + 1)$  und  $y = (0, \dots, 2n + 1), i \in \{1, \dots, n\}$  ausgegangen werden. Es wird nun der Serviceauftrag  $i, n + i$  aus der Route  $x$  entfernt und in die Route  $y$  eingefügt. Dabei entstehen o. B. d. A. die zeit-chronologisch geordnete Route  $x' = (0, \dots, 2n + 1)$  und die nicht notwendigerweise zeit-chronologisch geordnete Route  $y' = (0, \dots, i, n + i, \dots, 2n + 1)$ . Für den Rekombinationsoperator empfiehlt sich also folgende Bauart:

$$\text{Rek}^{\xi} : (\mathcal{G} \times \mathcal{L})^2 \rightarrow (\mathcal{G} \times \mathcal{L})^2,$$

$$\begin{cases} ((x, 2n + 1, \dots, 2n + 1, \perp), (y, 2n + 1, \dots, 2n + 1, \perp)) \\ \mapsto ((x', 2n + 1, \dots, 2n + 1, \perp), (y', 2n + 1, \dots, 2n + 1, \perp)) \\ a \mapsto a, a \neq ((x, 2n + 1, \dots, 2n + 1, \perp), (y, 2n + 1, \dots, 2n + 1, \perp)) \end{cases}$$

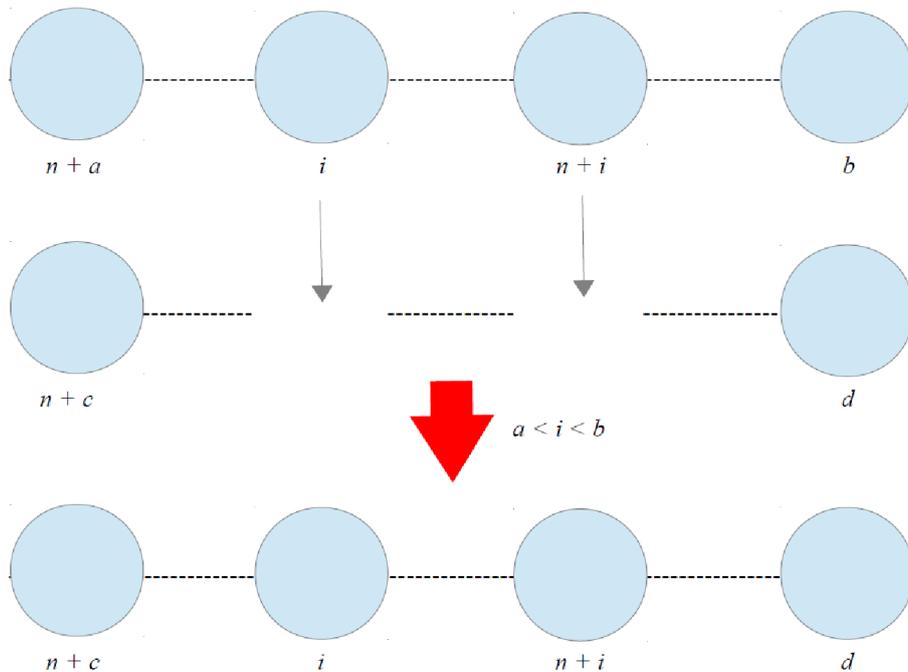


Abbildung 22: Umverteilen des Serviceauftrages  $i, n + i$  in eine andere zeit -chronologisch geordnete Route eines Satzes von Fahrzeugen.

Der zweite Umverteilungsoperator (Abb. 23) entnimmt einer zum einem Satz von Fahrzeugen gehörenden Route einen Serviceauftrag und fügt ihn in eine andere Route zum selben Satz von Fahrzeugen gehörenden Route ein und entnimmt nun dieser Route einen Serviceauftrag und fügt ihn in eine andere Route zum selben Satz von Fahrzeugen gehörenden Route ein. Wegen Satz 11 kann o. B. d. A. von drei zeit-chronologisch geordneten Routen  $x = (0, \dots, i, n + i, \dots, 2n + 1)$ ,  $y = (0, \dots, j, n + j, \dots, 2n + 1) \dot{\vee} y = (0, 2n + 1)$  und  $z = (0, \dots, 2n + 1)$ ,  $i \neq j, i, j \in \{1, \dots, n\}$  ausgegangen werden, wobei  $\dot{\vee}$  das Exklusive-Oder bzw. entweder oder bezeichne. Es wird nun der Serviceauftrag  $i, n + i$  aus der

Route  $x$  entfernt und in die Route  $y$  eingefügt und anschließend entweder der Serviceauftrag  $j, n + j$  oder der Serviceauftrag  $i, n + i$  aus der Route  $y$  entfernt und in die Route  $z$  eingefügt. Dabei entstehen o. B. d. A. die zeit-chronologisch geordnete Route  $x' = (0, \dots, 2n + 1)$  und die nicht notwendigerweise zeit-chronologisch (n. z.) bzw. zeit-chronologisch geordneten Routen (z.)  $y' = (0, \dots, i, n + i, \dots, j, n + j, \dots, 2n + 1)$  (n. z.)  $\dot{\vee}$   $y' = (0, i, n + i, 2n + 1)$  (z.),  $y'' = (0, \dots, i, n + i, \dots, 2n + 1)$  (n. z.)  $\dot{\vee}$   $y'' = (0, 2n + 1)$  (z.) und  $z' = (0, \dots, j, n + j, \dots, 2n + 1)$  (n. z.)  $\dot{\vee}$   $z' = (0, \dots, i, n + i, \dots, 2n + 1)$  (n. z.). Für den Rekombinationsoperator empfiehlt sich also folgende Bauart:

$$\begin{aligned}
 & \text{Rek}^\xi : (\mathcal{G} \times \mathcal{L})^2 \rightarrow (\mathcal{G} \times \mathcal{L})^2, \\
 & \left\{ \begin{array}{l}
 ((x, 2n + 1, \dots, 2n + 1, \perp), (y, 2n + 1, \dots, 2n + 1, \perp)) \\
 \mapsto ((x', 2n + 1, \dots, 2n + 1, \perp), (y', 2n + 1, \dots, 2n + 1, \perp)) \\
 ((y', 2n + 1, \dots, 2n + 1, \perp), (z, 2n + 1, \dots, 2n + 1, \perp)) \\
 \mapsto ((y'', 2n + 1, \dots, 2n + 1, \perp), (z', 2n + 1, \dots, 2n + 1, \perp)) \\
 a \mapsto a, \\
 a \neq ((x, 2n + 1, \dots, 2n + 1, \perp), (y, 2n + 1, \dots, 2n + 1, \perp)), \\
 a \neq ((y', 2n + 1, \dots, 2n + 1, \perp), (z, 2n + 1, \dots, 2n + 1, \perp))
 \end{array} \right.
 \end{aligned}$$

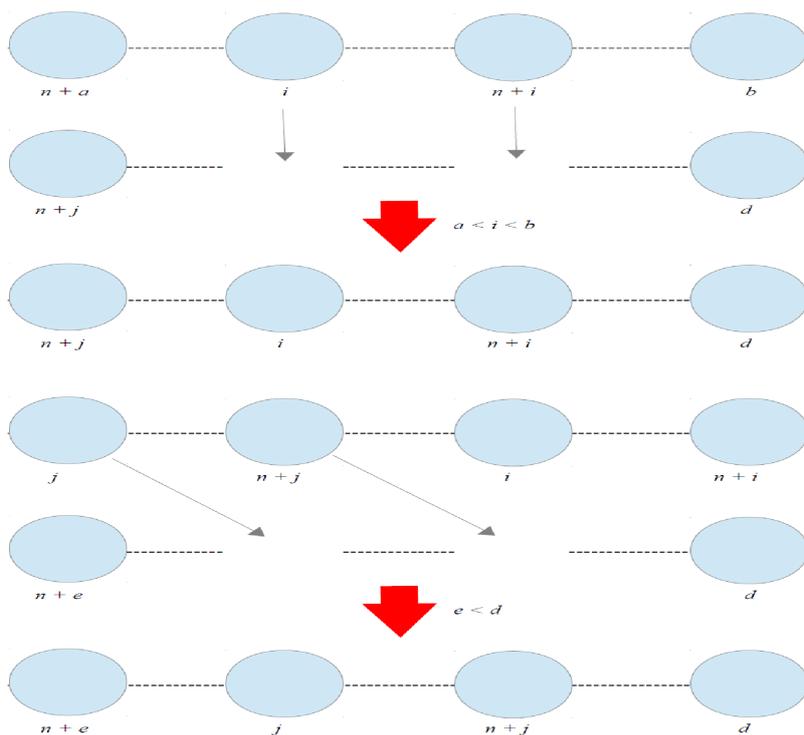


Abbildung 23: Umverteilen des Serviceauftrages  $i, n + i$  in eine andere zeit-chronologisch geordnete Route eines Satzes von Fahrzeugen und erneutes Umverteilen eines Serviceauftrages  $j, n + j$  aus dieser Route in eine andere zeit-chronologisch geordnete Route desselben Satzes von Fahrzeugen.

**Bemerkung 29:**

- (a) Die Wahl der Serviceaufträge und Routen erfolgt zufällig und gleichverteilt.
- (b) Der Mutationsoperator und alle Rekombinationsoperatoren sind nach Konstruktion wohldefiniert.

*Beweis.* Die Aussage (b) folgt direkt aus der Definition der genetischen Operatoren.  $\square$

**Bemerkung 30:** Um die Diversität des FEGA und des DEGA nicht zu zerstören, wird bei den Umverteilungsoperatoren auf das bestmögliche Einfügen in eine Route (eines Satzes an Fahrzeugen) verzichtet.

**Bemerkung 31:** Die Länge einer Route induziert zum Beispiel eine Äquivalenzrelation. In Bezug auf deren Äquivalenzklassen erfüllen die hier konstruierten Rekombinationsoperatoren zum Beispiel die Anforderungen an einen Rekombinationsoperator, die nach der Formulierung des allgemeinen Schema-Theorems zusammengestellt wurden.

## 4.6 Datenaufbereitungsfunktion

Damit die evolutionären Algorithmen ausgeführt werden können, muss das Optimierungsproblem aus Abschnitt 3 entsprechend aufbereitet werden. Dazu werden zuerst die Schlagrandkoordinaten durch lineare Interpolation zu einem Schlagrand vervollständigt und die Fahrtrichtung des Feldhäckslers beim Einfahren in die erste Parallelfahrspur bestimmt. Die durch die Fahrtrichtung des Feldhäckslers induzierte Gerade  $g$  wird dann mit dem Schlagrand geschnitten. Die Verbindungslinie der so erhaltenen jeweils voneinander weit entferntesten Schnittpunkte - falls mindestens 2 Schnittpunkte existieren, existieren auch die weit entferntesten Schnittpunkte nach Satz 3 d, e, g oder j, i, c -, liefert dann die Länge der ersten Parallelfahrspur. Durch eine Verschiebung der Geraden  $g$  um eine Arbeitsbreite des Feldhäckslers entlang der positiven oder negativen  $x$ - oder  $y$ -Achse, die sich für eine nicht zur  $x$ - oder  $y$ -Achse parallele erste Parallelfahrspur - für eine zur  $x$ - oder  $y$ -Achse parallele erste Parallelfahrspur entspricht die Verschiebung der Arbeitsbreite des Feldhäckslers - nach der Formel

$$\text{Arbeitsbreite des Feldhäckslers} / \cos(\arctan(\text{Steigung}_g))$$

berechnen lässt, können wiederum die Schnittpunkte mit dem Schlagrand bestimmt werden. Die Verbindungslinie der so erhaltenen jeweils voneinander weit entferntesten Schnittpunkte, falls mindestens 2 Schnittpunkte existieren, liefert dann die Länge der zweiten Parallelfahrspur. So fortfahrend können alle weiteren Schnittpunkte der Parallelfahrspuren mit dem Schlagrand und somit auch die Längen aller weiteren Parallelfahrspuren bestimmt werden. Wird noch der zurückgelegte Weg des Feldhäckslers bis zum Einfahren des Feldhäckslers in die erste Parallelfahrspur berechnet, so ergibt sich der zurückgelegte Gesamtweg  $x_G$  des Feldhäckslers aus der Summe der Längen der Parallelfahrspuren, Wendestrecken und des zurückgelegten Weg des Feldhäckslers bis zum Einfahren des Feldhäckslers in die erste Parallelfahrspur. Dieser ergibt sich wiederum als Summe der Längen der Interpolationsbögen der dazugehörigen Schlagkoordinaten. [In einem zweiten Schritt werden nun die Serviceaufträge auf die einzelnen Transportfahrzeuge verteilt. Dabei werden gleichverteilte natürliche Zufallszahlen zwischen 1 und der Anzahl der zur Verfügung stehenden Transportfahrzeuge erzeugt. Da diese Zufallszahlen zugleich die einzelnen Transportfahrzeuge repräsentieren, kann über die dazugehörigen Beladungskapazitäten berechnet werden, wie viel Zufallszahlen erzeugt werden müssen, bis die Summe der Beladungskapazitäten größer oder gleich dem Feldertrag ist.] Da der Feldertrag

in der Regel nicht genau angegeben werden kann, kann der Landwirt oder Lohnunternehmer einen höheren als vorhandenen Feldertrag wählen, da in einem weiteren Schritt über die Feldhäckslerleistung und Beladungskapazitäten zunächst die einzelnen Beladungszeiten der per Zufall ausgewählten Transportfahrzeuge berechnet und dann über die Feldhäckslergeschwindigkeit der dabei bei der Beladung zurückgelegte Weg bestimmt werden. Alle solchen Wege werden anschließend summiert und mit dem Gesamtfahrweg  $x_G$  des Feldhäckslers abgeglichen. Der Feldhäcksler häckselt dabei nur solange, solange die Summe der einzelnen Wege kleiner oder gleich  $x_G$  ist. Aus den Beladungszeiten des Feldhäckslers können aber auch durch sukzessive Summation der einzelnen Beladungszeiten zur Startzeit des Feldhäckslers die optimalen frühesten Beladungsbeginnzeiten bzw. Servicebeginnzeiten für die per Zufall ausgewählten Transportfahrzeuge am Feldhäcksler bestimmt werden und danach die optimalen spätesten Servicebeginnzeiten festgelegt werden. Ferner kann über eine Summation der zurückgelegten Teilwege des Feldhäckslers und anschließendes Abgleichen mit  $x_G$  auch immer die Position und daraus die optimale Feldfahrzeit und der optimale Feldfahrweg der per Zufall ausgewählten Transportfahrzeuge berechnet werden. Es sei hier daran erinnert, dass sich die Transportfahrzeuge wegen eventuell entstehender Bodenverdichtungen zunächst solange virtuell am Feldrand entlang bewegen, bis sie in diejenige Fahrspur einfahren können, in der sich der Feldhäcksler aktuell befindet und dabei jeweils dann der kürzeste Weg als optimaler Weg vom Schlagrand - auch als Verbindungsknoten zwischen Straße und Feld bezeichnet - zum Feldhäcksler bzw. vom Feldhäcksler zum Schlagrand ausgewählt wird. Dabei werden bei der Berechnung der optimalen Feldfahrzeiten der per Zufall ausgewählten Transportfahrzeuge die Längen der optimalen Fahrwege der per Zufall ausgewählten Transportfahrzeuge durch ihre jeweiligen Feldfahrgeschwindigkeiten dividiert. In einem nächsten Schritt werden nun die frühesten optimalen Servicebeginnzeiten der per Zufall ausgewählten Transportfahrzeuge am Silo bestimmt. Dazu wird zu den frühesten optimalen Servicebeginnzeiten am Feldhäcksler, die Beladungszeit bzw. Servicezeit, die Feldfahrzeit vom Feldhäcksler zum Schlagrand und die Straßenfahrzeit vom Schlagrand zum Silo des jeweiligen per Zufall ausgewählten Transportfahrzeugs, also die Transportzeit des Häckselguts des jeweiligen per Zufall ausgewählten Transportfahrzeugs, hinzuaddiert. Damit können nun die spätesten optimalen Servicebeginnzeiten am Silo festgelegt werden. Die Routendauern ergeben sich aus der Differenz der Rückkehrzeit zum Depot und der Summe aus Startzeit und Wiegezeit am Silo. Ist ferner die Siloverdichtungskapazität kleiner als der Massenstrom des Häckselguts pro Stunde, so verzögert sich die Abfahrt der einzelnen Transportfahrzeuge am Silo anteilmäßig nach ihren Beladungskapazitäten, die dabei zeitlich auf den Massestrom umgeschlagen werden, der pro Stunde nicht verdichtet werden kann. Dabei werden zunächst die Transportzeiten des Häckselguts der per Zufall ausgewählten Transportfahrzeuge und deren dazugehörige Beladungskapazitäten solange addiert, bis die Summe aus den Transportzeiten größer als 1 ist. Sodann wird von den jeweiligen Summen jeweils der letzte Summand abgezogen und eine Aufladungsdifferenz berechnet, die sich als Differenz aus der Summe der aktuellen Summe der Beladungskapazitäten und der auf eine Stunde hochgerechneten Zuladung bezüglich des letzten betrachteten Transportfahrzeuges und der Siloverdichtungskapazität ergibt. Ist diese Aufladungsdifferenz größer als 0, so wird berechnet, wie lange das Silo dazu brauchen würde, diese soeben berechnete Aufladungsdifferenz zu verdichten. Diese Zeit wird dann anteilmäßig nach den Beladungskapazitäten der jeweils in einer Stunde am Silo angekommenen Transportfahrzeuge auf die Servicebeginnzeiten der jeweils in einer Stunde am Silo angekommenen Transportfahrzeuge umgeschlagen. So fortfahrend, können alle Umschlagszeiten bestimmt werden, wobei allerdings

zu beachten ist, dass von der letzten der betrachteten Transportzeiten für die nächste Iteration die Differenz aus 1 und der aktuellen Summe der Transportzeiten abzuziehen ist. Diese Umschlagszeiten definieren sogenannte Verzögerungszeiten am Silo, um die Transportfahrzeuge nach ihrer Entladung dann jeweils verzögert vom Silo abfahren. Schließlich werden noch die Transportkosten und die Routendauern für die per Zufall ausgewählten Transportfahrzeuge berechnet bzw. festgelegt. Dazu wird unter den verschiedenen Transportfahrzeugen aus dem Satz der zufällig ausgewählten Transportfahrzeuge die maximale Feldfahrzeit vom Schlagrand zum Feldhäcksler bzw. vom Feldhäcksler zum Schlagrand und die maximale Straßenfahrzeit vom Silo zum Schlagrand bzw. vom Schlagrand zum Silo bestimmt. Danach werden die maximale Summe aus den Summen aus Feldfahrzeit vom Schlagrand zum Feldhäcksler und Straßenfahrzeit vom Silo zum Schlagrand und die maximale Summe aus den Summen aus Feldfahrzeit vom Feldhäcksler zum Schlagrand und aus Straßenfahrzeit vom Schlagrand zum Silo bestimmt. Diese Summen werden nun auf 100 skaliert und anschließend prozentual die einzelnen Transportkosten für die per Zufall ausgewählten Transportfahrzeuge vom Silo zum Feldhäcksler und vom Feldhäcksler zum Silo über die Summe aus der zu den einzelnen Transportfahrten gehörigen Feld- und Straßenfahrzeiten berechnet (Wörz et al., 2013). Aufgrund der Einfachheit der einzelnen Datenaufbereitungsalgorithmen wird hier auf einen vollständigen Beweis verzichtet, dass diese korrekt arbeiten. Es muss hier allerdings noch bemerkt werden, dass die oben beschriebene Methode für einen beschränkten Schlag tatsächlich nur endlich viele Parallelfahrspuren liefert. Dies folgt jedoch sofort aus der Definition der Beschränktheit des Schlags. Es ist offensichtlich, dass die anderen für die Datenaufbereitung notwendigen Algorithmen korrekt arbeiten.

**Bemerkung 32:** Das soeben beschriebene Datenpreprocessing wird zunächst zur Initialisierung der Anfangspopulation des DEGA und FEGA verwendet. Ferner wird es zur Erzeugung einer neuen Population des DEGA (Algorithmus 4 b, 4.) und FEGA (Algorithmus 4 a, 6.) verwendet. Dabei werden keine Serviceaufträge per Zufall konstruiert, siehe [...] in der Datenaufbereitungsfunktion, sondern die erzeugten Individuen herangezogen.

**Korollar 5:** Die einzelnen Datenaufbereitungsalgorithmen arbeiten korrekt.

*Beweis.* Induktion. □

## 4.7 Distributionsheuristik für homogene Transportfahrzeuge

Die Distributionsheuristik für homogene Transportfahrzeuge ordnet einem Satz an Transportfahrzeugen eines Individuums der Anfangspopulation gleichmäßig zeit-chronologisch geordnete Serviceaufträge zu. Dabei werden die Serviceaufträge zufällig und gleichmäßig auf den Satz von Transportfahrzeugen verteilt und anschließend zeit-chronologisch geordnet. So fortfahrend wird die Anfangspopulation erzeugt. Die genaue Vorgehensweise ist dabei wie folgt gegeben:

1. Teile die Anzahl der Serviceaufträge durch die Anzahl der zur Verfügung stehenden Transportfahrzeuge, runde das Ergebnis ab und erhalte daraus die Anzahl der Serviceaufträge für alle bis auf das letzte Transportfahrzeug.
2. Berechne daraus die Anzahl der Serviceaufträge für das letzte Transportfahrzeug.
3. Wähle für jedes bis auf das letzte Transportfahrzeug:

4. Wähle eine Zufallszahl zwischen 1 und der Größe der Serviceauftragsliste solange die Anzahl der Serviceaufträge, die dem ausgewählten Transportfahrzeug zugeordnet werden sollen, noch nicht überschritten ist. Ordne dem ausgewählten Transportfahrzeug den ausgewählten Serviceauftrag zu und lösche den ausgewählten Serviceauftrag aus der Serviceauftragsliste.
5. Ordne die noch nicht zugeordneten Serviceaufträge dem letzten Transportfahrzeug zu.
6. Ordne die Serviceaufträge der einzelnen Transportfahrzeuge zeit-chronologisch.

#### 4.8 Distributionsheuristik für heterogene Transportfahrzeuge

Die Distributionsheuristik für heterogene ordnet einem Satz an Transportfahrzeugen eines Individuums der Anfangspopulation des DEGA, des FEGA, der Differential-Evolution und des ultimativen Algorithmus vorab per Gleichverteilung ausgewählte Serviceaufträge entsprechend dem maximalen Ladegewicht der Transportfahrzeuge zeit-chronologisch zu. Dabei wird die Distributionsheuristik in einer Startlösungs- und Hauptlösungsgenerierungsmethode aufgerufen.

#### 4.9 Startlösungs- und Hauptlösungsgenerierungsmethode für heterogene Transportfahrzeuge

In der Startlösungsgenerierungsmethode wird zuerst für jedes Individuum der Anfangspopulation die Distributionsheuristik aufgerufen. Danach werden mittels der Programmierheuristik die Optimierungsvariablen mit numerischen Werten belegt. Sodann werden die Optimierungsvariablen derart mittels Translationen transformiert, dass keine Zeitüberlappungen auftreten und anschließend mittels eines Downhillalgorithmus derart aufeinander abgestimmt, dass keine Zeitüberlappungen auftreten und zusätzlich die Einsatzzeit eines Transportfahrzeugs möglichst klein ist. Das jeweils beste Individuum wird schließlich in die Anfangspopulation übernommen.

In der Hauptlösungsgenerierungsmethode wird zuerst für ein ausgewähltes Individuum der aktuellen Population die Distributionsheuristik aufgerufen. Danach werden mittels der Programmierheuristik die Optimierungsvariablen mit numerischen Werten belegt. Sodann werden die Optimierungsvariablen derart mittels Translationen transformiert, dass keine Zeitüberlappungen auftreten und anschließend mittels eines Downhillalgorithmus derart aufeinander abgestimmt, dass keine Zeitüberlappungen auftreten und zusätzlich die Einsatzzeit eines Transportfahrzeugs möglichst klein ist.

#### 4.10 Programmierheuristik

Die Anpassung der Optimalparameter für ein Transportfahrzeug, das mindestens einen Serviceauftrag zu erledigen hat, ist wie folgt gegeben:

1. Initialisiere die Ankunftszeiten, Servicebeginnzeiten, Abfahrtszeiten, Wartezeiten und Kapazitäten durch jeweils eine leere Liste.
2. Führe die Befehle `Ankunftszeiten.Add(0)`, `Servicebeginnzeiten.Add(Früheste optimale Ankunftszeit[0])`, `Abfahrtszeiten.Add(Servicebeginnzeiten[0])`, `Wartezeiten.Add(0)` und `Kapazitäten.Add(0)` aus.

3. Setze  $i = 1$ .
4. Führe die Befehle  $\text{Ankunftszeiten.Add}(\text{Abfahrtszeiten}[i - 1] + \text{Fahrzeiten}[i - 1])$ ,  $\text{Servicebeginnzeiten.Add}(\max\{\text{Frühesten optimalen Ankunftszeiten}[\text{Aufträge}[i]]$ ,  $\text{Ankunftszeiten}[i]\})$ ,  $\text{Wartezeiten.Add}(\text{Servicebeginnzeiten}[i] - \text{Ankunftszeiten}[i])$ ,  $\text{Abfahrtszeiten.Add}(\text{Servicebeginnzeiten}[i] + \text{Servicezeiten}[\text{Aufträge}[i]])$ ,  $\text{Kapazitäten.Add}(\text{Kapazitäten}[i - 1] + \text{Ladegewichte}[i])$ ,  $\text{Ankunftszeiten.Add}(\text{Abfahrtszeiten}[i] + \text{Fahrzeiten}[i])$ ,  $\text{Servicebeginnzeiten.Add}(\max\{\text{Frühesten optimalen Ankunftszeiten}[\text{Aufträge}[i + 1]]$ ,  $\text{Ankunftszeiten}[i + 1]\})$ ,  $\text{Wartezeiten.Add}(\text{Servicebeginnzeiten}[i + 1] - \text{Ankunftszeiten}[i + 1])$ ,  $\text{Abfahrtszeiten.Add}(\text{Servicebeginnzeiten}[i + 1] + \text{Servicezeiten}[\text{Aufträge}[i + 1]])$  und  $\text{Kapazitäten.Add}(\text{Kapazitäten}[i] + \text{Ladegewichte}[i + 1])$  aus.
5. Setze  $i = i + 2$  und gehe zu 4. solange  $i < \text{Aufträge.Count} - 4$ .
6. Führe die Befehle  $\text{Ankunftszeiten.Add}(\text{Abfahrtszeiten}[\text{Aufträge.Count} - 3 - 1] + \text{Fahrzeiten}[\text{Aufträge.Count} - 3 - 1])$ ,  $\text{Servicebeginnzeiten.Add}(\max\{\text{Frühesten optimalen Ankunftszeiten}[\text{Aufträge.Count} - 3]$ ,  $\text{Ankunftszeiten}[\text{Aufträge.Count} - 3]\})$ ,  $\text{Wartezeiten.Add}(\text{Servicebeginnzeiten}[\text{Aufträge.Count} - 3] - \text{Ankunftszeiten}[\text{Aufträge.Count} - 3])$ ,  $\text{Abfahrtszeiten.Add}(\text{Servicebeginnzeiten}[\text{Aufträge.Count} - 3] + \text{Servicezeiten}[\text{Aufträge.Count} - 3])$ ,  $\text{Kapazitäten.Add}(\text{Kapazitäten}[\text{Aufträge.Count} - 3 - 1] + \text{Ladegewichte}[\text{Aufträge.Count} - 3])$ ,  $\text{Ankunftszeiten.Add}(\text{Abfahrtszeiten}[\text{Aufträge.Count} - 3] + \text{Fahrzeiten}[\text{Aufträge.Count} - 3])$ ,  $\text{Servicebeginnzeiten.Add}(\max\{\text{Frühesten optimalen Ankunftszeiten}[\text{Aufträge.Count} - 3 + 1]$ ,  $\text{Ankunftszeiten}[\text{Aufträge.Count} - 3 + 1]\})$ ,  $\text{Wartezeiten.Add}(\text{Servicebeginnzeiten}[\text{Aufträge.Count} - 3 + 1] - \text{Ankunftszeiten}[\text{Aufträge.Count} - 3 + 1])$ ,  $\text{Abfahrtszeiten.Add}(\text{Servicebeginnzeiten}[\text{Aufträge.Count} - 3 + 1] + \text{Servicezeiten}[\text{Aufträge.Count} - 3 + 1])$ ,  $\text{Kapazitäten.Add}(\text{Kapazitäten}[\text{Aufträge.Count} - 3] + \text{Ladegewichte}[\text{Aufträge.Count} - 3 + 1])$ ,  $\text{Ankunftszeiten.Add}(\text{Abfahrtszeiten}[\text{Aufträge.Count} - 2] + \text{Rückfahrzeit Silo-Depot})$ ,  $\text{Servicebeginnzeiten.Add}(\max\{\text{Frühesten optimalen Ankunftszeiten}[\text{Aufträge.Count} - 1]$ ,  $\text{Ankunftszeiten}[\text{Aufträge.Count} - 1]\})$ ,  $\text{Wartezeiten.Add}(\text{Servicebeginnzeiten}[\text{Aufträge.Count} - 1] - \text{Ankunftszeiten}[\text{Aufträge.Count} - 1])$ ,  $\text{Abfahrtszeiten.Add}(0)$ , und  $\text{Kapazitäten.Add}(0)$  aus.
7. Initialisiere  $\text{Transportzeiten des Häckselguts} = \{\}$ .
8. Setze  $\text{Transportzeiten des Häckselguts.Add}(0)$ .
9. Setze  $i = 1$ .
10. Führe die Befehle  $\text{Transportzeiten des Häckselguts.Add}(\text{Servicebeginnzeiten}[i + 1] - \text{Abfahrtszeiten}[i])$  und  $\text{Transportzeiten des Häckselguts.Add}(0)$  aus.
11. Setze  $i = i + 2$  und gehe zu 10. solange  $i < \text{Aufträge.Count} - 2$  ist.
12. Setze  $\text{Transportzeiten des Häckselguts.Add}(0)$ .

Hat ein Transportfahrzeug keinen Serviceauftrag zu erledigen, so werden die Optimierungsparameter wie folgt angepasst:

Setze  $\text{Ankunftszeiten} = \{0, \text{Frühesten optimalen Ankunftszeiten}[0] + \text{Rückkehrzeit Silo Depot}\}$ ,  $\text{Servicebeginnzeiten} = \{\text{Frühesten optimalen Ankunftszeiten}[0], \max\{\text{Frühesten optimalen Ankunftszeiten}[\text{Frühesten optimalen Ankunftszeiten.Count} - 1], \text{Ankunftszeiten}[1]\}\}$ ,  $\text{Wartezeiten} = \{0, \text{Servicebeginnzeiten}[1] - \text{Ankunftszeiten}[1]\}$ ,  $\text{Abfahrtszeiten} = \{\text{Servicebeginnzeiten}[0], 0\}$ , und  $\text{Kapazitäten} = \{0, 0\}$ .

#### 4.11 Zielfunktion

Die Zielfunktion ergibt sich als gewichtete Summe der Ausdrücke

- Maximale Routendauer aller Transportfahrzeuge
- Summe der Transportzeiten des Häckselguts
- Summe der Wartezeiten der benutzten Transportfahrzeuge
- Maximale Verletzung der vorgegebenen Routendauer aller Transportfahrzeuge
- Summe der Verletzung der vorgegebenen Transportzeiten für das Häckselgut
- Summe der Verletzung der vorgegebenen Wartezeiten für die Transportfahrzeuge
- Anzahl der benutzten Fahrzeuge
- Summe der Verletzung der vorgegebenen frühesten optimalen Ankunftszeiten am Schlag und Silo
- Summe der Verletzung der vorgegebenen spätesten optimalen Ankunftszeiten am Schlag und Silo
- Maximale Fahrtkosten für eine Fahrt vom Silo zum Schlag und vice versa aller Transportfahrzeuge

## 4.12 Ungleichungsnebenbedingungen

Die Ungleichungsnebenbedingungen ergeben sich zu:

- Beladung eines Transportfahrzeuges = zulässiges Ladegewicht
- Servicebeginnzeit eines Transportfahrzeuges  $\leq$  späteste optimale Ankunftszeit am Schlag
- Servicebeginnzeit eines Transportfahrzeuges  $\geq$  früheste optimale Ankunftszeit am Schlag

Durch Umwandlung der Ungleichungen in  $\max\{0, \bullet\}$  Ausdrücke mit anschließender Maximumsbildung und Summation der Maxima resultiert ein Strafterm (Penalty-Term), der Auskunft darüber gibt, ob die Lösung der 4 im nächsten Abschnitt präsentierten Algorithmen zulässig ist. Ferner wird der Strafterm mit dem Faktor  $200 + (\text{int})(t/100)$ ,  $t$  Iterationstiefe, multipliziert, um möglichst rasch zulässige Lösungen zu erhalten.

## 4.13 Genetischer Algorithmus

Der genetische Algorithmus zur Optimierung einer homogenen Erntekette ist ein FEAGA. Im Detail läßt sich seine Struktur wie folgt beschreiben:

### 4.13.1 Algorithmus 3 a (FEAGA)

1. Erzeuge mittels der Datenaufbereitungsfunktion und der Distributionsheuristik eine Anfangspopulation  $P(0)$  der Größe 30 und verwende dabei die Programmierheuristik zur Anpassung der Optimalparameter.
2. Setze  $t = 0$ .
3. Bestimme diejenigen Lösungskandidaten mit dem besten und schlechtesten Gütewert, verwende dabei die Zielfunktion aus Abschnitt 4.9.
4. Solange sich der Betrag des Gütewerts des besten Lösungskandidaten vom Gütewert des schlechtesten Lösungskandidaten um mehr als ein passendes positives vorgegebenes  $\epsilon$  unterscheidet und eine maximale Anzahl an Iterationen nicht überschritten ist, führe aus:
5. Wähle zufällig und gleichverteilt 10 Lösungskandidaten aus der aktuellen Population  $P(t)$  aus.
6. Erzeuge aus den ausgewählten Individuen mittels zufälliger und gleichverteilter Anwendung der Umordnungs-, Umverteilungs- und Austauschoperatoren aus Abschnitt 4.5

- 8 (neue) Individuen und benutze dabei die Programmierheuristik zur Anpassung der Optimalparameter.
7. Bestimme unter diesen Individuen das beste Individuum, verwende dabei die Zielfunktion aus Abschnitt 4.9.
8. Ist dieses Individuum besser als das schlechteste Individuum, so ersetze das schlechteste Individuum durch dieses beste Individuum. Verwende dabei Bemerkung 14. und die Ungleichungsnebenbedingungen aus Abschnitt 4.10.
9. Setze  $t = t + 1$ .
10. Bestimme diejenigen Individuen mit dem besten und schlechtesten Gütewert, verwende dabei die Zielfunktion aus Abschnitt 4.9.
11. Falls sich der Betrag des Gütewerts des besten Individuums vom Gütewert des schlechtesten Individuums um weniger als ein passendes positives vorgegebenes  $\eta$  unterscheidet und  $m \geq 5$  gilt, setze  $m = m - 1$ . Ende solange.

Alternativ zum FEGA kann auch der DEGA verwendet werden.

#### 4.13.2 Algorithmus 3 b (DEGA)

1. Erzeuge mittels der Datenaufbereitungsfunktion und der Distributionsheuristik eine Anfangspopulation  $P(0)$  (der Größe 30) und verwende dabei die Programmierheuristik zur Anpassung der Optimalparameter.
2. Bestimme und fixiere den Gütewert der einzelnen Individuen.
3. Selektiere 20 beste Individuen nach ihren Gütewerten.
4. Erzeuge aus jedem selektierten Individuum mittels zufälliger und gleichverteilter Anwendung der Umordnungs-, Umverteilungs- und Austauschoperatoren aus Abschnitt 4.5 20 (neue) Individuen und benutze dabei die Programmierheuristik zur Anpassung der Optimalparameter.
5. Falls die erzeugte Anzahl an verschiedenen Individuen größer als die Größe der Anfangspopulation ist, so reduziere die Population der erzeugten Individuen durch Entfernen der güteschlechtesten Individuen auf die Größe der Anfangspopulation. Falls die erzeugte Anzahl an verschiedenen Individuen kleiner als die Größe der Anfangspopulation ist, so erzeuge mit der Datenaufbereitungsfunktion und der Distributionsheuristik zufällig weitere Individuen bis die Größe der Anfangspopulation erreicht ist.
6. Ersetze die alte Population durch die neue Population.
7. Gehe zu 2., solange die Abbruchbedingung nicht erfüllt ist.

Der genetische Algorithmus zur Optimierung einer homogenen oder heterogenen Erntekette ist ein FEGA. Im Detail läßt sich seine Struktur wie folgt beschreiben:

#### 4.13.3 Algorithmus 4 a (FEGA)

1. Erzeuge mittels der Datenaufbereitungsfunktion eine Ausgangspopulation  $P(0)$  der Größe 30, dupliziere jedes Individuum (Sequenz randomisierter Beladung bzw. Abfuhrspanne induziert durch den Feldhäcksler) 2 mal und erhalte 30 Anfangspopulationen mit je 2 Individuen.
2. Setze  $t = 0$ .
3. Bestimme diejenigen Lösungskandidaten mit dem besten und schlechtesten Gütewert, indem für jede der 30 Anfangspopulationen eine Startlösungsgenerierungsmethode aufgerufen wird.

4. Solange sich der Betrag des Gütwerts des besten Lösungskandidaten vom Gütwert des schlechtesten Lösungskandidaten der Ausgangspopulation  $P(t)$  um mehr als ein passendes positives vorgegebenes  $\epsilon$  unterscheidet und eine maximale Anzahl an Iterationen nicht überschritten ist, führe aus:
5. Wähle zufällig und gleichverteilt 10 verschiedene Lösungskandidaten aus der Ausgangspopulation  $P(t)$  aus.
6. Erzeuge aus den ausgewählten Individuen mittels der Rekombination (globaler Crossover: Konstruktion eines neuen Individuums durch wiederholte zufällige und gleichverteilte Auswahl eines Transportfahrzeugs aus vier zufällig und gleichverteilt ausgewählten Individuen und des aktuell besten Individuums, sodass zwei aufeinanderfolgende Abfuhrgespanne verschieden sind) und den Mutationen (verschiebende (verschiebt in einem Individuum ein Abfuhrgespann zufällig an eine andere Position) und mischende Mutation (permutiert in einem Block eines Individuums die Abfuhrgespanne)), angewandt auf die randomisierten Beladungen bzw. Abfuhrgespanne induziert durch den Feldhäcksler, 8 (neue) Individuen, wobei mit der dynamischen Mutationswahrscheinlichkeit  $\tau$  initialisiert durch 0.3 mutiert wird. Dabei ist  $\tau$  gegeben durch:

```

Zaehler++;
Erfolgswahrscheinlichkeit = Erfolge / Zaehler;
if (Erfolgswahrscheinlichkeit < 1.0 / 5)
{  $\tau = \tau * 0.95$ ; if ( $\tau < 0.2$ ) {  $\tau = 0.3$ ; } }
else if (Erfolgswahrscheinlichkeit > 1.0 / 5) {  $\tau = \tau/0.95$ ; if ( $\tau > 0.9$ ) {  $\tau = 0.3$ ; } }
else { }

```

Verwende zusätzlich eine Diversifizierungsmethode, die eventuell nicht verschiedene aufeinanderfolgende Transportfahrzeuge durch Ersetzung eines der beiden Transportfahrzeuge durch ein anderes mittels Gleichverteilung ausgewähltes Transportfahrzeug verschieden macht.

7. Bestimme unter diesen Individuen das beste Individuum, verwende dabei Bemerkung 32 und die Vorgehensweise aus 1. und eine Hauptlösungsgenerierungsmethode.
8. Ist dieses Individuum besser als das schlechteste Individuum der Ausgangspopulation  $P(t)$ , so ersetze das schlechteste Individuum durch dieses beste Individuum. Verwende dabei Bemerkung 14.
9. Setze  $t = t + 1$ .
10. Bestimme diejenigen Individuen der Ausgangspopulation  $P(t)$  mit dem besten und schlechtesten Gütwert.
11. Falls sich der Betrag des Gütwerts des besten Individuums vom Gütwert des schlechtesten Individuums um weniger als ein passendes positives vorgegebenes  $\eta$  unterscheidet und  $m \geq 5$  gilt, setze  $m = m - 1$ . Ende solange.

Alternativ zum FEGA kann auch der DEGA verwendet werden.

#### 4.13.4 Algorithmus 4 b (DEGA)

1. Erzeuge mittels der Datenaufbereitungsfunktion eine Ausgangspopulation  $P(0)$  der Größe 50, dupliziere jedes Individuum (Sequenz randomisierter Beladungen bzw. Abfuhrgespanne induziert durch den Feldhäcksler) 2 mal und erhalte 50 Anfangspopulationen mit je 2 Individuen.

2. Bestimme und fixiere den Gütewert der einzelnen Individuen, indem für jede der 50 Anfangspopulationen eine Startlösungsgenerierungsmethode aufgerufen wird.
3. Selektiere 10 beste Individuen nach ihren Gütewerten.
4. Erzeuge aus jedem selektierten Individuum mittels der Rekombination (globaler Crossover) und den Mutationen (verschiebende und mischende Mutation), angewandt auf die randomisierten Beladungen bzw. Abfuhrspanne induziert durch den Feldhäcksler, 20 (neue) Individuen, wobei wiederum mit der dynamischen Mutationswahrscheinlichkeit  $\tau$  mutiert wird. Verwende zusätzlich einen Diversifizierungsmethode, die eventuell nicht verschiedene aufeinanderfolgende Transportfahrzeuge durch Ersetzung eines der beiden Transportfahrzeuge durch ein anderes mittels Gleichverteilung ausgewähltes Transportfahrzeug verschieden macht.
5. Falls die erzeugte Anzahl an verschiedenen Individuen größer als die Größe der Anfangspopulation ist, so reduziere die Population der erzeugten Individuen durch Entfernen der güteschlechtesten Individuen auf die Größe der Anfangspopulation. Falls die erzeugte Anzahl an verschiedenen Individuen kleiner als die Größe der Anfangspopulation ist, so erzeuge mit 1. und 2. zufällig weitere Individuen bis die Größe der Anfangspopulation erreicht ist.
6. Ersetze die alte Population durch die neue Population.
7. Gehe zu 2., solange die Abbruchbedingung nicht erfüllt ist.

#### 4.14 Algorithmus 4 c (Differential Evolution)

Neben dem DEGA und dem FEGA kann auch eine Differential-Evolution verwendet werden, wobei die Konvergenzaussage aus Korollar 4 auch hier gilt, denn ein optimales Individuum in einer Population oder ein anderes optimales Individuum wird in die nächste Population übernommen (elitäre Strategie, Korollar 4).

*Beweis.* Die Behauptung folgt aus der Greedy-Auswahl in 5.. □

Hingegen wird das zweitbeste Individuum im Allgemeinen nicht in die nächste Population übernommen.

#### Differential-Evolution:

1. Erzeuge mittels der Datenaufbereitungsfunktion eine Ausgangspopulation  $P(0)$  der Größe 50, dupliziere jedes Individuum (Sequenz randomisierter Beladungen bzw. Abfuhrspanne induziert durch den Feldhäcksler) 2 mal und erhalte 50 Anfangspopulationen mit je 2 Individuen.
2. Bestimme und fixiere den Gütewert der einzelnen Individuen, indem für jede der 50 Anfangspopulationen eine Startlösungsgenerierungsmethode aufgerufen wird.
3. Erzeuge aus jedem Individuum der alten Population mittels der Rekombination (globaler Crossover) und den Mutationen (verschiebende und mischende Mutation), angewandt auf die randomisierten Beladungen bzw. Abfuhrspanne induziert durch den Feldhäcksler, 50 (neue) Individuen, wobei wiederum mit der dynamischen Mutationswahrscheinlichkeit  $\tau$  mutiert wird. Verwende dabei die Hauptlösungsgenerierungsmethode. Verwende zusätzlich einen Diversifizierungsmethode, die eventuell nicht verschiedene aufeinanderfolgende Transportfahrzeuge durch Ersetzung eines der beiden Transportfahrzeuge durch ein anderes mittels Gleichverteilung ausgewähltes Transportfahrzeug verschieden macht.

4. Ermittle aus jedem Individuum der alten und dem dazugehörigen Individuum in der neuen Population das Gütebessere. Ermittle zusätzlich das gütebeste Individuum.
5. Nimm alle gütebesseren Individuen in die neue Population auf.
6. Gehe zu 3., solange die Abbruchbedingung nicht erfüllt ist.

#### 4.15 Algorithmus 4 d (Ultimativer Algorithmus)

Der letzte hier vorgestellte Algorithmus basiert auf einer attraktivitätsbasierten Konstruktion einer Sequenz an Abfuhrgespannen. Da bei wird meistens angenommen, dass der Attraktivitätsanteil eines Transportfahrzeugs

$$\frac{1}{\text{Anzahl der Transportfahrzeuge}}$$

beträgt; diese Wahl ist jedoch nicht zwingend. Ausgehend von einer Ausgangsattraktivitätsmatrix, die die Anfangsattraktivität aller Transportfahrzeugübergänge  $(i, j)$ <sup>1</sup> enthält, vermindert sich die Attraktivität bei einem Transportfahrzeugübergang  $(i, j, i \neq j)$  um einen Faktor  $0.5 < \alpha < 1$ . Andererseits erhöht sich die Attraktivität um die Summe der Kehrwerte aus den Gütewerten der aktuellen Population. Über eine Auswahlattraktivität  $(i, j, i \neq j)$

$$\frac{\text{Attraktivität für einen Transportfahrzeugübergang}(i, j, i \neq j) \cdot \text{Attraktivitätsanteil}(j, i \neq j)}{\sum_{k \text{ möglich}} \text{Attraktivität für einen Transportfahrzeugübergang}(i, k, i \neq k) \cdot \text{Attraktivitätsanteil}(k, i \neq k)}$$

wird über einen Explorationsregler und eine auf  $[0, 1]$  gleichverteilte Zufallszahl entweder nach fitnessproportionaler Selektion (Zufallszahl  $<$  Explorationsregler) oder nach maximaler Auswahlattraktivität (sonst) ein neues Transportfahrzeug ausgewählt. Dabei wird der Explorationsregler je nach Erfolgswahrscheinlichkeit (Erfolgswahrscheinlichkeit  $> \frac{1}{5}$ ) nach einer gewissen Anzahl an Iterationen erhöht ( $/0.95$ ) oder erniedrigt ( $*0.95$ ) (sonst). Auf diese Weise wird in jeder Iteration eine attraktivitätsbasierte und den Lösungsraum sehr gut absuchende Population erzeugt, wobei zusätzlich immer das aktuell gütebeste Individuum ermittelt wird.

#### Code zur fitnessproportionalen Selektion:

```
double[] P = new double[p.Transportfahrzeugsanzahl - 1];
for (int i = 1; i < p.Transportfahrzeugsanzahl - 1; i++)
  {P[i] = P[i - 1] + Auswahlattraktivitaet[i - 1]; }
int j = 0;
Zufallszahl = NextDouble() * P.Max();
while (P[j] < Zufallszahl) { j += 1; }
Hilfsarray[1] = Wahlmoeglichkeiten[j - 1];
```

Die Robustheit dieses Algorithmus lässt sich zeigen. Es seien dazu ein stochastischer Prozess  $(X(\omega, t))_{t=1,2,3,\dots}, \omega \in \Omega := \{1, \dots, n\}$  gegeben, der zur Zeit  $t$  eine Lösung  $X(i, t)$ ,  $i = 1, \dots, n$  repräsentiere und  $X^*$  die Menge der Optimallösungen. Mittels der Definition

<sup>1</sup>Transportfahrzeugübergänge  $(i, i)$  haben immer die Ausgangsattraktivität 0 und treten in der Praxis nicht auf

$p_v(t) := P(\cap_{i=1}^n \cap_{k=1}^t \{X(i, t) \notin X^*\}) = 1 - P(\cup_{i=1}^n \cup_{k=1}^t \{X(i, t) \in X^*\})$  kann der folgende Konvergenzsatz formuliert werden:

**Satz 12 (Konvergenzsatz für den ultimativen Algorithmus):** Für den ultimativen Algorithmus gilt unter der Annahme, dass die Elemente der Attraktivitätsmatrix nach oben durch eine konstante Attraktivität und nach unten durch die von  $t$  abhängige Attraktivität  $\Omega(\frac{1}{\ln(t+1)})$  beschränkt sind,  $\lim_{t \rightarrow \infty} p_v(t) = 0$ .

*Beweis.* Der Konvergenzsatz ergibt sich durch Umformulierung des Beweises in Some Issues of ACO Algorithm Convergence, Ant Colony Optimization - Methods and Applications, Ostfeld (2011).  $\square$

**In Worten:** Mit zunehmender Iterationszahl strebt bei langsam abnehmender Attraktivität die Wahrscheinlichkeit, eine Optimallösung zu erhalten, gegen 1.

#### 4.16 BB-MOPSO-Verfahren (Bar-Bones Multiobjective PSO-Verfahren)

Das MOPSO-Verfahren dient zur Minimierung einer vektorwertigen Zielfunktion unter Nebenbedingungen und eventuellen Variablenrestriktionen, was bedeutet, dass alle Komponentenfunktionen simultan unter den Nebenbedingungen und eventuellen Variablenrestriktionen optimiert werden.

#### 4.17 PSO-Update

Der Partikel Swarm Optimizer ist ein popularisiertes Optimierungsverfahren. In jeder Iteration dieses Verfahrens müssen aus den Partikeln der aktuellen Population die Partikel der neuen Population berechnet werden. Dabei erfolgt der Positionsupdate nicht über den herkömmlichen Geschwindigkeits- und Ortsupdate (Kennedy et al. (2001)), sondern über die Formel

$$x_{id}^{n+1} = \begin{cases} N(rp_{id}^n + (1-r)p_{gd}^n, |p_{id}^n - p_{gd}^n|), & U(0, 1) < 0.9, \\ p_{gd}^n & \text{sonst,} \end{cases}$$

wobei  $d = 1, \dots, D, i = 1, \dots, N$  gilt. Hierbei bezeichne  $N(\mu, \rho)$  die Normalverteilung mit Mittelwert  $\mu$  und Standardabweichung  $\rho$ ,  $U$  die Gleichverteilung auf  $(0, 1)$  oder  $[0, 1]$ ,  $N$  die Populationsgröße,  $n$  die Iterationstiefe,  $D$  die Raumdimension und  $r$  eine gleichverteilte Zufallszahl auf  $[0, 1]$ . Ferner bezeichne  $p_i^n$  die beste Position des Partikels  $i$  bis zur  $n$ -ten Iteration und  $p_g^n$  die beste Position aller Partikel bis zur  $n$ -ten Iteration.

#### 4.18 Zielfunktion

Die Zielfunktionen ergeben sich zu

- Summe der Routendauern aller Transportfahrzeuge
- Summe der Transportzeiten des Häckselguts
- Summe der Wartezeiten aller Transportfahrzeuge

- Summe der Verletzung der vorgegebenen Routendauern für die Transportfahrzeuge
- Summe der Verletzung der vorgegebenen Transportzeiten für das Häckselgut
- Summe der Verletzung der vorgegebenen Wartezeiten für die Transportfahrzeuge
- Anzahl der benutzten Fahrzeuge
- Summe der Verletzung der vorgegebenen frühesten optimalen Ankunftszeiten am Schlag und Silo
- Summe der Verletzung der vorgegebenen spätesten optimalen Ankunftszeiten am Schlag und Silo
- Summe der Fahrtkosten der benutzten Transportfahrzeuge

#### 4.19 Ungleichungsnebenbedingungen

Die Ungleichungsnebenbedingungen ergeben sich zu:

- Beladung eines Transportfahrzeuges = zulässiges Ladegewicht
- Servicebeginnzeit eines Transportfahrzeuges  $\leq$  späteste optimale Ankunftszeit am Schlag
- Servicebeginnzeit eines Transportfahrzeuges  $\geq$  früheste optimale Ankunftszeit am Schlag

Algorithmisch kann das MOPSO-Verfahren mittels des obigen PSO-Updates wie folgt beschrieben werden:

##### Algorithmus 5 (MOPSO):

1. Erzeuge eine zufällige Anfangspopulation  $P$  der Größe  $N$  an Partikeln (Individuen) der Raumdimension  $D$ . Setze  $n = 0$ . Berechne nun die Zielfunktionswerte der einzelnen Partikel und notiere als aktuell beste Partikel  $p_i^n$  der einzelnen Partikel  $i, i = 1, \dots, N$ .
2. Bestimme alle nicht dominierten Partikel der aktuellen Population bezüglich den vorliegenden Restriktionen und speichere sie in einer Liste  $A_n$  ab. Setze  $n = n + 1$ .
3. Wähle mittels einer  $q$ -stufigen Turniererlektion nach Anwendung des Dichteoperators ein bestes Partikel  $p_g^n$  aus allen Partikeln aus der Liste  $A_{n-1}$  aus und berechne die Partikel der neuen Population mithilfe der PSO-Updates aus Unterabschnitt 3.2.
4. Berechne die Zielfunktionswerte der einzelnen Partikel der neuen Population und prüfe, ob die Partikel der neuen Population die aktuell besten Partikel dominieren. Ersetze diese gegebenenfalls durch die Partikel der neuen Population.
5. Wende Algorithmus 8 auf jedes Partikel der neuen Population an.
6. Bestimme alle nicht dominierten Partikel der Vereinigung der aktuellen Population und der Liste  $A_{n-1}$  bezüglich den vorliegenden Restriktionen und füge sie der Liste  $A_n$  hinzu.
7. Falls  $A_n$  eine gewisse Größe  $NA$  überschreitet, wird sie durch einen Dichtheitsoperator auf die gewünschte Größe  $NA$  reduziert.
8. Falls die Terminierungsbedingung nicht erfüllt ist, gehe zu 2.. Ansonsten gib  $A_n$  als Menge der nicht dominierten Partikel aus.

**Bemerkung 33:** Falls ein Partikel den Lösungsraum verlässt, so wird es auf die entsprechenden Grenzen der Variablenrestriktionen gesetzt.

**Bemerkung 34:** Ein Partikel  $i$  dominiert ein Partikel  $j$  bezüglich den vorliegenden Restriktionen (Deb (2001)), falls gilt:

1. Partikel  $i$  ist zulässig, aber Partikel  $j$  nicht.
2. Beide Partikel  $i$  und  $j$  sind unzulässig, Partikel  $i$  verletzt jedoch die Nebenbedingungen nicht so stark wie Partikel  $j$ .
3. Beide Partikel  $i$  und  $j$  sind zulässig und Partikel  $i$  dominiert Partikel  $j$ .

**Bemerkung 35:** Ein Partikel  $i$  dominiert Partikel  $j$ , falls der Funktionswert jeder Komponentenfunktion zu Partikel  $i$  nicht größer ist als der Funktionswert derselben Komponentenfunktion zu Partikel  $j$  und mindestens ein Funktionswert zu einer Komponentenfunktion zu Partikel  $i$  echt kleiner ist als der Funktionswert derselben Komponentenfunktion zu Partikel  $j$ .

**Bemerkung 36:** Die nicht dominierten Partikel einer Partikelpopulation  $P$  der Größe  $N$  können wie folgt bestimmt werden:

**Algorithmus 6 (Deb (2001)):**

1. Setze  $P' = \{\}$  und  $i = 1$ .
2. Prüfe, ob die Lösung  $j \in P$  ( $j \neq i$ ) die Lösung  $i$  dominiert. Falls ja, gehe zu 4..
3. Falls  $P$  mehr als ein Partikel enthält, erhöhe  $j$  um Eins und gehe zu 2.. Ansonsten setze  $P' = P' \cup \{i\}$ .
4. Erhöhe  $i$  um Eins. Falls  $i \leq N$  gilt, gehe zu 2.. Ansonsten gib  $P'$  als Menge der nicht dominierten Partikel zurück.

**Bemerkung 37 (Deb (2001)):** Der Dichtheitsoperator in 7. ist wie folgt gegeben:

**Algorithmus 7:**

1. Setze für jedes Partikel  $i$  in  $A$ ,  $d_i = 0$ . Setze  $m = 1$ .
2. Sortiere für die  $m$ -te Komponentenfunktion die Funktionswerte der Partikel in  $A$ , aufsteigend und gib die Indizes der dazugehörigen Partikel in Form eines Arrays Indizes zurück.
3. Setze nun für das erste und letzte Partikel 1 und  $l$  aus  $A$ ,  $d_{1,l} = \infty$  und berechne für  $i = 2, \dots, l - 1$  die Ausdrücke

$$d_{Indizes[i]} = d_{Indizes[i]} + \frac{f_m^{Indizes[i+1]} - f_m^{Indizes[i-1]}}{1 + |f_m^{\max}| + |f_m^{\min}| + f_m^{\max} - f_m^{\min}}.$$

4. Setze  $m = m + 1$ . Gehe zu 2., solange  $m \leq M$  gilt. Dabei bezeichne  $M$  die Anzahl der zu minimierenden Funktionen,  $f_m^{\max}$  das Maximum der  $m$ -ten Komponentenfunktion,  $f_m^{\min}$  das Minimum der  $m$ -ten Komponentenfunktion,  $f_m^{Indizes[i+1]}$  den Funktionswert der  $m$ -ten Komponentenfunktion zum Partikel  $Indizes[i+1]$  und  $f_m^{Indizes[i-1]}$  den Funktionswert der  $m$ -ten Komponentenfunktion zum Partikel  $Indizes[i-1]$ . In 3. wird dann eine  $q$ -stufige Turniererlektion auf die  $d_i$ -Werte angewandt. In 7. werden nun diejenigen Partikel mit den größten  $d_i$ -Werten ausgewählt.

**Bemerkung 38:** Die Mutationsfunktion in 5. für ein Partikel ist wie folgt gegeben:

**Algorithmus 8:**

1. Wähle eine gleich verteilte Zufallszahl  $r$  aus  $[0, 1]$  und prüfe, ob  $e^{\frac{-\alpha t}{T_{\max}}} > r$  gilt. Falls ja, gehe zu 2., ansonsten führe keine Mutation des Partikels durch. Dabei bezeichne  $\alpha$  den Mutationsparameter,  $t$  die Iterationstiefe und  $T_{\max}$  die maximale Anzahl an Iterationen.
2. Wähle eine gleich verteilte Zufallszahl  $d$  aus  $\{1, \dots, n\}$ . Dabei bezeichne  $n$  die Raumdimension. Gehe zu 3..
3. Berechne den Ausdruck  $\text{Range} := (\text{Obere Grenze}(d) - \text{Untere Grenze}(d)) * e^{\frac{-\alpha t}{T_{\max}}}$ . Gehe zu 4..
4. Berechne  $x(d) = x(d) + \text{randn} * \text{Range}$ . Dabei bezeichne  $\text{randn}$  eine standardnormalverteilte Zufallszahl und  $x$  ein Partikel.

**Bemerkung 39 (Deb (2001)):** Um die Verteilung der nicht dominierten Partikel zu bestimmen, wird der relative Abstand der nicht dominierten Partikel berechnet. Dabei wird das Abstandsmaß

$$S = \sqrt{\frac{1}{|Q|} \sum_{i=1}^{|Q|} (d_i - \bar{d})^2},$$

wobei  $d_i := \min_{k \in Q, k \neq i} \sum_{m=1}^M |f_m^i - f_m^k|$  und  $\bar{d} := \frac{\sum_{i=1}^{|Q|} d_i}{|Q|}$ . Dabei bezeichne  $Q$  die Menge der nicht dominierten Partikel. Ferner gilt: Je kleiner der Wert von  $S$  ist, desto gleich verteilter sind die Partikel.

**Bemerkung 40:** Ferner kann für jedes Partikel und ausgewählte Komponentenfunktionen ein Pseudogewichtsvektor ermittelt werden, der es dem Anwender gestattet, seinen Prioritäten entsprechend ein passendes Partikel auszuwählen. Dieser Pseudogewichtsvektor ist gegeben durch

$$(w_x := \sum_{i \in I} f_i(x)), I \subseteq M.$$

Dabei bezeichne  $I$  die Indexmenge der Indizes der ausgewählten Komponentenfunktionen.

**Bemerkung 41:** Die  $q$ -stufige Turnierselktion ( $d$ -Werte, Anzahl der Turniere  $q$ ) in 3. ist wie folgt gegeben:

#### Algorithmus 9:

1. Setze  $\text{Scores} = \{\}$ . Setze  $i = 1$ .
2. Für den  $d_i$ -Wert setze  $\text{Siege} = 0$ .
3. Setze  $j = 1$ . Wähle für das  $j$ -te Turnier eine Zufallszahl  $U_1$  aus  $\{1, \dots, \text{length}(d)\}$ .
4. Falls der  $d_i$ -Wert größer ist als der  $d_{U_1}$ -Wert, setze  $\text{Siege} = \text{Siege} + 1$ .
5. Setze  $j = j + 1$ .
6. Gehe zu 3. solange  $j \leq \text{Anzahl der Turniere } q$  gilt.
7. Füge  $\text{Siege}$  der Menge  $\text{Scores}$  hinzu.
8. Setze  $i = i + 1$  und gehe zu 2. solange  $i \leq \text{Anzahl der } d\text{-Werte}$  gilt.
9. Bestimme die Position des  $d$ -Wertes mit den meisten Siegen.

Im BB-MOPSO wird  $q = 3$  gesetzt.

## 4.20 Anpassung des BB-MOPSO-Verfahrens

### 4.20.1 Optimierung einer Erntekette bei variablen Serviceaufträgen

**Algorithmus 10 (MOPSO):**

1. Erzeuge eine zufällige Anfangspopulation der Größe  $N$  an Partikeln (Individuen) bezüglich der Abfuhrspanne. Zur Erzeugung eines solchen Partikels werden die zur Verfügung stehenden Transportfahrzeuge durchnummeriert und anschließend virtuell per Zufall solange dem Feldhäcksler mittels einer Startlösungsgenerierungsmethode zulässig zugewiesen, bis dieser das Feld abgearbeitet hat. Dabei entsteht eine zufällige Sequenz von Häckselaufträgen, die sich über die Fahrzeugnummern identifizieren lässt. Setze  $n = 0$ . Berechne nun die Zielfunktionswerte der einzelnen Partikel. Aus den so erhaltenen Lösungen wird mittels des Pseudogewichtsvektors (Bemerkung 9) eine passende Lösung ausgewählt wird. Bestimme ferner das aktuell beste Partikel  $p_i^n$  der einzelnen Partikel  $i, i = 1, \dots, N$ .
2. Bestimme alle nicht dominierten Partikel der aktuellen Population bezüglich den vorliegenden Restriktionen und speichere sie in einer Liste  $A_0$  ab. Setze  $n = n + 1$ .
3. Wähle mittels einer  $q$ -stufigen Turniertelektion nach Anwendung des Dichteoperators ein bestes Partikel  $p_g^n$  aus den Partikeln aus der Liste  $A_{n-1}$  aus und berechne die Partikel der neuen Population mithilfe der PSO-Updates aus Unterabschnitt 3.2 und einer Hauptlösungsgenerierungsmethode.
4. Wende Algorithmus 4 auf jedes Partikel der neuen Population an.
5. Berechne die Zielfunktionswerte der einzelnen Partikel der neuen Population, indem optional für jedes Partikel aus den so erhaltenen Lösungen mittels des Pseudogewichtsvektors (Bemerkung 40) eine passende Lösung ausgewählt wird. Prüfe, ob die Partikel der neuen Population die aktuell besten Partikel dominieren. Ersetze diese gegebenenfalls durch die Partikel der neuen Population.
6. Bestimme alle nicht-dominierten Partikel der Vereinigung der aktuellen Population und der Liste  $A_{n-1}$  bezüglich den vorliegenden Restriktionen und füge sie der Liste  $A_n$  hinzu.
7. Falls  $A_n$  eine gewisse Größe  $NA$  überschreitet, wird sie durch einen Dichtheitsoperator auf die gewünschte Größe  $NA$  reduziert.
8. Falls die Terminierungsbedingung nicht erfüllt ist, gehe zu 2.. Ansonsten gib  $A_n$  als Menge der nicht dominierten Partikel aus.

Werden die Transportfahrzeuge mit den Zahlen  $1, \dots, n \in \mathbb{N}$  durchnummeriert und identifiziert man eine Sequenz  $x$  an Transportfahrzeugen eines zufällig erzeugten Partikels  $k$  der Anfangspopulation (siehe dazu auch das Datenpreprocessing) durch zufälliges Anhängen von Transportfahrzeugen in der Menge  $\{1, \dots, n\}^{n_{\max}}$ , wobei  $n_{\max} \in \mathbb{N}$  die maximale Anzahl an Transportfahrzeugen bezeichne, die notwendig ist, um den Schlag abzuarbeiten, so haben die einzelnen Sequenzen an Transportfahrzeugen der Partikel alle gleiche Länge. Zu diesen Partikeln lassen sich Partikel einer neuen Population derart erzeugen, dass nach den PSO-Updates und den Mutationen wiederum alle Sequenzen an Transportfahrzeugen in der Menge  $\{1, \dots, n\}^{n_{\max}}$  liegen. Dabei müssen erstens die durch die PSO-Updates und Mutationen erzeugten Partikel nach dem Anwenden der Funktion  $[\cdot]$  in der Menge  $\{1, \dots, n\}^{n_{\max}}$  liegen. Zweitens muss die in  $\{1, \dots, n\}^{n_{\max}}$  eingebettete Sequenz  $x$  derart eingeschränkt werden, dass der Feldhäcksler nicht länger als notwendig häckselt. Das soeben Gesagte gilt es auch für die weiteren Iterationen zu beachten.

**Bemerkung 42:** Das obige BB-MOPSO-Verfahren kann simultan ausgeführt werden, was bedeutet, dass eine Parallel-Schleife zum Einsatz kommt, um die Rechenzeit zu reduzieren.

### 4.20.2 Konvergenz des obigen BB-MOPSO-Verfahren

In diesem Abschnitt wird gezeigt, dass das obige BB-MOPSO-Verfahren eine gewisse Robustheit erwarten lässt. Dazu der folgende Satz:

**Satz 13:** Für die durch den Update des obigen BB-MOPSO-Verfahren erzeugten Partikel  $(X_i^n)_{n \in \mathbb{N}}$ ,  $i \in \{1, \dots, N\}$  fest, gilt entweder

$$\lim_{n \rightarrow \infty} E(\lfloor X_i^n \rfloor) \stackrel{\|\cdot\| \text{ beliebig}}{=} X^*$$

mit einem eindeutigen Pareto-Optimum  $X^*$  oder es existiert kein Pareto-Optimum.

*Beweis.* Es bezeichne  $X^*$  ein Element der optimalen Pareto-Menge. Dann lassen sich  $p_i^n$  und  $p_g^n$  mit passenden Partikeln  $a_i^n (a_{ij}^n \in \mathbb{Z})$  und  $b_g^n (b_{gj}^n \in \mathbb{Z})$  für alle 'Auftrags'- $j$  darstellen durch

$$p_i^n = X^* + a_i^n \geq 0, p_g^n = X^* + b_g^n \geq 0, n \in \mathbb{N}_0 \text{ passend.}$$

Einsetzen in den BB-MOPSO-Update liefert nun für  $n \geq 1$ :

$$\lfloor E(X_{ij}^n) \rfloor = \begin{cases} \lfloor E(N(rp_{ij}^{n-1} + (1-r)p_{gj}^{n-1}, |p_{ij}^{n-1} - p_{gj}^{n-1}|) + N(0, 1) \cdot \bullet) \rfloor \\ = \lfloor rp_{ij}^{n-1} + (1-r)p_{gj}^{n-1} \rfloor \\ = \lfloor r(X_j^* + a_{ij}^{n-1}) + (1-r)(X_j^* + b_{gj}^{n-1}) \rfloor \\ = X_j^* + \lfloor ra_{ij}^{n-1} + (1-r)b_{gj}^{n-1} \rfloor, U(0, 1) < 0.5, \\ \lfloor E(p_{gj}^{n-1}) \rfloor \\ = \lfloor E(X_j^* + b_{gj}^{n-1}) \rfloor = X_j^* + \lfloor E(b_{gj}^{n-1}) \rfloor, \text{sonst} \end{cases}$$

Mit

$$\begin{aligned} \mu_1^{ij}(z) &:= Z(X_j^* + \lfloor E(b_{gj}^{n-1}) \rfloor) \\ \mu_2^{ij}(z) &:= Z(X_j^* + \lfloor ra_{ij}^{n-1} + (1-r)b_{gj}^{n-1} \rfloor), \end{aligned}$$

liefert die  $z$ -Transformation  $Z(\bullet) := \sum_{i=-\infty}^{\infty} \bullet_i z^{-i}$  unter Beachtung der Tatsache, dass die Folgen

$$\left\{ \begin{array}{l} (l_n := X_j^*)_{n \in \mathbb{N}_0} \\ (l_{-n} := 0)_{n \in \mathbb{N}} \end{array} \right\}, \left\{ \begin{array}{l} (j_n := \lfloor E(b_{gj}^n) \rfloor)_{n \in \mathbb{N}_0} \\ (j_{-n} := 0)_{n \in \mathbb{N}} \end{array} \right\} \quad \text{und} \quad \left\{ \begin{array}{l} (i_n := \lfloor ra_{ij}^n + (1-r)b_{gj}^n \rfloor)_{n \in \mathbb{N}_0} \\ (i_{-n} := 0)_{n \in \mathbb{N}} \end{array} \right\}$$

wegen der Endlichkeit der Fahrzeuganzahl durch eine universelle Konstante  $C \in \mathbb{R}$  beschränkt sind und somit die Laurent-Reihen  $\sum_{i=0}^{\infty} X_j^* z^{-i}$ ,  $G^{ij}(z) := Z((j_n)_{n=-\infty}^{\infty})$  und  $I^{ij}(z) := Z((i_n)_{n=-\infty}^{\infty})$  wegen des Majorantenkriteriums mit Majorante  $M(z) := C \cdot \frac{|z|}{|z|-1}$  fest, wobei  $\frac{z}{z-1}$  der Grenzwert der Laurent-Reihe  $\sum_{i=0}^{\infty} z^{-i}$ ,  $\infty > |z| > 1$  ist, für  $\infty > |z| > 1$  absolut konvergieren, insbesondere auch für  $\infty > |z| > 1$  konvergieren, für  $|z| > 1$  wohldefinierte Funktionen

$$\begin{aligned} \mu_1^{ij}(z) &= X_j^* \underbrace{\frac{z}{z-1}}_{=1+\frac{1}{z-1}, \text{ wobei } z_0:=1 \text{ ein Pol 1. Ordnung ist}} + \underbrace{G^{ij}(z)\frac{1}{z}}_{=Z((j_{n-1})_{n=-\infty}^\infty)}, \\ \mu_2^{ij}(z) &= X_j^* \underbrace{\frac{z}{z-1}}_{=1+\frac{1}{z-1}, \text{ wobei } z_0 \text{ ein Pol 1. Ordnung ist}} + \underbrace{I^{ij}(z)\frac{1}{z}}_{=Z((i_{n-1})_{n=-\infty}^\infty)}, \end{aligned}$$

wobei  $G^{ij}(z)$  und  $I^{ij}(z)$  holomorphe Funktionen auf  $\mathbb{C} \setminus \overline{\mathbb{E}}$  definieren. Angenommen 1 ist eine isolierte Singularität von  $G^{ij}(z)$  und  $I^{ij}(z)$ . Da  $\lim_{z \rightarrow 1} (z-1)G^{ij}(z)$  und  $\lim_{z \rightarrow 1} (z-1)I^{ij}(z)$  beschränkt sind, ist 1 entweder ein Pol oder eine hebbare Singularität von  $G^{ij}(z)$  und  $I^{ij}(z)$ . Ist 1 keine isolierte Singularität von  $G^{ij}(z)$  und  $I^{ij}(z)$ , sondern nur eine Singularität, dann ist 1 auch kein Pol der Ordnung  $\geq 1$  von  $G^{ij}(z)$  und  $I^{ij}(z)$ . Mit Satz 14 und Satz 14 (Zusatz) folgt

$$\begin{aligned} \lim_{z \rightarrow 1+0} X_j^* z + \lim_{z \rightarrow 1+0} \underbrace{G^{ij}(z)}_{= \text{const.}, \text{ Satz 14 (l. Z.)}} \frac{z-1}{z} &= X_j^*, \\ &= \lim_{z \rightarrow 1+0} (z-1)\mu_1^{ij}(z) \\ &\stackrel{\text{Satz 14}}{=} \lim_{n \rightarrow \infty} [E(X_{ij}^n)] \\ \lim_{z \rightarrow 1+0} X_j^* z + \lim_{z \rightarrow 1+0} \underbrace{I^{ij}(z)}_{= \text{const.}, \text{ Satz 14 (l. Z.)}} \frac{z-1}{z} &= X_j^*, \\ &= \lim_{z \rightarrow 1+0} (z-1)\mu_2^{ij}(z) \\ &\stackrel{\text{Satz 14}}{=} \lim_{n \rightarrow \infty} [E(X_{ij}^n)] \end{aligned}$$

und somit  $\lim_{n \rightarrow \infty} [E(X_{ij}^n)] \stackrel{!}{=} X_j^*$  für jedes 'Auftrags'- $j$ . Dabei wurde die Tatsache, dass Potenzreihen auf kompakten Mengen ihres Konvergenzgebietes gleichmäßig konvergieren und  $\sum_{n=1}^{\infty} \bullet_{-n} z^{-n} = \sum_{n=1}^{\infty} \bullet_{-n} u^n$ ,  $u := \frac{1}{z}$ , die komplexe Version des Satzes von Weierstraß zur gliedweisen Differentiation und der folgende Satz verwendet:

**Satz 14:** Die Folge  $\begin{cases} f_n \in \mathbb{C}, n \in \mathbb{N}_0 \\ f_{-n} := 0, n \in \mathbb{N} \end{cases}$  besitze die  $z$ -Transformierte  $F(z) := \sum_{n=0}^{\infty} f_n z^{-n}$ ,  $1 < |z|$ . Darüber hinaus sei  $F(z)$  in ganz  $\mathbb{C}$  holomorph bis auf endlich viele Singularitäten in  $\mathbb{E} := \{z \in \mathbb{C}; |z| < 1\}$  und einem Pol höchstens erster Ordnung im Punkt  $z_0 = 1$ . Dann gilt:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} f_n = \lim_{z \rightarrow 1} (z-1)F(z).$$

Zusatz: Falls die Koeffizienten  $f_n$  beschränkt sind und  $F$  für  $|z| > 1$  holomorph ist, so gilt

$$f_n = 0, n \geq 1, \lim_{n \rightarrow \infty} f_n = 0.$$

*Beweis.* Bei der Funktion  $F(z)$  handelt es sich um eine Laurent-Entwicklung um 0 mit regulärem Teil 1 und Hauptteil  $\sum_{n=1}^{\infty} f_n z^{-n}$ . Die Folgenglieder  $f_n$  können wie folgt berechnet werden: Durch Multiplikation von  $F(z)$  auf beiden Seiten mit  $z^{k-1}$ ,  $k \in \mathbb{Z}$  und anschließender Integration  $\int_{|z|=\rho>1}$  ergibt sich

$$\begin{aligned} & \int_{|z|=\rho>1} F(z) z^{k-1} dz \\ &= \int_{|z|=\rho>1} (z^{k-1} \sum_{n=0}^{\infty} f_n z^{-n}) dz \\ &= \int_{|z|=\rho>1} (\sum_{n=0}^{\infty} f_n z^{-n+k-1}) dz, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & (\text{Rechenr. für Folgen, } (\max\{|z^{k-1}|; z \in K \text{ komp.}\} < \infty, \text{Komp. Konv. von } (\sum_{n=0}^r f_n z^{-n})_{r \in \mathbb{N}_0})) \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} (\int_{|z|=\rho>1} f_n z^{-n+k-1}) dz \quad (\text{Kompakte Konvergenz von } (\sum_{n=0}^r f_n z^{-n+k-1})_{r \in \mathbb{N}_0}) \end{aligned}$$

Mit

$$\int_{|z|=\rho>1} z^{n-k-1} dz = \begin{cases} 0, & n \neq k \\ 2\pi i, & n = k \end{cases}$$

folgt die Darstellung

$$f_n = \frac{1}{2\pi i} \int_{|z|=\rho>1} F(z) z^{n-1} dz, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

Falls  $F$  in  $\mathbb{E}$  Singularitäten hat, kann nach dem Residuensatz das Integral auf der rechten Seite als Summe der Residuen dargestellt werden:

$$f_n = \sum_{k=0}^{N+1} \text{Res}(F(z) z^{n-1}, z_k)$$

mit  $z_{N+1} = 0$ . Jede Singularität  $z_k$  innerhalb des Einheitskreises kann auf kleinen Kreisen mit Radien  $r_k$  umlaufen werden, in deren Inneren keine weitere Singularität mehr liegt:

$$\text{Res}(F(z) z^{n-1}, z_k) = \frac{1}{2\pi i} \int_{K_k} F(z) z^{n-1} dz$$

Die Kreise  $K_k$  können außerdem derart gewählt werden, dass sie im Inneren des Einheitskreises liegen. Hieraus ergibt sich die Abschätzung

$$|\text{Res}(F(z) z^{n-1}, z_k)| \leq \underbrace{\max_{z \in K_k} |F(z)|}_{< \infty} \underbrace{\max_{z \in K_k} |z^{n-1}|}_{n \rightarrow \infty 0} r_k, \quad k = 1, \dots, N+1,$$

und der Grenzwert

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \operatorname{Res}(F(z)z^{n-1}, z_k) = 0, k = 1, \dots, N + 1.$$

Für die Polstelle  $z_0 = 1$  ist die vorangegangene Überlegung nicht möglich. Dort gilt

$$\operatorname{Res}(F(z)z^{n-1}, 1) = \lim_{z \rightarrow 1} (z - 1)F(z)z^{n-1} = \lim_{z \rightarrow 1} (z - 1)F(z).$$

Insgesamt folgt:  $\lim_{n \rightarrow \infty} f_n = \lim_{z \rightarrow 1} (z - 1)F(z)$ .

Falls die Koeffizienten  $f_n, n = 0, 1, 2, 3, \dots$  beschränkt sind und  $F$  für  $|z| > 1$  holomorph ist, so gilt für die eindeutig bestimmten Koeffizienten  $f_n, n \geq 1$

$$0 \leq |f_n| \leq \frac{\max\{|F(z)|; |z| = 2 > 1\}}{\rho^n} \leq \frac{2M}{\rho^n} \xrightarrow{\rho \rightarrow \infty} 0$$

da  $|F(z)| < M \frac{1}{1-|z|^{-1}}, |z| > 1$  (da  $f_n$  beschränkt,  $\forall n$ ),  $M \in \mathbb{R}$  fest, gilt und somit

$$\lim_{n \rightarrow \infty} f_n = 0.$$

□

Wegen der Normäquivalenz auf endlichdimensionalen normierten Räumen folgt mit

$$\|\cdot\| \leq D \|\cdot\|_1, D \in \mathbb{R}$$

fest und der Tatsache, dass der Grenzwert einer Folge in einem normierten Raum eindeutig ist, die Behauptung. □

Ferner kann über vollständige Induktion gezeigt werden, dass die Algorithmen 5 - 10 korrekt arbeiten.

*Beweis.* Induktion. □

## 4.21 Parameter: FEGA, DEGA, Differential Evolution, Ultimativer Algorithmus

Jeder der vorgestellten Algorithmen wurde mit einer `Parallel.For(.,, => { ... })`-Schleife parallelisiert, um die Rechenzeit so gering wie möglich zu halten. Außerdem verbessert die richtige Wahl der Tuningparameter für den FEGA, den DEGA, die Differential-Evolution und den ultimativen Algorithmus deren Konvergenz. Deshalb wurden die Tuningparameter wie folgt gewählt:

### Algorithmus 4 b (DEGA):

Populationsgröße: 50

Nachbarschaftsgröße: 30  
Selektionsgröße: 10  
Maximale Anzahl an Iterationen: 5000  
Zielfunktionsgewichte: 400, 1, 1, 1, 400, 1, 1, 1, 25, 250

**Algorithmus 4 a (FEGA):**

Populationsgröße: 30  
Nachbarschaftsgröße: 10  
Selektionsgröße: 8  
Epsilon:  $10^{-15}$   
Eta:  $10^{-7}$   
Maximale Anzahl an Iterationen: 4000  
Zielfunktionsgewichte: 400, 1, 1, 1, 400, 1, 1, 1, 25, 250

**Algorithmus 4 c (Differential-Evolution):**

Populationsgröße: 50  
Maximale Anzahl an Iterationen: 2000  
Zielfunktionsgewichte: 400, 1, 1, 1, 400, 1, 1, 1, 25, 250

**Algorithmus 4 d (Ultimativer Algorithmus):**

Populationsgröße: 10  
 $\alpha = 0.9$   
Explorationsregler: 0.9  
Iterationszahl zur Veränderung des Explorationsreglers: 20  
Maximale Anzahl an Iterationen: 1000  
Zielfunktionsgewichte: 400, 1, 1, 1, 400, 1, 1, 1, 25, 250

## 5 Ergebnisse: Traditionelle Maiserntekette

Im Folgenden wird der Schlag Hausacker mit den Eckpunkten

(451.22896 m, 172.3337 m) (Schlaganfahrt), (0 km, 172.3337 m), (−10.81741 m, 51.3472 m), (158.86642 m, 45.7086 m), (162.63953 m, 0 m), (460.8976 m, 4.4295 m),

der sich in der Nähe von Ebersberg im Großraum München befindet, von einem Feldhäcksler mit Arbeitsbreite 6 m, Durchsatzleistung von  $124.1467 \frac{t}{h}$  und Fahrgeschwindigkeit  $4.53 \frac{km}{h}$  parallel und ohne Vorgewende abgearbeitet. Dabei wird das Häckselgut von 5 Transportfahrzeugen mit den Beladungskapazitäten (9.43 t, 10.31 t, 10.36 t, 12.03 t, 13.03 t), (10.51 t, 11.49 t, 12.03 t, 12.36 t, 14.41 t), und (14.64 t, 15.88 t, 17.54 t, 17.82 t, 19.88 t)<sup>2</sup> und Endladungsfaktoren von ( $144.5667 \frac{t}{h}$ ,  $198.657 \frac{t}{h}$ ,  $212.8289 \frac{t}{h}$ ,  $171.1569 \frac{t}{h}$ ,  $207.1942 \frac{t}{h}$ ) bei einer Feldfahrgeschwindigkeit von  $13.5 \frac{km}{h}$  abtransportiert. Ferner sollen keine Überladefahrzeuge zum Einsatz kommen. O. B. d. A. (ohne Beschränkung der Allgemeinheit) befinden sich die Transportfahrzeuge um 17.20 Uhr bereits am Silo, wo sie zunächst unbeladen gewogen werden. Die Wiegezeit beträgt dabei 0.03 h. Ferner nimmt der Feldhäcksler um 17.99861 Uhr seine Arbeit auf, fährt in seine erste Parallelfahrspur im Punkt (451.22896 m, 172.3337 m) in Richtung (0 m, 172.3337 m) ein und die Transportfahrzeuge sollen spätestens um 21.00 Uhr ihre Arbeit am Silo, das eine hinreichend große Verdichtungsleistung besitzt, beenden. Auf der nächsten Seite ist ein Transportfahrzeugwechsel dargestellt, wobei der Feldhäcksler von der 8. Bahn in die 9. Bahn wechselt und dann in der 9. Bahn Transportfahrzeug 4 Transportfahrzeug 2 ablöst. Ferner ist ersichtlich, dass Serviceauftrag 17 vor Serviceauftrag 16 erledigt wird. Der Optimierungsalgorithmus ist derart gebaut, dass er immer einen aktuell zeitoptimalen Serviceauftrag bereitstellt, soll heissen, dass er, falls er einen vorab bestimmten optimalen Serviceauftrag nicht einhalten kann, einen anderen aktuell zeitoptimalen Serviceauftrag auswählt und den vorab bestimmten optimalen Serviceauftrag später zeitoptimal abarbeitet, siehe hierzu die Startlösungs- und Hauptlösungsgenerierungsmethode. Ferner ist der Optimierungsalgorithmus derart gebaut, dass er, falls möglich, den Transportfahrzeugfahrer lieber etwas langsamer fahren lässt als dass er warten muss. Ein weiterer Vorteil dieser Strategie ist, dass unerwartete Störungen in vielen Fällen robust kompensiert werden können.

---

<sup>2</sup>Diese Beladungen liegen etwa 10 Prozent unter den maximal möglichen Beladungen der Transportfahrzeuge

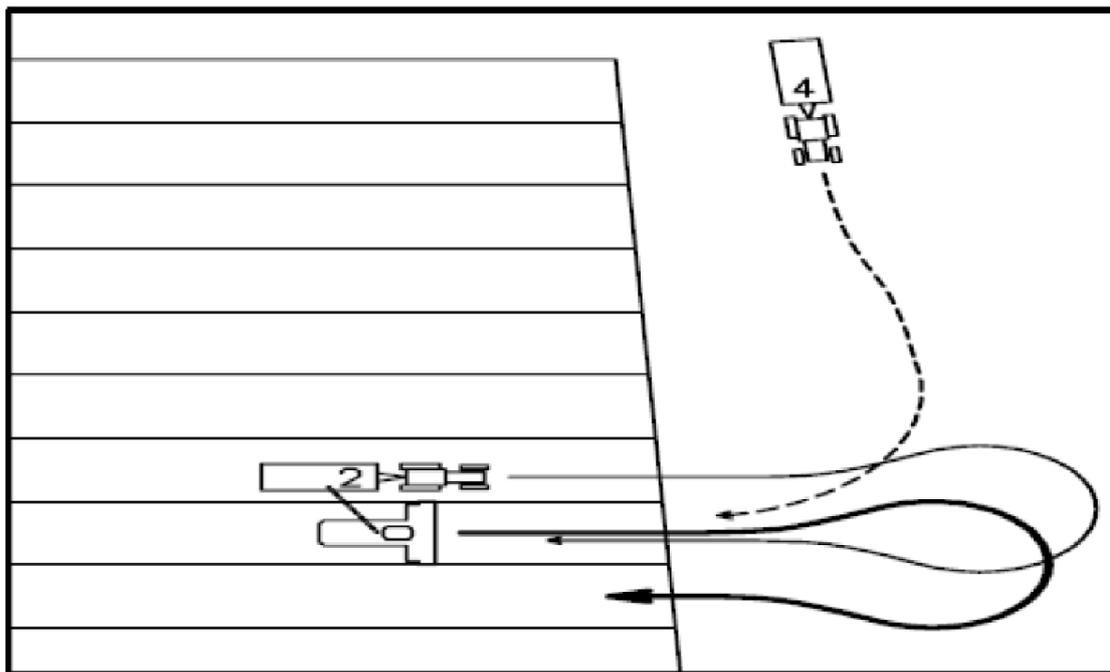
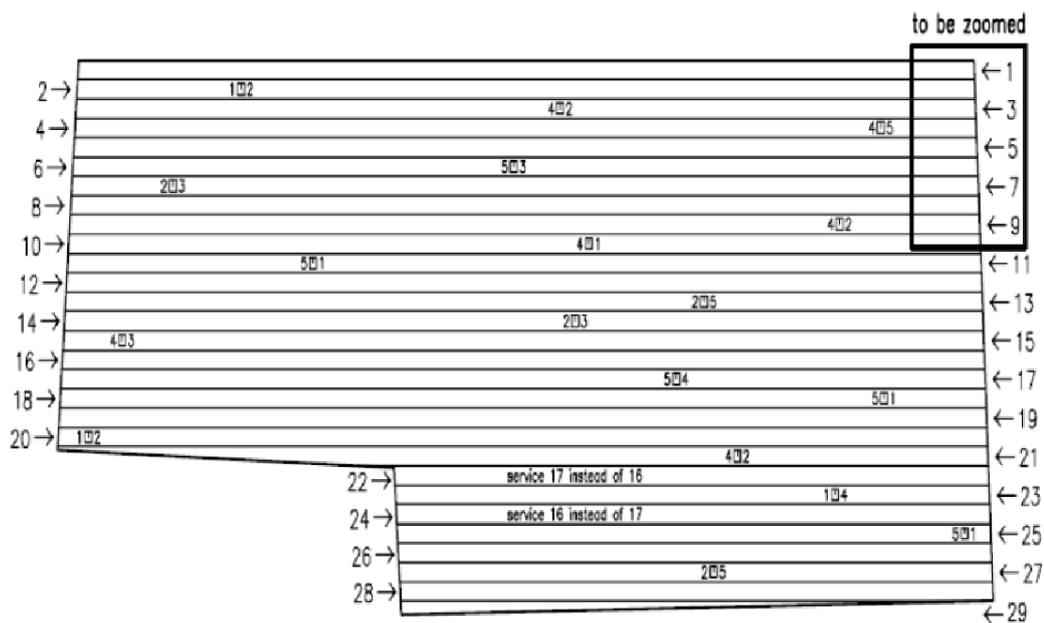


Abbildung 24: Geometrie des Schlages Hausacker und Beispiel eines Feldszenarios.

Darüber hinaus ist eine verspätete Beladung am Felddräger und eine verspätete Entladung am Silo von 0.005 h gestattet, um jegliche Manöver zu kompensieren. Die Fahrzeit vom Silo zum Schlagrand betragen (0.1084, 0.1184, 0.1163, 0.0953, 0.1124) h, die Fahrzeit vom Schlagrand zum Silo (0.1583, 0.1538, 0.1440, 0.1458, 0.1592) h.

Mit diesen Eingabedaten und den obigen Optimierungsparametern wird nun der DEGA, der FEGA, die Differential-Evolution und der ultimative Algorithmus gestartet. Die

Ergebnisse der einzelnen Algorithmen befinden sich als Tabellen im Anhang.

## 6 Diskussion/Schlussfolgerungen: Traditionelle Maiserntekette

**Bemerkung 43:** Die optimalen Abfahrtszeiten am Depot ergeben sich durch Subtraktion der Summe aus der Fahrzeit vom Depot zum Silo und der Fahrzeit vom Silo zum Feldhäcksler von den optimalen Servicebeginnzeiten der jeweils ersten Serviceaufträge am Feldhäcksler.

**Bemerkung 44:** Die Berechnungen zeigen, dass mit zunehmender Beladung der Transportfahrzeuge die Einsatzzeit des Feldhäckslers bis zu ca. 0.28 h abnimmt **und** die Wartezeiten des Feldhäckslers bezüglich der optimalen Serviceaufträge dabei gegen Null streben. Ferner ist zu bemerken, dass die Rechenzeit beim DEGA, FEGA und der Differential-Evolution auf einem Computer mit einem i7-4790 Prozessor und 4 Kernen zu je 2 Threads bei 2 Minuten liegt, hingegen der ultimative Algorithmus nur 9 Sekunden benötigt.

Wird für die Kosten einer Feldhäckslerstunde der Betrag  $ax, a \in \mathbb{R}$ , Euro und für die Kosten einer Transportfahrzeugstunde der Betrag  $x$  Euro,  $x > 0$  Euro angesetzt, was bedeutet, dass die Leitmaschine pro Stunde  $a$  mal so teuer ist als ein Abfuhrgepann, so ergeben sich für die Einsatz- und Wartezeiten der optimierten Erntekette mit den Ergebnissen aus dem Anhang Gesamtkosten in Höhe von:

### DEGA - Berechnung 1:

$$\begin{aligned}
 & ax \left( \underbrace{2.9153 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des Feldhäckslers}} + \text{Schmutzterm an Wendzeiten des Feldhäckslers} \right) \times \frac{\text{Euro}}{\text{h}} \\
 & + x \left( \underbrace{0.1084 \text{ h}}_{\text{Anfahrtszeit...}} + \underbrace{0.0020 \text{ h}}_{\text{1. Feldfahrzeit...}} + \underbrace{2.5750 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des 1. Transportfahrzeugs}} \right. \\
 & + \underbrace{0.1184 \text{ h}}_{\text{Anfahrtszeit...}} + \underbrace{0.0276 \text{ h}}_{\text{1. Feldfahrzeit...}} + \underbrace{2.1846 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des 2. Transportfahrzeugs}} \\
 & + \underbrace{0.1163 \text{ h}}_{\text{Anfahrtszeit...}} + \underbrace{0.0149 \text{ h}}_{\text{1. Feldfahrzeit...}} + \underbrace{2.6029 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des 3. Transportfahrzeugs}} \\
 & + \underbrace{0.0953 \text{ h}}_{\text{Anfahrtszeit...}} + \underbrace{0 \text{ h}}_{\text{1. Feldfahrzeit...}} + \underbrace{3.1507 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des 4. Transportfahrzeugs}} \\
 & \left. + \underbrace{0.1124 \text{ h}}_{\text{Anfahrtszeit...}} + \underbrace{0.0300 \text{ h}}_{\text{1. Feldfahrzeit...}} + \underbrace{2.8386 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des 5. Transportfahrzeugs}} \right) \times \frac{\text{Euro}}{\text{h}} \stackrel{a=3, x=90}{\approx} 1988.79 \text{Euro}
 \end{aligned} \tag{46}$$

### DEGA - Berechnung 2:

$$\begin{aligned}
 & ax \left( \underbrace{2.8820 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des Feldhäckslers}} + \text{Schmutzterm an Wendzeiten des Feldhäckslers} \right) \times \frac{\text{Euro}}{\text{h}} \\
 & + x \left( \underbrace{0.1084 \text{ h}}_{\text{Anfahrtszeit...}} + \underbrace{0 \text{ h}}_{\text{1. Feldfahrzeit...}} + \underbrace{2.9358 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des 1. Transportfahrzeugs}} \right)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \underbrace{0.1184 \text{ h}}_{\text{Anfahrtszeit...}} + \underbrace{0.0017 \text{ h}}_{1. \text{ Feldfahrzeit...}} + \underbrace{2.8291 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des 2. Transportfahrzeugs}} \\
& + \underbrace{0.1163 \text{ h}}_{\text{Anfahrtszeit...}} + \underbrace{0.005 \text{ h}}_{1. \text{ Feldfahrzeit...}} + \underbrace{2.3400 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des 3. Transportfahrzeugs}} \\
& + \underbrace{0.0953 \text{ h}}_{\text{Anfahrtszeit...}} + \underbrace{0.0328 \text{ h}}_{1. \text{ Feldfahrzeit...}} + \underbrace{2.8238 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des 4. Transportfahrzeugs}} \\
& + \underbrace{0.1124 \text{ h}}_{\text{Anfahrtszeit...}} + \underbrace{0.0290 \text{ h}}_{1. \text{ Feldfahrzeit...}} + \underbrace{2.2800 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des 5. Transportfahrzeugs}} \quad ) \times \frac{\text{Euro}}{\text{h}} \stackrel{a=3, x=90}{\approx} 1966.92 \text{Euro}
\end{aligned} \tag{47}$$

**DEGA - Berechnung 3:**

$$\begin{aligned}
& ax( \underbrace{2.6311 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des Feldhäckslers}} + \text{Schmutzterm an Wendzeiten des Feldhäckslers} ) \times \frac{\text{Euro}}{\text{h}} \\
& + x( \underbrace{0.1084 \text{ h}}_{\text{Anfahrtszeit...}} + \underbrace{0.030 \text{ h}}_{1. \text{ Feldfahrzeit...}} + \underbrace{1.4857 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des 1. Transportfahrzeugs}} \\
& + \underbrace{0.1184 \text{ h}}_{\text{Anfahrtszeit...}} + \underbrace{0.0032 \text{ h}}_{1. \text{ Feldfahrzeit...}} + \underbrace{2.4770 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des 2. Transportfahrzeugs}} \\
& + \underbrace{0.1163 \text{ h}}_{\text{Anfahrtszeit...}} + \underbrace{0 \text{ h}}_{1. \text{ Feldfahrzeit...}} + \underbrace{2.6099 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des 3. Transportfahrzeugs}} \\
& + \underbrace{0.0953 \text{ h}}_{\text{Anfahrtszeit...}} + \underbrace{0.0205 \text{ h}}_{1. \text{ Feldfahrzeit...}} + \underbrace{2.4886 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des 4. Transportfahrzeugs}} \\
& + \underbrace{0.1124 \text{ h}}_{\text{Anfahrtszeit...}} + \underbrace{0.0236 \text{ h}}_{1. \text{ Feldfahrzeit...}} + \underbrace{1.0016 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des 5. Transportfahrzeugs}} \quad ) \times \frac{\text{Euro}}{\text{h}} \stackrel{a=3, x=90}{\approx} 1616.05 \text{Euro}
\end{aligned} \tag{48}$$

**FEGA - Berechnung 1:**

$$\begin{aligned}
& ax( \underbrace{2.9473 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des Feldhäckslers}} + \text{Schmutzterm an Wendzeiten des Feldhäckslers} ) \times \frac{\text{Euro}}{\text{h}} \\
& + x( \underbrace{0.1084 \text{ h}}_{\text{Anfahrtszeit...}} + \underbrace{0.0254 \text{ h}}_{1. \text{ Feldfahrzeit...}} + \underbrace{2.8260 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des 1. Transportfahrzeugs}} \\
& + \underbrace{0.1184 \text{ h}}_{\text{Anfahrtszeit...}} + \underbrace{0 \text{ h}}_{1. \text{ Feldfahrzeit...}} + \underbrace{3.1779 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des 2. Transportfahrzeugs}} \\
& + \underbrace{0.1163 \text{ h}}_{\text{Anfahrtszeit...}} + \underbrace{0.0048 \text{ h}}_{1. \text{ Feldfahrzeit...}} + \underbrace{2.8085 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des 3. Transportfahrzeugs}} \\
& + \underbrace{0.0953 \text{ h}}_{\text{Anfahrtszeit...}} + \underbrace{0.0194 \text{ h}}_{1. \text{ Feldfahrzeit...}} + \underbrace{2.4749 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des 4. Transportfahrzeugs}} \\
& + \underbrace{0.1124 \text{ h}}_{\text{Anfahrtszeit...}} + \underbrace{0.0283 \text{ h}}_{1. \text{ Feldfahrzeit...}} + \underbrace{2.8336 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des 5. Transportfahrzeugs}} \quad ) \times \frac{\text{Euro}}{\text{h}} \stackrel{a=3, x=90}{\approx} 2066.65 \text{Euro}
\end{aligned} \tag{49}$$

**FEGA - Berechnung 2:**

$$\begin{aligned}
& ax( \underbrace{2.8686 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des Feldhäckslers}} + \text{Schmutzterm an Wendzeiten des Feldhäckslers} ) \times \frac{\text{Euro}}{\text{h}} \\
& + x( \underbrace{0.1084 \text{ h}}_{\text{Anfahrtszeit...}} + \underbrace{0.0289 \text{ h}}_{\text{1. Feldfahrzeit...}} + \underbrace{2.8570 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des 1. Transportfahrzeugs}} \\
& + \underbrace{0.1184 \text{ h}}_{\text{Anfahrtszeit...}} + \underbrace{0.0017 \text{ h}}_{\text{1. Feldfahrzeit...}} + \underbrace{2.8935 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des 2. Transportfahrzeugs}} \\
& + \underbrace{0.1163 \text{ h}}_{\text{Anfahrtszeit...}} + \underbrace{0.0309 \text{ h}}_{\text{1. Feldfahrzeit...}} + \underbrace{2.4259 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des 3. Transportfahrzeugs}} \\
& + \underbrace{0.0953 \text{ h}}_{\text{Anfahrtszeit...}} + \underbrace{0.0328 \text{ h}}_{\text{1. Feldfahrzeit...}} + \underbrace{2.3801 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des 4. Transportfahrzeugs}} \\
& + \underbrace{0.1124 \text{ h}}_{\text{Anfahrtszeit...}} + \underbrace{0 \text{ h}}_{\text{1. Feldfahrzeit...}} + \underbrace{2.8300 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des 5. Transportfahrzeugs}} ) \times \frac{\text{Euro}}{\text{h}} \stackrel{a=3, x=90}{\approx} 1979.30 \text{ Euro}
\end{aligned} \tag{50}$$

**FEGA - Berechnung 3:**

$$\begin{aligned}
& ax( \underbrace{2.6384 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des Feldhäckslers}} + \text{Schmutzterm an Wendzeiten des Feldhäckslers} ) \times \frac{\text{Euro}}{\text{h}} \\
& + x( \underbrace{0.1084 \text{ h}}_{\text{Anfahrtszeit...}} + \underbrace{0.0254 \text{ h}}_{\text{1. Feldfahrzeit...}} + \underbrace{2.0306 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des 1. Transportfahrzeugs}} \\
& + \underbrace{0.1184 \text{ h}}_{\text{Anfahrtszeit...}} + \underbrace{0.0197 \text{ h}}_{\text{1. Feldfahrzeit...}} + \underbrace{2.5538 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des 2. Transportfahrzeugs}} \\
& + \underbrace{0.1163 \text{ h}}_{\text{Anfahrtszeit...}} + \underbrace{0.0053 \text{ h}}_{\text{1. Feldfahrzeit...}} + \underbrace{2.0298 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des 3. Transportfahrzeugs}} \\
& + \underbrace{0.0953 \text{ h}}_{\text{Anfahrtszeit...}} + \underbrace{0 \text{ h}}_{\text{1. Feldfahrzeit...}} + \underbrace{2.5833 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des 4. Transportfahrzeugs}} \\
& + \underbrace{0.1124 \text{ h}}_{\text{Anfahrtszeit...}} + \underbrace{0.0276 \text{ h}}_{\text{1. Feldfahrzeit...}} + \underbrace{2.2336 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des 5. Transportfahrzeugs}} ) \times \frac{\text{Euro}}{\text{h}} \stackrel{a=3, x=90}{\approx} 1741.17 \text{ Euro}
\end{aligned} \tag{51}$$

**Differential Evolution - Berechnung 1:**

$$\begin{aligned}
& ax( \underbrace{3.0189 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des Feldhäckslers}} + \text{Schmutzterm an Wendzeiten des Feldhäckslers} ) \times \frac{\text{Euro}}{\text{h}} \\
& + x( \underbrace{0.1084 \text{ h}}_{\text{Anfahrtszeit...}} + \underbrace{0.0074 \text{ h}}_{\text{1. Feldfahrzeit...}} + \underbrace{1.8495 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des 1. Transportfahrzeugs}} \\
& + \underbrace{0.1184 \text{ h}}_{\text{Anfahrtszeit...}} + \underbrace{0.0204 \text{ h}}_{\text{1. Feldfahrzeit...}} + \underbrace{2.5874 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des 2. Transportfahrzeugs}}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \underbrace{0.1163 \text{ h}}_{\text{Anfahrtszeit...}} + \underbrace{0.0330 \text{ h}}_{1. \text{ Feldfahrzeit...}} + \underbrace{2.8982 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des 3. Transportfahrzeugs}} \\
& + \underbrace{0.0953 \text{ h}}_{\text{Anfahrtszeit...}} + \underbrace{0 \text{ h}}_{1. \text{ Feldfahrzeit...}} + \underbrace{3.2492 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des 4. Transportfahrzeugs}} \\
& + \underbrace{0.1124 \text{ h}}_{\text{Anfahrtszeit...}} + \underbrace{0.0221 \text{ h}}_{1. \text{ Feldfahrzeit...}} + \underbrace{2.8308 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des 5. Transportfahrzeugs}}
\end{aligned}
\left. \vphantom{\begin{aligned} \dots \end{aligned}} \right) \times \frac{\text{Euro}}{\text{h}} \stackrel{a=3, x=90}{\approx} 2022.46 \text{ Euro}$$

(52)

**Differential Evolution - Berechnung 2:**

$$\begin{aligned}
& ax \left( \underbrace{2.8941 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des Feldhäckslers}} + \text{Schmutzterm an Wendzeiten des Feldhäckslers} \right) \times \frac{\text{Euro}}{\text{h}} \\
& + x \left( \underbrace{0.1084 \text{ h}}_{\text{Anfahrtszeit...}} + \underbrace{0.0019 \text{ h}}_{1. \text{ Feldfahrzeit...}} + \underbrace{2.3607 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des 1. Transportfahrzeugs}} \right. \\
& + \underbrace{0.1184 \text{ h}}_{\text{Anfahrtszeit...}} + \underbrace{0.0102 \text{ h}}_{1. \text{ Feldfahrzeit...}} + \underbrace{2.3673 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des 2. Transportfahrzeugs}} \\
& + \underbrace{0.1163 \text{ h}}_{\text{Anfahrtszeit...}} + \underbrace{0 \text{ h}}_{1. \text{ Feldfahrzeit...}} + \underbrace{2.7248 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des 3. Transportfahrzeugs}} \\
& + \underbrace{0.0953 \text{ h}}_{\text{Anfahrtszeit...}} + \underbrace{0.0330 \text{ h}}_{1. \text{ Feldfahrzeit...}} + \underbrace{2.7559 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des 4. Transportfahrzeugs}} \\
& \left. + \underbrace{0.1124 \text{ h}}_{\text{Anfahrtszeit...}} + \underbrace{0.0287 \text{ h}}_{1. \text{ Feldfahrzeit...}} + \underbrace{2.8278 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des 5. Transportfahrzeugs}} \right) \times \frac{\text{Euro}}{\text{h}} \stackrel{a=3, x=90}{\approx} 1954.69 \text{ Euro}
\end{aligned}$$

(53)

**Differential Evolution - Berechnung 3:**

$$\begin{aligned}
& ax \left( \underbrace{2.6070 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des Feldhäckslers}} + \text{Schmutzterm an Wendzeiten des Feldhäckslers} \right) \times \frac{\text{Euro}}{\text{h}} \\
& + x \left( \underbrace{0.1084 \text{ h}}_{\text{Anfahrtszeit...}} + \underbrace{0.0299 \text{ h}}_{1. \text{ Feldfahrzeit...}} + \underbrace{2.1969 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des 1. Transportfahrzeugs}} \right. \\
& + \underbrace{0.1184 \text{ h}}_{\text{Anfahrtszeit...}} + \underbrace{0.0032 \text{ h}}_{1. \text{ Feldfahrzeit...}} + \underbrace{2.3301 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des 2. Transportfahrzeugs}} \\
& + \underbrace{0.1163 \text{ h}}_{\text{Anfahrtszeit...}} + \underbrace{0.0197 \text{ h}}_{1. \text{ Feldfahrzeit...}} + \underbrace{2.4547 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des 3. Transportfahrzeugs}} \\
& + \underbrace{0.0953 \text{ h}}_{\text{Anfahrtszeit...}} + \underbrace{0 \text{ h}}_{1. \text{ Feldfahrzeit...}} + \underbrace{2.8663 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des 4. Transportfahrzeugs}} \\
& \left. + \underbrace{0.1124 \text{ h}}_{\text{Anfahrtszeit...}} + \underbrace{0.0276 \text{ h}}_{1. \text{ Feldfahrzeit...}} + \underbrace{1.6973 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des 5. Transportfahrzeugs}} \right) \times \frac{\text{Euro}}{\text{h}} \stackrel{a=3, x=90}{\approx} 1742.97 \text{ Euro}
\end{aligned}$$

(54)

**Ultimativer Algorithmus - Berechnung 1:**

$$\begin{aligned}
& ax( \underbrace{3.0334 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des Feldhäckslers}} + \text{Schmutzterm an Wendzeiten des Feldhäckslers} ) \times \frac{\text{Euro}}{\text{h}} \\
& + x( \underbrace{0.1084 \text{ h}}_{\text{Anfahrtszeit...}} + \underbrace{0 \text{ h}}_{\text{1. Feldfahrzeit...}} + \underbrace{3.0071 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des 1. Transportfahrzeugs}} \\
& + \underbrace{0.1184 \text{ h}}_{\text{Anfahrtszeit...}} + \underbrace{0.0144 \text{ h}}_{\text{1. Feldfahrzeit...}} + \underbrace{2.8478 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des 2. Transportfahrzeugs}} \\
& + \underbrace{0.1163 \text{ h}}_{\text{Anfahrtszeit...}} + \underbrace{0.0259 \text{ h}}_{\text{1. Feldfahrzeit...}} + \underbrace{3.1666 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des 3. Transportfahrzeugs}} \\
& + \underbrace{0.0953 \text{ h}}_{\text{Anfahrtszeit...}} + \underbrace{0.0157 \text{ h}}_{\text{1. Feldfahrzeit...}} + \underbrace{2.7963 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des 4. Transportfahrzeugs}} \\
& + \underbrace{0.1124 \text{ h}}_{\text{Anfahrtszeit...}} + \underbrace{0.0221 \text{ h}}_{\text{1. Feldfahrzeit...}} + \underbrace{2.4019 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des 5. Transportfahrzeugs}} ) \times \frac{\text{Euro}}{\text{h}} \stackrel{a=3, x=90}{\approx} 2098.79 \text{Euro}
\end{aligned} \tag{55}$$

**Ultimativer Algorithmus - Berechnung 2:**

$$\begin{aligned}
& ax( \underbrace{2.8525 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des Feldhäckslers}} + \text{Schmutzterm an Wendzeiten des Feldhäckslers} ) \times \frac{\text{Euro}}{\text{h}} \\
& + x( \underbrace{0.1084 \text{ h}}_{\text{Anfahrtszeit...}} + \underbrace{0 \text{ h}}_{\text{1. Feldfahrzeit...}} + \underbrace{2.3422 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des 1. Transportfahrzeugs}} \\
& + \underbrace{0.1184 \text{ h}}_{\text{Anfahrtszeit...}} + \underbrace{0.0288 \text{ h}}_{\text{1. Feldfahrzeit...}} + \underbrace{2.8957 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des 2. Transportfahrzeugs}} \\
& + \underbrace{0.1163 \text{ h}}_{\text{Anfahrtszeit...}} + \underbrace{0.008 \text{ h}}_{\text{1. Feldfahrzeit...}} + \underbrace{2.8971 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des 3. Transportfahrzeugs}} \\
& + \underbrace{0.0953 \text{ h}}_{\text{Anfahrtszeit...}} + \underbrace{0.005 \text{ h}}_{\text{1. Feldfahrzeit...}} + \underbrace{2.4852 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des 4. Transportfahrzeugs}} \\
& + \underbrace{0.1124 \text{ h}}_{\text{Anfahrtszeit...}} + \underbrace{0.0263 \text{ h}}_{\text{1. Feldfahrzeit...}} + \underbrace{2.5804 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des 5. Transportfahrzeugs}} ) \times \frac{\text{Euro}}{\text{h}} \stackrel{a=3, x=90}{\approx} 1958.23 \text{Euro}
\end{aligned} \tag{56}$$

**Ultimativer Algorithmus - Berechnung 3:**

$$\begin{aligned}
& ax( \underbrace{2.6194 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des Feldhäckslers}} + \text{Schmutzterm an Wendzeiten des Feldhäckslers} ) \times \frac{\text{Euro}}{\text{h}} \\
& + x( \underbrace{0.1084 \text{ h}}_{\text{Anfahrtszeit...}} + \underbrace{0.0205 \text{ h}}_{\text{1. Feldfahrzeit...}} + \underbrace{2.3123 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des 1. Transportfahrzeugs}} \\
& + \underbrace{0.1184 \text{ h}}_{\text{Anfahrtszeit...}} + \underbrace{0.0213 \text{ h}}_{\text{1. Feldfahrzeit...}} + \underbrace{2.4487 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des 2. Transportfahrzeugs}}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \underbrace{0.1163 \text{ h}}_{\text{Anfahrtszeit...}} + \underbrace{0 \text{ h}}_{\text{1. Feldfahrzeit...}} + \underbrace{2.3190 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des 3. Transportfahrzeugs}} \\
 & + \underbrace{0.0953 \text{ h}}_{\text{Anfahrtszeit...}} + \underbrace{0.005 \text{ h}}_{\text{1. Feldfahrzeit...}} + \underbrace{1.7902 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des 4. Transportfahrzeugs}} \\
 & + \underbrace{0.1124 \text{ h}}_{\text{Anfahrtszeit...}} + \underbrace{0.006 \text{ h}}_{\text{1. Feldfahrzeit...}} + \underbrace{2.4973 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des 5. Transportfahrzeugs}} \Big) \times \frac{\text{Euro}}{\text{h}} \stackrel{a=3, x=90}{\approx} 1730.31 \text{ Euro}
 \end{aligned} \tag{57}$$

Für eine Wendung des Feldhäckslers sind ca. 10 Sekunden erforderlich. Somit kann der Schmutzterm durch die Anzahl der Wendungen des Feldhäckslers  $x \cdot 10 \text{ s}$  nach oben abgeschätzt werden. Andererseits ergeben sich aus den Daten der nicht optimierten Erntekette, basierend auf der Prozesskettenanalyse-Software von Herrn Dr. Valentin Heizinger, der diese in seiner Dissertation entwickelt hat, und ausgeführt durch Herrn Liebhardt im Rahmen seiner Masterarbeit am Lehrstuhl für Agrarsystemtechnik der Technischen Universität München über das Thema Analyse und Optimierung von Maisernteketten, für die Einsatz- und Wartezeiten der **nicht optimierten Erntekette** Gesamtkosten in Höhe von

$$\begin{aligned}
 & ax \underbrace{2.8900 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des Feldhäckslers}} \times \frac{\text{Euro}}{\text{h}} \\
 & + x \left( \underbrace{\dots}_{\text{1. Wartezeit}} + \underbrace{0.1084 \text{ h}}_{\text{Anfahrtszeit...}} + \underbrace{0.0333 \text{ h}}_{\text{1. Feldfahrzeit...}} + \underbrace{2.3300 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des 1. Transportfahrzeugs}} \right. \\
 & + \underbrace{\dots}_{\text{1. Wartezeit}} + \underbrace{0.1184 \text{ h}}_{\text{Anfahrtszeit...}} + \underbrace{0.0333 \text{ h}}_{\text{1. Feldfahrzeit...}} + \underbrace{2.7800 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des 2. Transportfahrzeugs}} \\
 & + \underbrace{\dots}_{\text{1. Wartezeit}} + \underbrace{0.1163 \text{ h}}_{\text{Anfahrtszeit...}} + \underbrace{0 \text{ h}}_{\text{1. Feldfahrzeit...}} + \underbrace{2.8200 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des 3. Transportfahrzeugs}} \\
 & + \underbrace{\dots}_{\text{1. Wartezeit}} + \underbrace{0.0953 \text{ h}}_{\text{Anfahrtszeit...}} + \underbrace{0.0333 \text{ h}}_{\text{1. Feldfahrzeit...}} + \underbrace{2.8100 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des 4. Transportfahrzeugs}} \\
 & \left. + \underbrace{\dots}_{\text{1. Wartezeit}} + \underbrace{0.1124 \text{ h}}_{\text{Anfahrtszeit...}} + \underbrace{0.0333 \text{ h}}_{\text{1. Feldfahrzeit...}} + \underbrace{2.8600 \text{ h}}_{\text{Einsatzzeit des 5. Transportfahrzeugs}} \right) \times \frac{\text{Euro}}{\text{h}} \\
 & \stackrel{a=3, x=90}{\approx} 2054.70 + \dots \text{ Euro}
 \end{aligned} \tag{58}$$

Da der Schlag Hausacker am Ende einer gesamten Erntekette abgearbeitet wurde, stimmen die Wartezeiten 0.41 h, 0.39 h, 0.14 h, 0.29 h und 0.34 h der Transportfahrzeuge vor ihrem ersten Serviceauftrag wahrscheinlich nicht mit den Wartezeiten der Transportfahrzeuge vor ihrem ersten Serviceauftrag im Fall, dass der Schlag Hausacker zu Beginn der gesamten Erntekette abgearbeitet wird, überein. Deshalb wurden diese Zeiten durch einen Platzhalter ... ersetzt. Diese Zeiten können im Allgemeinen nicht = 0 gesetzt werden. Eine solche Setzung hat ohne den Time-Shift (Bemerkung 43) aus der optimierten Version in den allermeisten Fällen hohe Wartezeiten an anderen Zeitpunkten während der Ernte zur Folge. Darüber hinaus ist bemerkenswert, dass aufgrund der zeitlichen Prozessabfolge bereits ein qualitativ hochwertiges lokales Optimum aus den nicht optimierten Daten resultiert. Dieses lokale Optimum kann als Folge statistischer Schwankungen in den einzelnen Prozesszeiten der Erntemaschinen, die virtuell mit einer stochastischen Optimierung in Verbindung gebracht werden können, interpretiert werden. Die Optimie-

Die obige Erntekette wird zusätzlich dadurch erschwert, dass die Entfernung Silo-Schlag klein ist und in solchen Fällen auch gute bis sehr gute manuelle Planungen möglich sind, was an den Gesamtkosten der nicht optimierten Erntekette ersichtlich ist. Die Optimierungsergebnisse wären noch besser ausgefallen, wenn ein Telemetriesystem für den Feldhäcksler zur Verfügung gestanden hätte. Damit wäre eine noch genauere Bestimmung der Feldhäckslerleistung nach oben möglich gewesen. Nichtsdestotrotz können nach den obigen Berechnungen bis zu ca. 580 Euro für den Schlag Hausacker eingespart werden, was einer Kostenersparnis von 26.4 % gegenüber der nicht optimierten Version entspricht.

Kurz zusammengefasst, bestätigen die Ergebnisse zweifelsohne die theoretischen Konvergenzsätze für die vier in dieser Arbeit entwickelten Algorithmen, mit den es auch ohne großen Mehraufwand möglich ist, große Ernteketten, gegeben durch eine Aneinanderreihung mehrerer traditioneller Ernteketten, statisch sowie dynamisch zu optimieren, siehe dazu das Unterkapitel Gesamtoptimierung im Kapitel weiterführende Arbeiten.

Tabelle 2: Daten der nicht optimierten Erntekette zum Schlag Hausacker in der Nähe von Ebersberg im Großraum München

Transporteinheit	Servicebeginnzeit Häcksler 1	Servicezeit Häcksler 1	Abfahrtszeit am Häcksler 1	Servicebeginnzeit Silo 1	Servicezeit Silo 1	Abfahrtszeit Silo 1	Servicebeginnzeit Häcksler 2	Servicezeit Häcksler 2	Abfahrtszeit am Häcksler 2	Servicebeginnzeit Silo 2	Servicezeit Silo 2	Abfahrtszeit Silo 2
1	18:24:56	0:03:34	18:28:30	18:40:20	0:02:23	18:42:43	18:55:20	0:05:44	19:01:04	19:10:53	0:02:24	19:13:17
2	18:13:55	0:04:58	18:18:53	18:29:03	0:02:41	18:31:44	18:43:30	0:04:25	18:47:55	18:58:57	0:03:11	19:02:08
3	17:59:55	0:06:33	18:06:28	18:15:16	0:02:23	18:17:39	18:29:00	0:07:58	18:36:58	18:47:29	0:02:42	18:50:11
4	18:07:39	0:06:08	18:13:47	18:26:02	0:02:21	18:28:23	18:37:03	0:06:24	18:43:27	18:54:19	0:02:52	18:57:11
5	18:18:56	0:05:28	18:24:24	18:33:38	0:02:18	18:35:56	18:48:00	0:07:08	18:55:08	19:05:27	0:02:57	19:08:24

Transporteinheit	Servicebeginnzeit Häcksler 3	Servicezeit Häcksler 3	Abfahrtszeit am Häcksler 3	Servicebeginnzeit Silo 3	Servicezeit Silo 3	Abfahrtszeit Silo 3	Servicebeginnzeit Häcksler 4	Servicezeit Häcksler 4	Abfahrtszeit am Häcksler 4	Servicebeginnzeit Silo 4	Servicezeit Silo 4	Abfahrtszeit Silo 4
1	19:24:19	0:04:00	19:28:19	19:38:25	0:03:23	19:41:48	19:54:44	0:04:01	19:58:45	20:08:30	0:07:20	20:15:50
2	19:13:34	0:05:17	19:18:51	19:28:47	0:02:46	19:31:33	19:41:08	0:04:07	19:45:15	19:55:55	0:03:14	19:59:09
3	19:01:10	0:05:36	19:06:46	19:15:29	0:02:53	19:18:22	19:30:18	0:05:23	19:35:41	19:45:14	0:02:44	19:47:58
4	19:07:06	0:05:57	19:13:03	19:22:03	0:03:07	19:25:10	19:35:45	0:05:19	19:41:04	19:50:46	0:04:32	19:55:18
5	19:18:53	0:05:22	19:24:15	19:36:03	0:03:27	19:39:30	19:48:26	0:06:14	19:54:40	20:06:14	0:03:02	20:09:16

Transporteinheit	Servicebeginnzeit Häcksler 5	Servicezeit Häcksler 5	Abfahrtszeit am Häcksler 5	Servicebeginnzeit Silo 5	Servicezeit Silo 5	Abfahrtszeit Silo 5	Servicebeginnzeit Häcksler 6	Servicezeit Häcksler 6	Abfahrtszeit am Häcksler 6	Servicebeginnzeit Silo 6	Servicezeit Silo 6	Abfahrtszeit Silo 6
1	20:26:20	0:04:15	20:30:35	20:40:50	0:04:08	20:44:58						
2	20:08:54	0:04:37	20:13:31	20:23:58	0:03:24	20:27:22	20:40:28	0:05:10	20:45:38	20:56:59	0:03:58	21:00:57
3	19:58:48	0:04:37	20:03:25	20:13:35	0:02:56	20:16:31	20:30:40	0:04:13	20:34:53	20:45:51	0:03:01	20:48:52
4	20:03:29	0:05:22	20:08:51	20:20:07	0:05:24	20:25:31	20:35:12	0:05:12	20:40:24	20:50:07	0:06:09	20:56:16
5	20:20:21	0:05:54	20:26:15	20:36:36	0:02:53	20:39:29	20:46:42	0:06:28	20:53:10	21:02:55	0:08:00	21:10:55

## 7 Weiterführende Arbeiten

In einer weiterführenden Arbeit wird die parallele Arbeitsweise des Feldhäckslers gelockert, ein Vorgewende, Rüst- und Tankzeiten integriert und dessen Fahrstrategie weiter optimiert werden, was auch einer weiteren Optimierung der Infield-Logistik der Transportfahrzeuge bedarf. Ferner soll der Einsatz mehrerer Feldhäcklser möglich sein und die Restriktion auf ein Silo und jeweils eine Schlaganfahrt pro Schlag weggelassen werden. Ebenfalls sollen Überladefahrzeuge und Fahrzeugausfälle<sup>3</sup> in die Optimierung aufgenommen werden, wobei Fahrzeugausfälle einer dynamischen Optimierung bedürfen und mit der bisher statischen Optimierungsinstanz im Gegensatz zu Überladefahrzeugen, die durch eine 2-malige Anwendung des Grundtransportlogistikmoduls mit anschließender Gesamtzieloptimierung berücksichtigt werden können, nicht direkt abgedeckt werden können. Dies bedarf einer leichten Modifikation des Grundtransportlogistikmoduls derart, dass nur noch die aktuell verfügbaren Fahrzeuge berücksichtigt werden. In einem letzten Schritt sollen die wissenschaftlichen Erkenntnisse auf verwandte Ernteketten übertragen werden. Das Ziel ist die Entwicklung einer Software zur optimierten Planung von großen Erntelogistikketten, insbesondere Maisernteketten. Dazu muss unter milden Restriktionen, wie oben beschrieben, die Fahrstrategie der Leitmaschine(n) und die Infield- und Transportlogistik der Transportfahrzeuge optimiert werden, woraus eine Optimierung der Gesamtkosten resultiert. Im Vordergrund steht dabei immer die Minimierung der Gesamtkosten der gesamten Maiserntekette, was einer optimalen zeitlichen Abstimmung der gesamten Erntekette mittels der Methode der Gesamtzieloptimierung (= Simultane Berücksichtigung mehrerer Optimierungsziele in einer Zielfunktion) durch Lösung eines speziellen Mengenüberdeckungsproblems bedarf. Charakteristisch für die Gesamtoptimierung ist, dass die Fahrstrategie der Leitmaschine(n) und die Infield- und Transportlogistik der Transportfahrzeuge durch Verlinkung simultan berücksichtigt werden. Ferner soll die Software anhand von Praxisdaten eines im Großraum München ansässigen Maschinenrings (Maschinenring Ebersberg) validiert werden. Aufgrund der Diversität einzelner Maisernteketten kann leider keine Datenbank erstellt werden, die Landwirten, Lohnunternehmern und Maschinenringen individuell optimierte Ernteketteplanungsdaten zur Verfügung stellt. Dafür ist die öffentliche Nutzung der Software über eine Cloudlösung geplant, die dem Nutzer über ein Internetportal die Möglichkeit bietet, seine Maiserntelogistikketten individuell zu optimieren. Die Leistungsabrechnung erfolgt dabei nach Auftragsvolumen, sodass teure Softwarelizenzen entfallen.

### 7.1 Gesamtoptimierung

Zu Beginn der weiterführenden Arbeiten werden die oben vorgestellten Algorithmen modifiziert, um die optimale Schlagabarbeitungsstrategie ermitteln zu können. Dabei werden zum Teil Ergebnisse aus den Arbeiten [Bak11], [Oks07] und der darin enthaltenen Literatur, andererseits auch eigene Ideen, wie die Lösung eines auf diese Anwendung formulierten Mengenüberdeckungsproblems<sup>4</sup> mittels des ultimativen Algorithmus, modifiziert

<sup>3</sup>Unter einem Fahrzeugausfall kann zum Beispiel verstanden werden, wenn ein Transportfahrzeug zum Tanken fahren muss und somit in der Erntekette aktuell nicht verfügbar ist.

<sup>4</sup>Es seien  $P_1, P_2, \dots, P_n$  endliche Mengen und  $c_1, c_2, \dots, c_n$  positive reelle Zahlen. Ferner sei  $I := (\bigcup_{1 \leq i \leq n} P_i) := \{1, \dots, m\}$ ,  $J := \{1, \dots, n\}$ . Dann heißt  $J^* \subset J$  eine Überdeckung, falls  $\bigcup_{i \in J^*} P_i = I$ . Ferner seien die Kosten der Überdeckung gegeben durch  $\sum_{j \in J^*} c_j$ . Gesucht ist nun eine Überdeckung mit minimalen Kosten. In dieser Arbeit ergeben sich die Mengen  $P_i$  als mindestens 3-elementige Teilmengen eines diskretisierten Polygonrands (Schlagrands), die Zahlen  $c_i$  aus den Kosten für die Abarbeitung

auf Schläge und Silos, zur Reihenfolgeoptimierung der Schläge und Silos verwendet, um den aktuellen Anforderungen aus der Praxis gerecht zu werden. Sodann wird zur Bestimmung der optimalen Feldhäckslerfahrstrategie, der optimalen Schlaganfahrten inklusive strategischer Infieldplanung und der optimalen Entladungstrategie der Abfuhrgespanne am Silo wiederum der ultimative Algorithmus für kombinatorische Optimierungsziele und der FEGA für stetige Optimierungsziele verwendet, um alle möglichen Anforderungen aus der Praxis, wie oben zum Teil bereits erwähnt, berücksichtigen zu können, wobei zur Ermittlung der Gesamtkosten (= Kosten für Maschineneinsatzzeiten) das Grundtransportlogistikmodul verwendet und die Methode für den ultimativen Algorithmus, die wie die Methode zum Grundtransportlogistikmodul parallelisiert werden kann, in der Methode für den FEGA und diese wiederum in der Methode des ultimativen Algorithmus für die Reihenfolgeoptimierung der Schläge und Silos aufgerufen wird. Dabei werden die Eingabedaten für den inneren ultimativen Algorithmus mittels der Datenaufbereitungsalgorithmen aus dem Kapitel Material und Methoden, Unterkapitel Datenaufbereitung generiert.

### 7.1.1 Infield-Logistik

Zuvor wird jedoch anhand der mathematischen Schleppkurventheorie mittels einer optimalen Steuerungsinstanz (Mayer-Instanz) unter Berücksichtigung aktueller Anforderungen aus der Praxis die Trajektorie eines beliebigen Transportfahrzeugs von einer beliebigen Schlageinfahrten zur Position eines beliebigen Feldhäckslers und vice versa berechnet, um ein Bewertungskriterium für die optimalen Schlaganfahrten zu erhalten. Dabei sind für hinreichende glatte Abbildungen  $\varphi, f, \Phi, c$  und  $s$  ein Zustand  $x \in W^{1,\infty}([t_0, t_f], \mathbb{R}^{n_x})$ <sup>5</sup> und eine Steuerung  $u \in L^\infty([t_0, t_f], \mathbb{R}^{n_u})$ <sup>6</sup> zu finden, so dass die Zielfunktion

$$\varphi(x(t_0), x(t_f))$$

minimal wird unter Berücksichtigung der Differentialgleichung

$$\dot{x}(t) = f(t, x(t), u(t)) \text{ fast überall in } [t_0, t_f], x(t_0) = x_0, \\ \text{(Anfangswertproblem 1. Ordnung),}$$

den Randbedingungen

$$\Phi(x(t_0), x(t_f)) = 0_{n_\Phi},$$

den gemischten Steuer- und Zustandsbeschränkungen

$$c(t, x(t), u(t)) \leq 0_{n_c} \text{ fast überall in } [t_0, t_f],$$

den reinen Zustandsbeschränkungen

$$s(t, x(t)) \leq 0_{n_s} \text{ in } [t_0, t_f],$$

und den Mengenbeschränkungen

einer Menge  $P_i$ , von denen jede nach Formulierung einen Teil einer Schlagfläche repräsentiert und deren Vereinigung alle Schläge repräsentiert.

<sup>5</sup>Raum aller absolutstetigen Funktionen über  $[t_0, t_f]$  mit  $\max_{0 \leq i \leq 1} \|x^{(i)}\|_\infty < \infty$ ,  $\|\cdot\|_\infty := \sup_{t \in [t_0, t_f]} \cdot$ , der durch  $\|x\|_{1,\infty} := \max_{0 \leq i \leq 1} \|x^{(i)}\|_\infty$  Banachraum wird

<sup>6</sup>Raum aller messbaren Funktionen über  $[t_0, t_f]$  mit  $\text{ess sup}_{t_0 \leq t \leq t_f} x(t) := \inf_{N \subset [t_0, t_f], \mu(N)=0} \sup_{t \in [t_0, t_f] \setminus N} |x(t)| < \infty$ , der durch  $\|x\|_\infty := \text{ess sup}_{t_0 \leq t \leq t_f} x(t)$  Banachraum wird

$u(t) \in U := \{u \in \mathbb{R}^{n_u}; u_{\min} \leq u \leq u_{\max}\}$  fast überall in  $[t_0, t_f]$ .

**Bemerkung 45:** Nach dem gleichen Prinzip wird auch die Anfahrt von Teilschlägen in einem Schlag behandelt.

## 8 Zusammenfassung

In dieser Dissertation geht es um die optimierte Transportlogistikplanung einer traditionellen Maiserntekette. Dabei wird ein vorgegebener Schlag von einem (selbst fahrenden) Feldhäcksler parallel abgearbeitet, wobei der Fahrweg des Feldhäckslers vorgegeben wird. Ferner wird das Erntegut von einer festen Anzahl an nicht notwendigerweise homogenen Transportfahrzeugen möglichst kostengünstig zu einem Silo transportiert und anschließend dort eingelagert. Möglichst kostengünstig bedeutet in diesem Zusammenhang, dass eine diesen Erntekreislauf beschreibende Zielfunktion, die im Wesentlichen als Summe der Einsatzzeiten der einzelnen Abfuhrgespanne und des Feldhäckslers gegeben ist, minimiert wird. Ferner fließt in die Optimierungsalgorithmen die Siloverdichtungsleistung ein, die genau in den Fällen, in denen mehr Häckselgut angeliefert wird, als das Silo verdichten kann, zu verzögerten Abfahrtszeiten der Transportfahrzeuge am Silo führt. Zur Ermittlung der Optimalparameter wurden vier Optimierungsalgorithmen entwickelt. Ferner wurde gezeigt, dass die verwendeten Optimierungsalgorithmen robust sind und die Berechnungen in akzeptabler Zeit durchgeführt werden können. Als Ausblick wurde auf die Optimierung großer Ernteketten eingegangen und deren Optimierungsalgorithmen anhand der in dieser Arbeit entwickelten Optimierungsalgorithmen skizziert. Die Förderung des bisherigen Vorhabens erfolgte aus Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) über die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) im Rahmen des Programms zur Innovationsförderung.

## 9 Literaturverzeichnis

### Literatur

- [1] Aho A. V., Hopcroft J. E., Ullman D. J. (1983): Data structures and algorithms. Reading, Mass: Addison-Wesley.
- [2] Ascheuer N., Fischetti M., Grötschel M. (2000): A polyhedral study of the asymmetric travelling salesman problem with time Windows. *Networks* 36 pp 69-79.
- [3] Ascheuer N., Fischetti M., Grötschel M. (2000): Solving asymmetric travelling salesman problem with time windows by branch-and-cut. *Mathematical Programming* 90 475-506.
- [4] Baker E.K. (1983): An exact algorithm for the time-constrained travelling salesman problem. *Operations Research* 31 pp 938-945.
- [5] A. A. Bakhtiari, A. A., Navid, H., Mehri, J., Bochtis, D. D. (2011): Optimal route planning of agricultural field operations using ant colony optimization. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*. Vol.13, No.4. Manuscript No. 1939.
- [6] Balas E., Fischetti M., Pulleyblank W. (1995): The precedence constrained asymmetric travelling salesman problem. *Mathematical Programming* 68 pp 241-265.
- [7] Balas E., Simonetti N. (2001): Linear time dynamic programming algorithms for new classes of restricted TSPs: a computational study. *INFORMS Journal on Computing* 13 pp 56-75.
- [8] Baugh J. W. jr., Kakivaya D. K. R., Stone J. R. (1998): Intractability of the dial-a-ride problem and a multiobjective solution using simulated annealing. *Engineering Optimization*, 30 (2): pp 91 - 124.
- [9] Bentley J. (1984): Programming Pearl: How to sort, Com.. *ACM*, Vol. 27 Issue 4, April 1984.
- [10] BENTLEY J. L. und McILROY M. D. (1993): Engineering a Sort Function, *SOFTWARE-PRACTICE AND EXPERIENCE*, Vol. 23(11), Nov. 1993, pp 249 – 1265.
- [11] Bentley J. L. und Sedgewick R. (1997): Fast algorithms for sorting and searching strings, In Proc. 8th annual ACM-SIAM symposium on Discrete algorithms, New Orleans, Louisiana, USA, pp 360 - 369.
- [12] Bergvinsdottir, K. B. (2004) The genetic algorithm for solving the dial-a-ride problem. Master Thesis of Science in Engineering. Department of Informatics and Mathematical Modelling (IMM), Technical University of Denmark (DTU).
- [13] Borndörfer, R., Grötschel, M., Klostermeier F., Küttner, C., 1997: Telebus Berlin: Vehicle scheduling in a dial-a-ride system. Technical Report SC 97-23, Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin.

- [14] Calvo, R. W., Luigi, F., Haastrup, P. and Maniezzo, V. (2004): A distributed geographic information system for the daily car pooling problem. *Computers and Operations Research* 31: pp 2263-2278.
- [15] Caseau, Y., Koppstein P. (1992): A rule-based approach to a time-constrained traveling salesman problem. *Proceedings of the 2nd International Symposium of Artificial Intelligence and Mathematics*, Fort Lauderdale, FL.
- [16] Caseau, Y., Laburthe F. (1994): Improved CLP scheduling with task intervals. P. Van Hentenryck, ed. *Logic Programming - Proceedings of the 1994 International Conference on Logic Programming*. MIT Press, Cambridge, MA. pp 369-383.
- [17] Caseau, Y., Laburthe F. (1996): Cumulative scheduling with task intervals. *Proceedings of the JICSLP96*. Bonn, Germany, September 2-6. pp 363-377.
- [18] Caseau, Y., Laburthe F. (1997). Solving small TSPs with constraints. L. Naish, ed. *Logic Programming - Proceedings of the 1994 International Conference on Logic Programming*. MIT Press, Cambridge, MA. pp 316-330.
- [19] Chaudhuri R. und Dempster A. C. (1993): A note on slowing Quicksort, *SIGCSE Vol . 25, No . 2, Januery 1993*.
- [20] Cordeau, J. F., Laporte, G. (2003 a): The Dial-a-Ride Problem (DARP): Variants, modeling issues and algorithms. *4OR - Quarterly Journal of the Belgian, French and Italian Operations Research Societies*, 1: pp 89-101.
- [21] Cordeau J. F., Laporte G. (2003 b): A tabu search heuristic for the static multi-vehicle dial-a-ride problem. *Transportation Research, Part B*, 37: pp 579 - 594.
- [22] Cordeau, J. F. (2004): A branch-and-cut algorithm for the dial-a-ride problem. *Technical report 2004-23*. Center for Research on Transportation (CRT), Montreal.
- [23] Desrosiers J., Dumas J. Y. , Solomon M. M., Soumis F. (1995): Time constrained routing and scheduling. Ball M. O., Magnanti T. L., Monma C. L., Nemhauser G. L., eds. *Network Routing*. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands. pp 35-139.
- [24] Dijkstra E. W. (1976): *A discipline of programming*. Englewood Cliffs, NJ Prentice-Hall. b
- [25] Dobosiewicz W. (1978): Sorting by distributive partitioning. *Information Processing Letters* 7, pp 1-5.
- [26] J. Dorband, C. L. Mumford, and P. Wang. (2004): Developing an ace solution for two-dimensional strip packing. In *18th International Parallel and Distributed Processing Symposium Workshop on Massively Parallel Processing*. Santa Fe, New Mexico.
- [27] Dumas, Y., Desrosiers J., Gelinat E., Solomon M. M. (1995): An optimal algorithm for the travelling salesman problem with time windows. *Operations Research* 43 367-371.
- [28] Dörfler J., Hüffmeier, H. (1998): *Landtechnik und Bauwesen, Band 3 (Die Landwirtschaft)*. BLV Verlagsgesellschaft mbH.

- [29] Döring, G., Schilcher, A., Strobl, M., Schleicher, R., Seidl, M., Mitterleitner, J. (2010): Verfahren zum Transport von Biomasse. Nr. II – 6/2010: 2.
- [30] Floyd R. W., Rivest R. L. (1975): Expected time bounds for selection, *Comm. of the ACM* 18, 3, pp 165-172, March 1975.
- [31] Focacci, F., Lodi A. , Milano M. (1999 b): Solving TSP with time windows with constraints. D. De Schreye, ed. *Logic Programming - Proceedings of the 1999 International Conference on Logic Programming*. MIT Press, Cambridge, MA. pp 515-529.
- [32] Focacci, F., Lodi A., Milano M. (2002): Embedding relaxations in global constraints for solving TSP and TSPTW. *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence* 34 pp 291-311.
- [33] Fraser A. (1957): Simulation of genetic systems by automatic digital computers. I. introduction. *Australian Journal of Biological Science*, 10: pp 484–491.
- [34] Fraser A. (1957): Simulation of genetic systems by automatic digital computers. II. effects of linkage on rates of advanced under-selection. *Australian Journal of Biological Science*, 10:492–499.
- [35] Gaese, C. F., Fock, T., S., Bernhardt, H., Heizinger, V., Wörz, S., Eberhardt, J., Damme, T., Damme, B., Kluge, A. (2013): Entwicklung eines Planungssystems zur Optimierung von Agrarlogistik-Prozessen. GI-Edition. *Lecture Notes in Informatics*.
- [36] Gaese, C. F., Fock, T., S., Bernhardt, H., Heizinger, V., Wörz, S., Eberhardt, J., Damme, T., Damme, B., Kluge, A. (2014): Entwicklung eines Planungssystems zur Optimierung von Agrarlogistik-Prozessen. GI-Edition. *Lecture Notes in Informatics*.
- [37] Glover, F., Laguna, M., (1997): *Tabu Search*. Kluwer, Boston.
- [38] He, J., Kang, L., (1999): On the convergence rates of genetic algorithms. *Theoretical Computer Science* 229, pp 23-39.
- [39] Hoare C. A. R. (1961): Algorithm 64: Quicksort, *Comm. ACM* 4,7,321, July 1961.
- [40] Hoare C. A. R. (1962):, Quicksort, *Computer Journal*, 5, pp 10 - 15.
- [41] Holland J. H. (1975): *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. MIT Press.
- [42] Hosny, I. M. (2010): *Investigating Heuristic and Meta-Heuristic Algorithms for Solving Pickup and Delivery Problems*. Dissertation in Computer Science and Informatics. School of Computer Science and Informatics. Cardiff University.
- [43] Jaw, J. J., Odoni, A. R., Psaraftis, H. N., Wilson, N. H. M. (1986): A heuristic algorithm for the multi-vehicle advance request dial-a-ride problem with time windows. *Transportation Research, Part B (Methodological)*, 20 B (3): pp 243 - 257.
- [44] Jih, W. R., Kao, C. Y., Hsu, F. Y. J. (2002): Using Family Competition Genetic Algorithm in Pickup and Delivery Problem with Time Window Constraints. In *Proceedings of the 2002 IEEE International Symposium on Intelligent Control*, Vancouver, Canada, 496 - 501.

- [45] Jørgensen, R. M. (2002): Dial-a-Ride. Doctor's thesis, Technical University of Denmark.
- [46] Khreisat L. (2007): QuickSort: A Historical Perspective and Empirical Study. IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security, VOL.7 No.12, December 2007.
- [47] Kirkpatrick, S., Gellat, D. C. and Vecchi, M. P. (1983): Optimization by simulated annealing. *Science*, 220: pp 671- 680.
- [48] Knuth D. E. (1973): *The Art of Computer Programming, Vol. 3: Sorting and Searching*, Addison Wesley Publ. Co..
- [49] Kübler, S. (2009): *Simulation verfahrenstechnischer Prozesse im Feldbau*. Dissertation. Institut für Agrar- und Ernährungswissenschaften. Martin-Luther-Univ. Halle-Wittenberg.
- [50] Langevin A., Desrochers M., Desrosiers J., Soumis F. (1993): A two-commodity flow formulation for the traveling salesman and makespan problem with time windows. *Networks* 23 pp 631-640.
- [51] Loeser R. (1974): Some performance tests of :quicksort: and descendants. *Comm. ACM* 17, 3 , pp 143–152, Mar. 1974.
- [52] Martinez C. (2004): Partial quicksort. In *Proceedings of the First ACM-SIAM Workshop on Analytic Algorithmics and Combinatorics (ANALCO)*.
- [53] Matsumoto M. und Nishimura T. (1998): Mersenne Twister: A 623-dimensionally equidistributed uniform pseudorandom number generator, *ACM Trans. on Modeling and Computer Simulation* Vol. 8, No. 1, January pp.3-30.
- [54] McDaniel B. (1991): Variations on Put First, *Conference on Applied Mathematics*, University of Central Oklahoma, Spring 1991.
- [55] Mehlhorn K. (1984): *Data Structures and Algorithms, Vol. 1, Sortzng and Searchzng*, 1984 EATCS Monographs on Theoretical Computer Science, Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag.
- [56] Miettinen K. (1999): *Nonlinear Multiobjective Optimization*. Boston: Kluwer.
- [57] Mingozzi A., Bianco L., Ricciardelli S. (1997): Dynamic programming strategies for the travelling salesman problem with time windows and precedence constraints. *Operations Research* 45 pp 365-377.
- [58] Motzkin D. (1983): Meansort, *Comm. ACM* 26, 4, pp 250-251, Apr. 1983.
- [59] Neubert K. D. (1997): The FlashSort algorithm, In *Proc. of the euroFORTH'97 –Conf.*, Oxford, England, Sept. 1997, pp 26–28.
- [60] Oksanen, T., and A. Visala. 2009. Coverage path planning algorithms for agricultural field machines. *Journal of Field Robotics*, 26(8), 651-668.
- [61] Ostfeld, A. (2011): *Ant Colony Optimization - Methods and Applications*. Book. Published by InTech.

- [62] Parragh, S. (2009): Ambulance Routing Problems with Rich Constraints and Multiple Objectives. Dissertation. Chair for Production and Operations Management. University of Wien.
- [63] Pesant G., Gendreau M., Potvin J.-Y., Rousseau J. M. (1998): An exact constraint logic programming algorithm for the travelling salesman problem with time windows. *Transportation Science* 32 pp 12-29.
- [64] Pesant, G., Gendreau M., Potvin J.-Y., Rousseau J. M. (1999): On the flexibility of constraint programming models: from single to multiple Time Windows for the travelling salesman 25 problem. *European Journal of Operational Research* 117 pp 253-263.
- [65] Savelsberg, M. W. P. (1985): Local search in routing problems with time windows. *Annals of Operations Research* 4 pp 285-305.
- [66] Schoenhage A. M., Paterson M., Pippenger N. (1976): Finding the median, *Journal of Computer and Systems Sciences* 13, pp 184 - 199, 1976.
- [67] Scowen R. S., Algorithm 271: Quicksort, *Comm. ACM* 8, 11, pp 669-670, Nov. 1965.
- [68] Sedgewick R. (1975): Quicksort, PhD dissertation, Stanford University, Stanford, CA, May 1975. Stanford Computer Science Report STAN-CS-75-492.
- [69] Sedgewick R. (1977): The Analysis of Quicksort Programs, *Acta Informatica* 7.
- [70] Sedgewick R. (1978): Implementing Quicksort programs, *Comm. of ACM*, 21(10).
- [71] Sedgewick R. (1998): Algorithms in C++, 3rd edition, Addison Wesley.
- [72] Singleton R. C. (1969): Algorithm 347: An efficient algorithm for sorting with minimal storage, *Comm. ACM* 12, 3, pp 186-187, Mar. 1969.
- [73] Solomon, M. M. (1987): Algorithms for the vehicle routing and scheduling problem with time window constraints. *Operations Research* 35 pp 254-265.
- [74] Sundararajan K. K., Chakraborty S. (2006): A new sorting algorithm, *InterStat, Statistics on the Internet*, 2006.
- [75] Taillard E. D., Badeau P., Gendreau M., Guertin F., Potvin J.-Y. (1995): A new neighborhood structure for the vehicle routing problems with time windows. Publication CRT-95-66, Centre de Recherche sur les Transports, Université de Montréal, Montréal, Quebec, Canada.
- [76] Taehyeong K. (2011): Model and algorithm for Solving real time Dial-A-Ride Problem. Dissertation. Department of Civil and Environmental Engineering. Graduate School of the University of Maryland, College Park.
- [77] Wainwright R. L. (1985): A class of sorting algorithms based on Quicksort, *Comm. ACM*, Vol. 28 Number 4, April 1985.
- [78] Wainwright R. L. (1987): Quicksort algorithms with an early exit for sorted subfiles, *Comm. ACM*.

- [79] Weicker, K. (2007): Evolutionäre Algorithmen. B. G. Teubner Verlag. ISBN 978-3-8351-0219-4.
- [80] Wirth N. (1983): Algorithmen und Datenstrukturen, B. G. Teubner.
- [81] Würz, S., Heizinger, V., Bernhardt, H., Eberhardt, J., Damme, T., Damme, B., Fock, T., Gaese, C. F., Kluge, A. (2013): Routenplanung für landwirtschaftliche Fahrzeuge. GI-Edition. Lecture Notes in Informatics.
- [82] Würz, S., Heizinger, V., Bernhardt, H., Eberhardt, J., Damme, T., Damme, B., Fock, T., Gaese, C. F., Kluge, A. (2014): Entwicklung eines Planungssystems zur Optimierung von Agrarlogistik-Prozessen. GI-Edition. Lecture Notes in Informatics.
- [83] Xu, H., Chen, Z. L., Rajagopal, S., Arunapuram, S. (2003): Solving a practical pickup and delivery problem. *Transportation Science*, 37(3): pp 347-364.

## 10 Anhang

### 10.1 DEGA:

**Berechnung 1: (9.43 t, 10.31 t, 10.36 t, 12.03 t, 13.03 t),**

**Berechnung 2: (10.51 t, 11.49 t, 12.03 t, 12.36 t, 14.41 t),**

**Berechnung 3: (14.64 t, 15.88 t, 17.54 t, 17.82 t, 19.88 t)**

Tabelle 3: Feldfahrzeiten vom Schlagrand zum Feldhäcksler und vice versa (Berechnung 1)

Feldfahrzeit zu Auftrag 1 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0329502018772128
Fahrt zum Feldhäcksler: 0		
Feldfahrzeit zu Auftrag 2 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,002071156872868
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0329502018772128		
Feldfahrzeit zu Auftrag 3 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0275648671366124
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,002071156872868		
Feldfahrzeit zu Auftrag 4 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0149213030371223
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0275648671366124		
Feldfahrzeit zu Auftrag 5 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0170995760386837
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0149213030371223		
Feldfahrzeit zu Auftrag 6 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,022799616925401
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0170995760386837		
Feldfahrzeit zu Auftrag 7 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0182029057162972
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,022799616925401		
Feldfahrzeit zu Auftrag 8 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0307527542665616
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0182029057162972		
Feldfahrzeit zu Auftrag 9 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,00469857243356076
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0307527542665616		
Feldfahrzeit zu Auftrag 10 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,032708678398699
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,00469857243356076		
Feldfahrzeit zu Auftrag 11 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0112787534476269
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,032708678398699		
Feldfahrzeit zu Auftrag 12 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0332893615928983
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0112787534476269		
Feldfahrzeit zu Auftrag 13 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0173732863453186
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0332893615928983		
Feldfahrzeit zu Auftrag 14 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0262736927283757
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0173732863453186		
Feldfahrzeit zu Auftrag 15 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0262968932004253
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0262736927283757		
Feldfahrzeit zu Auftrag 16 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0218368142389272
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0262968932004253		
Feldfahrzeit zu Auftrag 17 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0352953235084138
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0218368142389272		
Feldfahrzeit zu Auftrag 18 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,00742036231778657
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0352953235084138		
Feldfahrzeit zu Auftrag 19 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,039792209154735
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,00742036231778657		
Feldfahrzeit zu Auftrag 20 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0168666156563073
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,039792209154735		
Feldfahrzeit zu Auftrag 21 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0348326841818725
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0168666156563073		
Feldfahrzeit zu Auftrag 22 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0263876924477097
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0348326841818725		
Feldfahrzeit zu Auftrag 23 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0197604114488943
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0263876924477097		
Feldfahrzeit zu Auftrag 24 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0193532810870001
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0197604114488943		
Feldfahrzeit zu Auftrag 25 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0287138004595541
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0193532810870001		
Feldfahrzeit zu Auftrag 26 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0204609371763848
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0287138004595541		
Feldfahrzeit zu Auftrag 27 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0210822488464215
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0204609371763848		
Feldfahrzeit zu Auftrag 28 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0305504250989598
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0210822488464215		
Feldfahrzeit zu Auftrag 29 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0195850568074138
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0305504250989598		

Tabelle 4: Früheste und späteste optimale Ankunftszeiten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 1)

Optimale Ankunftszeiten am Schlag und Silo in [h]

Auftrag: 1	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 17,99861
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,00361
Auftrag: 1	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,2742164702508
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,2792164702508
Auftrag: 2	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,0954792683736
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,1004792683736
Auftrag: 2	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,3616413801804
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,3666413801804
Auftrag: 3	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,2004035233075
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,2054035233075
Auftrag: 3	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,4577763236804
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,4627763236804
Auftrag: 4	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,2763781565438
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,2813781565438
Auftrag: 4	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,5281205359769
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,5331205359769
Auftrag: 5	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,3594492329397
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,3644492329397
Auftrag: 5	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,6040041347023
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,6090041347023
Auftrag: 6	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,4429230586637
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,4479230586637
Auftrag: 6	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,7083789439627
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,7133789439627
Auftrag: 7	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,5397923270373
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,5447923270373
Auftrag: 7	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,8220861876875
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,8270861876875
Auftrag: 8	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,6447165819712
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,6497165819712
Auftrag: 8	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,9052772694741
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,9102772694741
Auftrag: 9	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,7206912152075
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,7256912152075
Auftrag: 9	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,962210864037
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,967210864037
Auftrag: 10	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,8037622916034
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,8087622916034
Auftrag: 10	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,063926295726
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,068926295726
Auftrag: 11	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,8872361173273
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,8922361173273
Auftrag: 11	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,1411711391486
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,1461711391486
Auftrag: 12	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,984105385701
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,989105385701
Auftrag: 12	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,2814857022277
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,2864857022277
Auftrag: 13	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,0890296406348
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,0940296406348
Auftrag: 13	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,3432240033761
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,3482240033761
Auftrag: 14	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,1721007170307
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,1771007170307
Auftrag: 14	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,4410306781327
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,4460306781327
Auftrag: 15	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,2689699854044
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,2739699854044
Auftrag: 15	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,5227222043287
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,5277222043287

Tabelle 5: Früheste und späteste optimale Ankunftszeiten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 1)

Optimale Ankunftszeiten am Schlag und Silo in [h]

Auftrag: 16	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,3524438111283
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,3574438111283
Auftrag: 16	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,6383715803011
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,6433715803011
Auftrag: 17	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,4573680660622
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,4623680660622
Auftrag: 17	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,7224713228069
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,7274713228069
Auftrag: 18	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,5333426992985
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,5383426992985
Auftrag: 18	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,7775841380122
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,7825841380122
Auftrag: 19	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,6164137756944
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,6214137756944
Auftrag: 19	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,8988622532228
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,9038622532228
Auftrag: 20	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,713283044068
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,718283044068
Auftrag: 20	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,9576049854483
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,9626049854483
Auftrag: 21	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,796756869792
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,801756869792
Auftrag: 21	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,0956805089077
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,1006805089077
Auftrag: 22	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,9016811247258
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,9066811247258
Auftrag: 22	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,1578767504099
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,1628767504099
Auftrag: 23	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,9776557579622
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,9826557579622
Auftrag: 23	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,234237245807
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,239237245807
Auftrag: 24	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,0607268343581
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,0657268343581
Auftrag: 24	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,3227363838187
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,3277363838187
Auftrag: 25	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,1575961027317
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,1625961027317
Auftrag: 25	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,4137652289152
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,4187652289152
Auftrag: 26	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,2410699284556
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,2460699284556
Auftrag: 26	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,5256218205659
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,5306218205659
Auftrag: 27	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,3459941833895
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,3509941833895
Auftrag: 27	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,5968843654722
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,6018843654722
Auftrag: 28	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,4219688166258
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,4269688166258
Auftrag: 28	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,6799745674487
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,6849745674487
Auftrag: 29	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,5185449410555
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,5235449410555
Auftrag: 29	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,7804931222926
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,7854931222926

Tabelle 6: Abfahrtszeiten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 1)

## Abfahrtszeiten von Transportfahrzeug 1 in [h]

Auftrag: 3	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,2763781565438	Abfahrtszeit am Silo: 18,5230195643438
Auftrag: 8	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,7406528404769	Abfahrtszeit am Silo: 18,9904821354067
Auftrag: 17	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,5568801590732	Abfahrtszeit am Silo: 19,8112520232449
Auftrag: 22	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,0475804626727	Abfahrtszeit am Silo: 20,2930446957837
Auftrag: 27	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,535206975683	Abfahrtszeit am Silo: 20,7753657651927

## Abfahrtszeiten von Transportfahrzeug 2 in [h]

Auftrag: 4	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,3594492329397	Abfahrtszeit am Silo: 18,5800340835352
Auftrag: 9	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,8272997513781	Abfahrtszeit am Silo: 19,03766187137
Auftrag: 13	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,280895731953	Abfahrtszeit am Silo: 19,5039325658567
Auftrag: 18	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,7464008785261	Abfahrtszeit am Silo: 19,9594847884022
Auftrag: 23	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,2355757940025	Abfahrtszeit am Silo: 20,4609997530097

## Abfahrtszeiten von Transportfahrzeug 3 in [h]

Auftrag: 5	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,4429230586637	Abfahrtszeit am Silo: 18,6526958302381
Auftrag: 10	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,910773577102	Abfahrtszeit am Silo: 19,1361554510364
Auftrag: 15	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,375981270903	Abfahrtszeit am Silo: 19,5949513596391
Auftrag: 20	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,8401804072829	Abfahrtszeit am Silo: 20,0497202184749
Auftrag: 25	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,3190496197264	Abfahrtszeit am Silo: 20,5404366157217
Auftrag: 28	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,7750651932682	Abfahrtszeit am Silo: 20,9982888139028

## Abfahrtszeiten von Transportfahrzeug 4 in [h]

Auftrag: 1	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,0954792683736	Abfahrtszeit am Silo: 18,3444794862321
Auftrag: 6	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,5537816606444	Abfahrtszeit am Silo: 18,792631293551
Auftrag: 11	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,0410800300981	Abfahrtszeit am Silo: 19,2684087995269
Auftrag: 14	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,4779846842459	Abfahrtszeit am Silo: 19,7203083929555
Auftrag: 19	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,9370496756565	Abfahrtszeit am Silo: 20,1928919007925
Auftrag: 24	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,4421788201015	Abfahrtszeit am Silo: 20,6775821171698
Auftrag: 29	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,9138644996746	Abfahrtszeit am Silo: 21,1492869421649

## Abfahrtszeiten von Transportfahrzeug 5 in [h]

Auftrag: 2	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,2004035233075	Abfahrtszeit am Silo: 18,4245099353812
Auftrag: 7	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,6646782072405	Abfahrtszeit am Silo: 18,9049163681577
Auftrag: 12	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,1571012363139	Abfahrtszeit am Silo: 19,4124258531077
Auftrag: 16	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,6618044140071	Abfahrtszeit am Silo: 19,9056764834469
Auftrag: 21	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,1525047176066	Abfahrtszeit am Silo: 20,4093726569894
Auftrag: 26	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,6915913675443	Abfahrtszeit am Silo: 20,9340875599215

Tabelle 7: Ankunftszeiten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 1)

## Ankunftszeiten von Transportfahrzeug 1 in [h]

Auftrag: 3	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 17,3704739568729	Ankunftszeit am Silo: 18,4577763236804
Auftrag: 8	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 18,6646782072405	Ankunftszeit am Silo: 18,9252388947434
Auftrag: 17	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,1292062722399	Ankunftszeit am Silo: 19,7460087825816
Auftrag: 22	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,9716058294364	Ankunftszeit am Silo: 20,2278014551204
Auftrag: 27	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,4592323424466	Ankunftszeit am Silo: 20,7101225245294

## Ankunftszeiten von Transportfahrzeug 2 in [h]

Auftrag: 4	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 17,4059537671366	Ankunftszeit am Silo: 18,5281205359769
Auftrag: 9	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 18,7442286749822	Ankunftszeit am Silo: 18,9857483238117
Auftrag: 13	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,1978246555571	Ankunftszeit am Silo: 19,4520190182984
Auftrag: 18	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,6633298021302	Ankunftszeit am Silo: 19,9075712408439
Auftrag: 23	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,1525047176066	Ankunftszeit am Silo: 20,4090862054514

## Ankunftszeiten von Transportfahrzeug 3 in [h]

Auftrag: 5	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 17,3911713030371	Ankunftszeit am Silo: 18,6040041347023
Auftrag: 10	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 18,7971818624463	Ankunftszeit am Silo: 19,0874637555007
Auftrag: 15	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,2786791437648	Ankunftszeit am Silo: 19,5462596641034
Auftrag: 20	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,756706581559	Ankunftszeit am Silo: 20,0010285229392
Auftrag: 25	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,2340527182929	Ankunftszeit am Silo: 20,491744920186
Auftrag: 28	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,6915913675443	Ankunftszeit am Silo: 20,9495971183671

## Ankunftszeiten von Transportfahrzeug 4 in [h]

Auftrag: 1	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 17,35533333	Ankunftszeit am Silo: 18,2742164702508
Auftrag: 6	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 18,4569123922708	Ankunftszeit am Silo: 18,7223682775698
Auftrag: 11	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 18,9442107617245	Ankunftszeit am Silo: 19,1981457835457
Auftrag: 14	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,3811154158723	Ankunftszeit am Silo: 19,6500453769743
Auftrag: 19	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,8401804072829	Ankunftszeit am Silo: 20,1226288848113
Auftrag: 24	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,3453095517279	Ankunftszeit am Silo: 20,6073191011885
Auftrag: 29	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,8172883752449	Ankunftszeit am Silo: 21,079236556482

## Ankunftszeiten von Transportfahrzeug 5 in [h]

Auftrag: 2	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 17,4053946018772	Ankunftszeit am Silo: 18,3616413801804
Auftrag: 7	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 18,5597539523066	Ankunftszeit am Silo: 18,8420478129568
Auftrag: 12	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,05217698138	Ankunftszeit am Silo: 19,3495572979068
Auftrag: 16	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,5568801590732	Ankunftszeit am Silo: 19,842807928246
Auftrag: 21	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,0475804626727	Ankunftszeit am Silo: 20,3465041017885
Auftrag: 26	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,5866671126104	Ankunftszeit am Silo: 20,8712190047206

Tabelle 8: Kapazitäten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 1)

Transportfahrzeug 1, Kapazität in [t]: 9,432

Auftrag: 3	Beladung am Feldhäcksler: 9,432	Entladung am Silo: 9,432
Auftrag: 8	Beladung am Feldhäcksler: 9,432	Entladung am Silo: 9,432
Auftrag: 17	Beladung am Feldhäcksler: 9,432	Entladung am Silo: 9,432
Auftrag: 22	Beladung am Feldhäcksler: 9,432	Entladung am Silo: 9,432
Auftrag: 27	Beladung am Feldhäcksler: 9,432	Entladung am Silo: 9,432

Transportfahrzeug 2, Kapazität in [t]: 10,313

Auftrag: 4	Beladung am Feldhäcksler: 10,313	Entladung am Silo: 10,313
Auftrag: 9	Beladung am Feldhäcksler: 10,313	Entladung am Silo: 10,313
Auftrag: 13	Beladung am Feldhäcksler: 10,313	Entladung am Silo: 10,313
Auftrag: 18	Beladung am Feldhäcksler: 10,313	Entladung am Silo: 10,313
Auftrag: 23	Beladung am Feldhäcksler: 10,313	Entladung am Silo: 10,313

Transportfahrzeug 3, Kapazität in [t]: 10,363

Auftrag: 5	Beladung am Feldhäcksler: 10,363	Entladung am Silo: 10,363
Auftrag: 10	Beladung am Feldhäcksler: 10,363	Entladung am Silo: 10,363
Auftrag: 15	Beladung am Feldhäcksler: 10,363	Entladung am Silo: 10,363
Auftrag: 20	Beladung am Feldhäcksler: 10,363	Entladung am Silo: 10,363
Auftrag: 25	Beladung am Feldhäcksler: 10,363	Entladung am Silo: 10,363
Auftrag: 28	Beladung am Feldhäcksler: 10,363	Entladung am Silo: 10,363

Transportfahrzeug 4, Kapazität in [t]: 12,026

Auftrag: 1	Beladung am Feldhäcksler: 12,026	Entladung am Silo: 12,026
Auftrag: 6	Beladung am Feldhäcksler: 12,026	Entladung am Silo: 12,026
Auftrag: 11	Beladung am Feldhäcksler: 12,026	Entladung am Silo: 12,026
Auftrag: 14	Beladung am Feldhäcksler: 12,026	Entladung am Silo: 12,026
Auftrag: 19	Beladung am Feldhäcksler: 12,026	Entladung am Silo: 12,026
Auftrag: 24	Beladung am Feldhäcksler: 12,026	Entladung am Silo: 12,026
Auftrag: 29	Beladung am Feldhäcksler: 12,026	Entladung am Silo: 12,026

Transportfahrzeug 5, Kapazität in [t]: 13,026

Auftrag: 2	Beladung am Feldhäcksler: 13,026	Entladung am Silo: 13,026
Auftrag: 7	Beladung am Feldhäcksler: 13,026	Entladung am Silo: 13,026
Auftrag: 12	Beladung am Feldhäcksler: 13,026	Entladung am Silo: 13,026
Auftrag: 16	Beladung am Feldhäcksler: 13,026	Entladung am Silo: 13,026
Auftrag: 21	Beladung am Feldhäcksler: 13,026	Entladung am Silo: 13,026
Auftrag: 26	Beladung am Feldhäcksler: 13,026	Entladung am Silo: 13,026

Tabelle 9: Servicebeginnzeiten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 1)

## Servicebeginnzeiten von Transportfahrzeug 1 in [h]

Auftrag: 3	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,2004035233075 Servicebeginnzeit am Silo: 18,4577763236804
Auftrag: 8	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,6646782072405 Servicebeginnzeit am Silo: 18,9252388947434
Auftrag: 17	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,4809055258369 Servicebeginnzeit am Silo: 19,7460087825816
Auftrag: 22	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,9716058294364 Servicebeginnzeit am Silo: 20,2278014551204
Auftrag: 27	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,4592323424466 Servicebeginnzeit am Silo: 20,7101225245294

## Servicebeginnzeiten von Transportfahrzeug 2 in [h]

Auftrag: 4	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,2763781565438 Servicebeginnzeit am Silo: 18,5281205359769
Auftrag: 9	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,7442286749822 Servicebeginnzeit am Silo: 18,9857483238117
Auftrag: 13	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,1978246555571 Servicebeginnzeit am Silo: 19,4520190182984
Auftrag: 18	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,6633298021302 Servicebeginnzeit am Silo: 19,9075712408439
Auftrag: 23	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,1525047176066 Servicebeginnzeit am Silo: 20,4090862054514

## Servicebeginnzeiten von Transportfahrzeug 3 in [h]

Auftrag: 5	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,3594492329397 Servicebeginnzeit am Silo: 18,6040041347023
Auftrag: 10	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,8272997513781 Servicebeginnzeit am Silo: 19,0874637555007
Auftrag: 15	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,2925074451791 Servicebeginnzeit am Silo: 19,5462596641034
Auftrag: 20	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,756706581559 Servicebeginnzeit am Silo: 20,0010285229392
Auftrag: 25	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,2355757940025 Servicebeginnzeit am Silo: 20,491744920186
Auftrag: 28	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,6915913675443 Servicebeginnzeit am Silo: 20,9495971183671

## Servicebeginnzeiten von Transportfahrzeug 4 in [h]

Auftrag: 1	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 17,99861 Servicebeginnzeit am Silo: 18,2742164702508
Auftrag: 6	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,4569123922708 Servicebeginnzeit am Silo: 18,7223682775698
Auftrag: 11	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,9442107617245 Servicebeginnzeit am Silo: 19,1981457835457
Auftrag: 14	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,3811154158723 Servicebeginnzeit am Silo: 19,6500453769743
Auftrag: 19	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,8401804072829 Servicebeginnzeit am Silo: 20,1226288848113
Auftrag: 24	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,3453095517279 Servicebeginnzeit am Silo: 20,6073191011885
Auftrag: 29	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,8172883752449 Servicebeginnzeit am Silo: 21,079236556482

## Servicebeginnzeiten von Transportfahrzeug 5 in [h]

Auftrag: 2      Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,0954792683736  
                    Servicebeginnzeit am Silo: 18,3616413801804

Auftrag: 7      Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,5597539523066  
                    Servicebeginnzeit am Silo: 18,8420478129568

Auftrag: 12     Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,05217698138  
                    Servicebeginnzeit am Silo: 19,3495572979068

Auftrag: 16     Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,5568801590732  
                    Servicebeginnzeit am Silo: 19,842807928246

Auftrag: 21     Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,0475804626727  
                    Servicebeginnzeit am Silo: 20,3465041017885

Auftrag: 26     Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,5866671126104  
                    Servicebeginnzeit am Silo: 20,8712190047206

Tabelle 10: Servicezeiten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 1)

## Servicezeiten von Transportfahrzeug 1 in [h]

Auftrag: 3	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0759746332363244	Servicezeit am Silo: 0,0652432406633063
Auftrag: 8	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0759746332363244	Servicezeit am Silo: 0,0652432406633063
Auftrag: 17	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0759746332363244	Servicezeit am Silo: 0,0652432406633063
Auftrag: 22	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0759746332363244	Servicezeit am Silo: 0,0652432406633063
Auftrag: 27	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0759746332363244	Servicezeit am Silo: 0,0652432406633063

## Servicezeiten von Transportfahrzeug 2 in [h]

Auftrag: 4	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,083071076395909	Servicezeit am Silo: 0,0519135475583065
Auftrag: 9	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,083071076395909	Servicezeit am Silo: 0,0519135475583065
Auftrag: 13	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,083071076395909	Servicezeit am Silo: 0,0519135475583065
Auftrag: 18	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,083071076395909	Servicezeit am Silo: 0,0519135475583065
Auftrag: 23	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,083071076395909	Servicezeit am Silo: 0,0519135475583065

## Servicezeiten von Transportfahrzeug 3 in [h]

Auftrag: 5	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0834738257239218	Servicezeit am Silo: 0,0486916955357097
Auftrag: 10	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0834738257239218	Servicezeit am Silo: 0,0486916955357097
Auftrag: 15	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0834738257239218	Servicezeit am Silo: 0,0486916955357097
Auftrag: 20	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0834738257239218	Servicezeit am Silo: 0,0486916955357097
Auftrag: 25	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0834738257239218	Servicezeit am Silo: 0,0486916955357097
Auftrag: 28	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0834738257239218	Servicezeit am Silo: 0,0486916955357097

## Servicezeiten von Transportfahrzeug 4 in [h]

Auftrag: 1	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0968692683736257	Servicezeit am Silo: 0,0702630159812429
Auftrag: 6	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0968692683736257	Servicezeit am Silo: 0,0702630159812429
Auftrag: 11	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0968692683736257	Servicezeit am Silo: 0,0702630159812429
Auftrag: 14	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0968692683736257	Servicezeit am Silo: 0,0702630159812429
Auftrag: 19	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0968692683736257	Servicezeit am Silo: 0,0702630159812429
Auftrag: 24	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0968692683736257	Servicezeit am Silo: 0,0702630159812429
Auftrag: 29	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0965761244297028	Servicezeit am Silo: 0,0700503856829599

## Servicezeiten von Transportfahrzeug 5 in [h]

Auftrag: 2	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,104924254933881	Servicezeit am Silo: 0,0628685552008695
Auftrag: 7	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,104924254933881	Servicezeit am Silo: 0,0628685552008695
Auftrag: 12	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,104924254933881	Servicezeit am Silo: 0,0628685552008695
Auftrag: 16	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,104924254933881	Servicezeit am Silo: 0,0628685552008695
Auftrag: 21	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,104924254933881	Servicezeit am Silo: 0,0628685552008695
Auftrag: 26	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,104924254933881	Servicezeit am Silo: 0,0628685552008695

Tabelle 11: Wartezeiten der Transportfahrzeuge am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 1)

## Wartezeiten von Transportfahrzeug 1 in [h]

Auftrag: 3	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 8	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 17	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,351699253597005	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 22	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 27	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0

## Wartezeiten von Transportfahrzeug 2 in [h]

Auftrag: 4	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 9	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 13	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 18	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 23	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0

## Wartezeiten von Transportfahrzeug 3 in [h]

Auftrag: 5	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 10	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,0301178889317875	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 15	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,0138283014142644	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 20	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 25	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,0015230757095992	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 28	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0

## Wartezeiten von Transportfahrzeug 4 in [h]

Auftrag: 1	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 6	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 11	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 14	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 19	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 24	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 29	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0

## Wartezeiten von Transportfahrzeug 5 in [h]

Auftrag: 2	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 7	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 12	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 16	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 21	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 26	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0

Tabelle 12: Wartezeiten des Feldhäckslers (Berechnung 1)

Wartezeiten des Feldhäckslers in [h] bezüglich des optimalen Serviceauftrags

Auftrag: 3	Wartezeit: 0
Auftrag: 8	Wartezeit: 0,0149616252693576
Auftrag: 17	Wartezeit: 0,0185374597747163
Auftrag: 22	Wartezeit: 0,0649247047105703
Auftrag: 27	Wartezeit: 0,108238159057137
Auftrag: 4	Wartezeit: 0
Auftrag: 9	Wartezeit: 0,0185374597747163
Auftrag: 13	Wartezeit: 0,103795014922291
Auftrag: 18	Wartezeit: 0,124987102831678
Auftrag: 23	Wartezeit: 0,169848959644451
Auftrag: 5	Wartezeit: 0
Auftrag: 10	Wartezeit: 0,0185374597747163
Auftrag: 15	Wartezeit: 0,0185374597747163
Auftrag: 20	Wartezeit: 0,0384235374909458
Auftrag: 25	Wartezeit: 0,0729796912708238
Auftrag: 28	Wartezeit: 0,264622550918432
Auftrag: 1	Wartezeit: 0
Auftrag: 6	Wartezeit: 0,0089893336071043
Auftrag: 11	Wartezeit: 0,0519746443971272
Auftrag: 14	Wartezeit: 0,204014698841522
Auftrag: 19	Wartezeit: 0,218766631588494
Auftrag: 24	Wartezeit: 0,279582717369838
Auftrag: 29	Wartezeit: 0,293743434189345
Auftrag: 2	Wartezeit: 0
Auftrag: 7	Wartezeit: 0,0149616252693576
Auftrag: 12	Wartezeit: 0,0630715956790837
Auftrag: 16	Wartezeit: 0,199436347944921
Auftrag: 21	Wartezeit: 0,245823592880775
Auftrag: 26	Wartezeit: 0,340597184154756

Tabelle 13: Feldfahrzeiten vom Schlagrand zum Feldhäcksler und vice versa (Berechnung 2)

Feldfahrzeit zu Auftrag 1 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0315014498944555
Fahrt zum Feldhäcksler: 0		
Feldfahrzeit zu Auftrag 2 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,00436321224857359
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0315014498944555		
Feldfahrzeit zu Auftrag 3 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,032770643850774
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,00436321224857359		
Feldfahrzeit zu Auftrag 4 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,00507465476625494
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,032770643850774		
Feldfahrzeit zu Auftrag 5 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0323439066035182
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,00507465476625494		
Feldfahrzeit zu Auftrag 6 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,00900403834332392
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0323439066035182		
Feldfahrzeit zu Auftrag 7 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0357392916568372
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,00900403834332392		
Feldfahrzeit zu Auftrag 8 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0103026469875656
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0357392916568372		
Feldfahrzeit zu Auftrag 9 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0297895512692626
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0103026469875656		
Feldfahrzeit zu Auftrag 10 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0182954701402351
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0297895512692626		
Feldfahrzeit zu Auftrag 11 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0244725165038044
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0182954701402351		
Feldfahrzeit zu Auftrag 12 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0230088234424249
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0244725165038044		
Feldfahrzeit zu Auftrag 13 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0215409227250026
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0230088234424249		
Feldfahrzeit zu Auftrag 14 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0200910451548826
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0215409227250026		
Feldfahrzeit zu Auftrag 15 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0253505783762118
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0200910451548826		
Feldfahrzeit zu Auftrag 16 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0262190004522588
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0253505783762118		
Feldfahrzeit zu Auftrag 17 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,016895981457091
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0262190004522588		
Feldfahrzeit zu Auftrag 18 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0288242253050355
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,016895981457091		
Feldfahrzeit zu Auftrag 19 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0201829906248863
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0288242253050355		
Feldfahrzeit zu Auftrag 20 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0340152635211073
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0201829906248863		
Feldfahrzeit zu Auftrag 21 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0176656674439746
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0340152635211073		
Feldfahrzeit zu Auftrag 22 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,022896777074677
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0176656674439746		
Feldfahrzeit zu Auftrag 23 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0255676301089393
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,022896777074677		
Feldfahrzeit zu Auftrag 24 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0155146384292842
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0255676301089393		
Feldfahrzeit zu Auftrag 25 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0204659886746515
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0155146384292842		
Feldfahrzeit zu Auftrag 26 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0331039388286636
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0204659886746515		
Feldfahrzeit zu Auftrag 27 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,019585057259632
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0331039388286636		

Tabelle 14: Früheste und späteste optimale Ankunftszeiten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 2)

## Optimale Ankunftszeiten am Schlag und Silo in [h]

Auftrag: 1	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 17,99861 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,00361
Auftrag: 1	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,2764132454718 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,2814132454718
Auftrag: 2	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,0911617955773 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,0961617955773
Auftrag: 2	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,3707640641592 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,3757640641592
Auftrag: 3	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,2072341519106 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,2122341519106
Auftrag: 3	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,4784960045097 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,4834960045097
Auftrag: 4	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,2918920606589 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,2968920606589
Auftrag: 4	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,539655203745 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,544655203745
Auftrag: 5	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,3887935489787 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,3937935489787
Auftrag: 5	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,664678589467 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,669678589467
Auftrag: 6	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,4883531828635 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,4933531828635
Auftrag: 6	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,7436590167842 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,7486590167841
Auftrag: 7	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,5809049784408 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,5859049784408
Auftrag: 7	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,8918833264309 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,8968833264309
Auftrag: 8	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,6969773347741 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,7019773347741
Auftrag: 8	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,9457711905099 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,9507711905099
Auftrag: 9	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,7816352435224 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,7866352435224
Auftrag: 9	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,0541132831115 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,0591132831115
Auftrag: 10	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,8785367318422 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,8835367318422
Auftrag: 10	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,1353234107308 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,1403234107308
Auftrag: 11	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,9631946405905 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,9681946405905
Auftrag: 11	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,2312082909791 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,2362082909791
Auftrag: 12	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,0627542744753 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,0677542744753
Auftrag: 12	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,332064893495 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,337064893495
Auftrag: 13	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,1553060700526 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,1603060700526
Auftrag: 13	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,4203881266624 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,4253881266624
Auftrag: 14	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,2548657039374 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,2598657039374
Auftrag: 14	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,5501958054255 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,5551958054255
Auftrag: 15	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,3709380602706 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,3759380602706
Auftrag: 15	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,6389771269667 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,6439771269667
Auftrag: 16	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,4678395485905

## Optimale Ankunftszeiten am Schlag und Silo in [h]

	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,4728395485905
Auftrag: 16	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,7403603446201
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,7453603446201
Auftrag: 17	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,5603913441678
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,5653913441678
Auftrag: 17	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,8157785343732
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,8207785343732
Auftrag: 18	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,6450492529161
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,6500492529161
Auftrag: 18	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,9491125345544
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,9541125345544
Auftrag: 19	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,7611216092494
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,7661216092494
Auftrag: 19	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,0239930881941
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,0289930881941
Auftrag: 20	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,8580230975692
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,8630230975692
Auftrag: 20	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,1347268494102
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,1397268494102
Auftrag: 21	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,9549245858891
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,9599245858891
Auftrag: 21	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,2161313872178
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,2211313872178
Auftrag: 22	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,0544842197739
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,0594842197739
Auftrag: 22	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,3236827924259
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,3286827924259
Auftrag: 23	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,1470360153512
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,1520360153512
Auftrag: 23	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,4110948542084
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,4160948542084
Auftrag: 24	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,2316939240995
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,2366939240995
Auftrag: 24	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,4907496964135
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,4957496964135
Auftrag: 25	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,3312535579842
	Späteste Ankunftszeit am Schlag: 20,3362535579842
Auftrag: 25	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,5980213422362
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,6030213422362
Auftrag: 26	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,4238053535616
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,4288053535616
Auftrag: 26	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,6995977807101
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,7045977807101
Auftrag: 27	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,5051172798072
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,5101172798072
Auftrag: 27	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,7597642633126
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,7647642633126

Tabelle 15: Abfahrtszeiten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 2)

## Abfahrtszeiten von Transportfahrzeug 1 in [h]

Auftrag: 3	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,2918920606589	Abfahrtszeit am Silo: 18,5511960108043
Auftrag: 8	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,7816352435224	Abfahrtszeit am Silo: 19,0184711968046
Auftrag: 10	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,2413214568222	Abfahrtszeit am Silo: 19,4861502332571
Auftrag: 17	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,750150017164	Abfahrtszeit am Silo: 19,9935793049158
Auftrag: 23	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,3081497522604	Abfahrtszeit am Silo: 20,560250688664

## Abfahrtszeiten von Transportfahrzeug 2 in [h]

Auftrag: 1	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,0911617955773	Abfahrtszeit am Silo: 18,3342515719961
Auftrag: 6	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,5809049784408	Abfahrtszeit am Silo: 18,8014973433084
Auftrag: 12	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,1553060700526	Abfahrtszeit am Silo: 19,3899032200193
Auftrag: 16	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,6654921084158	Abfahrtszeit am Silo: 19,9032994353923
Auftrag: 22	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,2234918435121	Abfahrtszeit am Silo: 20,457976947111
Auftrag: 25	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,6845910946758	Abfahrtszeit am Silo: 20,9166454098748
Auftrag: 27	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 21,1494501749491	Abfahrtszeit am Silo: 21,3735994355359

## Abfahrtszeiten von Transportfahrzeug 3 in [h]

Auftrag: 5	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,4883531828635	Abfahrtszeit am Silo: 18,7227534091931
Auftrag: 11	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,0627542744753	Abfahrtszeit am Silo: 19,2892831107052
Auftrag: 13	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,5673991824752	Abfahrtszeit am Silo: 19,7909964249263
Auftrag: 21	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,1309400479348	Abfahrtszeit am Silo: 20,3506620351048
Auftrag: 24	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,5920392990985	Abfahrtszeit am Silo: 20,8096102572539

## Abfahrtszeiten von Transportfahrzeug 4 in [h]

Auftrag: 4	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,3887935489787	Abfahrtszeit am Silo: 18,6099415900958
Auftrag: 9	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,8785367318422	Abfahrtszeit am Silo: 19,1243996694623
Auftrag: 15	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,4678395485905	Abfahrtszeit am Silo: 19,7092635133175
Auftrag: 19	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,0067783851033	Abfahrtszeit am Silo: 20,2430347620789
Auftrag: 20	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,4554525710237	Abfahrtszeit am Silo: 20,7055412208956
Auftrag: 26	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,9184008414482	Abfahrtszeit am Silo: 21,1675781666277

## Abfahrtszeiten von Transportfahrzeug 5 in [h]

Auftrag: 2	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,2072341519106	Abfahrtszeit am Silo: 18,4403123430203
Auftrag: 7	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,6969773347741	Abfahrtszeit am Silo: 18,961431605292
Auftrag: 14	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,3709380602706	Abfahrtszeit am Silo: 19,6197440842866
Auftrag: 18	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,9098768967834	Abfahrtszeit am Silo: 20,1674161009495

Tabelle 16: Ankunftszeiten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 2)

## Ankunftszeiten von Transportfahrzeug 1 in [h]

Auftrag: 3	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 17,3727660122486	Ankunftszeit am Silo: 18,4784960045097
Auftrag: 8	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 18,6953381024612	Ankunftszeit am Silo: 18,9457711905099
Auftrag: 10	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,1566635480739	Ankunftszeit am Silo: 19,4134502269624
Auftrag: 17	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,6654921084158	Ankunftszeit am Silo: 19,9208792986211
Auftrag: 23	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,1566146354449	Ankunftszeit am Silo: 20,4875506823693

## Ankunftszeiten von Transportfahrzeug 2 in [h]

Auftrag: 1	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 17,3783889	Ankunftszeit am Silo: 18,2764132454718
Auftrag: 6	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 18,4849843785996	Ankunftszeit am Silo: 18,7436590167842
Auftrag: 12	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 18,9443587598122	Ankunftszeit am Silo: 19,332064893495
Auftrag: 16	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,5729403128384	Ankunftszeit am Silo: 19,845461108868
Auftrag: 22	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,0765122165543	Ankunftszeit am Silo: 20,4001386205868
Auftrag: 25	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,5920392990985	Ankunftszeit am Silo: 20,8588070833505
Auftrag: 27	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 21,0681382487034	Ankunftszeit am Silo: 21,3227852322087

## Ankunftszeiten von Transportfahrzeug 3 in [h]

Auftrag: 5	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 17,3813246547663	Ankunftszeit am Silo: 18,664678589467
Auftrag: 11	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 18,8572988793333	Ankunftszeit am Silo: 19,2312082909791
Auftrag: 13	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,4678395485905	Ankunftszeit am Silo: 19,7329216052003
Auftrag: 21	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,9784199021654	Ankunftszeit am Silo: 20,2925872153787
Auftrag: 24	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,4924796652137	Ankunftszeit am Silo: 20,7515354375278

## Ankunftszeiten von Transportfahrzeug 4 in [h]

Auftrag: 4	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 17,3881039738508	Ankunftszeit am Silo: 18,539655203745
Auftrag: 9	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 18,7155775670833	Ankunftszeit am Silo: 19,0541132831115
Auftrag: 15	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,2398240446172	Ankunftszeit am Silo: 19,6389771269667
Auftrag: 19	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,9098768967834	Ankunftszeit am Silo: 20,1727483757282
Auftrag: 20	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,3585510827038	Ankunftszeit am Silo: 20,6352548345448
Auftrag: 26	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,8214993531284	Ankunftszeit am Silo: 21,0972917802769

## Ankunftszeiten von Transportfahrzeug 5 in [h]

Auftrag: 2	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 17,4039458498945	Ankunftszeit am Silo: 18,3707640641592
Auftrag: 7	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 18,5617607813636	Ankunftszeit am Silo: 18,8918833264309
Auftrag: 14	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,095416928017	Ankunftszeit am Silo: 19,5501958054255
Auftrag: 18	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,7938045404501	Ankunftszeit am Silo: 20,0978678220884

Tabelle 17: Kapazitäten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 2)

## Transportfahrzeug 1, Kapazität in [t]: 10,51

Auftrag: 3	Beladung am Feldhäcksler: 10,51	Entladung am Silo: 10,51
Auftrag: 8	Beladung am Feldhäcksler: 10,51	Entladung am Silo: 10,51
Auftrag: 10	Beladung am Feldhäcksler: 10,51	Entladung am Silo: 10,51
Auftrag: 17	Beladung am Feldhäcksler: 10,51	Entladung am Silo: 10,51
Auftrag: 23	Beladung am Feldhäcksler: 10,51	Entladung am Silo: 10,51

## Transportfahrzeug 2, Kapazität in [t]: 11,49

Auftrag: 1	Beladung am Feldhäcksler: 11,49	Entladung am Silo: 11,49
Auftrag: 6	Beladung am Feldhäcksler: 11,49	Entladung am Silo: 11,49
Auftrag: 12	Beladung am Feldhäcksler: 11,49	Entladung am Silo: 11,49
Auftrag: 16	Beladung am Feldhäcksler: 11,49	Entladung am Silo: 11,49
Auftrag: 22	Beladung am Feldhäcksler: 11,49	Entladung am Silo: 11,49
Auftrag: 25	Beladung am Feldhäcksler: 11,49	Entladung am Silo: 11,49
Auftrag: 27	Beladung am Feldhäcksler: 11,49	Entladung am Silo: 11,49

## Transportfahrzeug 3, Kapazität in [t]: 12,36

Auftrag: 5	Beladung am Feldhäcksler: 12,36	Entladung am Silo: 12,36
Auftrag: 11	Beladung am Feldhäcksler: 12,36	Entladung am Silo: 12,36
Auftrag: 13	Beladung am Feldhäcksler: 12,36	Entladung am Silo: 12,36
Auftrag: 21	Beladung am Feldhäcksler: 12,36	Entladung am Silo: 12,36
Auftrag: 24	Beladung am Feldhäcksler: 12,36	Entladung am Silo: 12,36

## Transportfahrzeug 4, Kapazität in [t]: 12,03

Auftrag: 4	Beladung am Feldhäcksler: 12,03	Entladung am Silo: 12,03
Auftrag: 9	Beladung am Feldhäcksler: 12,03	Entladung am Silo: 12,03
Auftrag: 15	Beladung am Feldhäcksler: 12,03	Entladung am Silo: 12,03
Auftrag: 19	Beladung am Feldhäcksler: 12,03	Entladung am Silo: 12,03
Auftrag: 20	Beladung am Feldhäcksler: 12,03	Entladung am Silo: 12,03
Auftrag: 26	Beladung am Feldhäcksler: 12,03	Entladung am Silo: 12,03

## Transportfahrzeug 5, Kapazität in [t]: 14,41

Auftrag: 2	Beladung am Feldhäcksler: 14,41	Entladung am Silo: 14,41
Auftrag: 7	Beladung am Feldhäcksler: 14,41	Entladung am Silo: 14,41
Auftrag: 14	Beladung am Feldhäcksler: 14,41	Entladung am Silo: 14,41
Auftrag: 18	Beladung am Feldhäcksler: 14,41	Entladung am Silo: 14,41

Tabelle 18: Servicebeginnzeiten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 2)

## Servicebeginnzeiten von Transportfahrzeug 1 in [h]

Auftrag: 3	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,2004035233075 Servicebeginnzeit am Silo: 18,4577763236804
Auftrag: 8	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,6646782072405 Servicebeginnzeit am Silo: 18,9252388947434
Auftrag: 17	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,4809055258369 Servicebeginnzeit am Silo: 19,7460087825816
Auftrag: 22	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,9716058294364 Servicebeginnzeit am Silo: 20,2278014551204
Auftrag: 27	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,4592323424466 Servicebeginnzeit am Silo: 20,7101225245294

## Servicebeginnzeiten von Transportfahrzeug 2 in [h]

Auftrag: 4	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,2763781565438 Servicebeginnzeit am Silo: 18,5281205359769
Auftrag: 9	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,7442286749822 Servicebeginnzeit am Silo: 18,9857483238117
Auftrag: 13	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,1978246555571 Servicebeginnzeit am Silo: 19,4520190182984
Auftrag: 18	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,6633298021302 Servicebeginnzeit am Silo: 19,9075712408439
Auftrag: 23	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,1525047176066 Servicebeginnzeit am Silo: 20,4090862054514

## Servicebeginnzeiten von Transportfahrzeug 3 in [h]

Auftrag: 5	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,3594492329397 Servicebeginnzeit am Silo: 18,6040041347023
Auftrag: 10	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,8272997513781 Servicebeginnzeit am Silo: 19,0874637555007
Auftrag: 15	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,2925074451791 Servicebeginnzeit am Silo: 19,5462596641034
Auftrag: 20	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,756706581559 Servicebeginnzeit am Silo: 20,0010285229392
Auftrag: 25	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,2355757940025 Servicebeginnzeit am Silo: 20,491744920186
Auftrag: 28	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,6915913675443 Servicebeginnzeit am Silo: 20,9495971183671

## Servicebeginnzeiten von Transportfahrzeug 4 in [h]

Auftrag: 1	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 17,99861 Servicebeginnzeit am Silo: 18,2742164702508
Auftrag: 6	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,4569123922708 Servicebeginnzeit am Silo: 18,7223682775698
Auftrag: 11	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,9442107617245 Servicebeginnzeit am Silo: 19,1981457835457
Auftrag: 14	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,3811154158723 Servicebeginnzeit am Silo: 19,6500453769743
Auftrag: 19	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,8401804072829 Servicebeginnzeit am Silo: 20,1226288848113
Auftrag: 24	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,3453095517279 Servicebeginnzeit am Silo: 20,6073191011885
Auftrag: 29	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,8172883752449 Servicebeginnzeit am Silo: 21,079236556482

## Servicebeginnzeiten von Transportfahrzeug 5 in [h]

Auftrag: 2      Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,0954792683736  
                    Servicebeginnzeit am Silo: 18,3616413801804

Auftrag: 7      Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,5597539523066  
                    Servicebeginnzeit am Silo: 18,8420478129568

Auftrag: 12     Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,05217698138  
                    Servicebeginnzeit am Silo: 19,3495572979068

Auftrag: 16     Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,5568801590732  
                    Servicebeginnzeit am Silo: 19,842807928246

Auftrag: 21     Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,0475804626727  
                    Servicebeginnzeit am Silo: 20,3465041017885

Auftrag: 26     Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,5866671126104  
                    Servicebeginnzeit am Silo 20,8712190047206

Tabelle 19: Servicezeiten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 2)

## Servicezeiten von Transportfahrzeug 1 in [h]

Auftrag: 3	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0846579087482793	Servicezeit am Silo: 0,0727000062946723
Auftrag: 8	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0846579087482793	Servicezeit am Silo: 0,0727000062946723
Auftrag: 10	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0846579087482793	Servicezeit am Silo: 0,0727000062946723
Auftrag: 17	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0846579087482793	Servicezeit am Silo: 0,0727000062946723
Auftrag: 23	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0846579087482793	Servicezeit am Silo: 0,0727000062946723

## Servicezeiten von Transportfahrzeug 2 in [h]

Auftrag: 1	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0925517955773291	Servicezeit am Silo: 0,057838326524284
Auftrag: 6	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0925517955773291	Servicezeit am Silo: 0,057838326524284
Auftrag: 12	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0925517955773291	Servicezeit am Silo: 0,057838326524284
Auftrag: 16	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0925517955773291	Servicezeit am Silo: 0,057838326524284
Auftrag: 22	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0925517955773291	Servicezeit am Silo: 0,057838326524284
Auftrag: 25	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0925517955773291	Servicezeit am Silo: 0,057838326524284
Auftrag: 27	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0813119262456894	Servicezeit am Silo: 0,050814203327191

## Servicezeiten von Transportfahrzeug 3 in [h]

Auftrag: 5	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0995596338847509	Servicezeit am Silo: 0,0580748197260804
Auftrag: 11	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0995596338847509	Servicezeit am Silo: 0,0580748197260804
Auftrag: 13	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0995596338847509	Servicezeit am Silo: 0,0580748197260804
Auftrag: 21	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0995596338847509	Servicezeit am Silo: 0,0580748197260804
Auftrag: 24	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0995596338847509	Servicezeit am Silo: 0,0580748197260804

## Servicezeiten von Transportfahrzeug 4 in [h]

Auftrag: 4	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0969014883198667	Servicezeit am Silo: 0,0702863863507694
Auftrag: 9	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0969014883198667	Servicezeit am Silo: 0,0702863863507694
Auftrag: 15	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0969014883198667	Servicezeit am Silo: 0,0702863863507694
Auftrag: 19	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0969014883198667	Servicezeit am Silo: 0,0702863863507694
Auftrag: 20	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0969014883198667	Servicezeit am Silo: 0,0702863863507694
Auftrag: 26	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0969014883198667	Servicezeit am Silo: 0,0702863863507694

## Servicezeiten von Transportfahrzeug 5 in [h]

Auftrag: 2	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,116072356333273	Servicezeit am Silo: 0,0695482788610878
Auftrag: 7	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,116072356333273	Servicezeit am Silo: 0,0695482788610878
Auftrag: 14	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,116072356333273	Servicezeit am Silo: 0,0695482788610878
Auftrag: 18	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,116072356333273	Servicezeit am Silo: 0,0695482788610878

Tabelle 20: Wartezeiten der Transportfahrzeuge am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 2)

## Wartezeiten von Transportfahrzeug 1 in [h]

Auftrag: 3	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 8	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 17	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,351699253597005	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 22	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 27	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0

## Wartezeiten von Transportfahrzeug 2 in [h]

Auftrag: 4	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 9	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 13	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 18	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 23	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0

## Wartezeiten von Transportfahrzeug 3 in [h]

Auftrag: 5	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 10	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,0301178889317875	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 15	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,0138283014142644	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 20	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 25	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,0015230757095992	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 28	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0

## Wartezeiten von Transportfahrzeug 4 in [h]

Auftrag: 1	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 6	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 11	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 14	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 19	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 24	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 29	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0

## Wartezeiten von Transportfahrzeug 5 in [h]

Auftrag: 2	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 7	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 12	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 16	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 21	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 26	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0

Tabelle 21: Wartezeiten des Feldhäckslers (Berechnung 2)

Wartezeiten des Feldhäckslers in [h] bezüglich des optimalen Serviceauftrags

Auftrag: 3	Wartezeit: 0
Auftrag: 8	Wartezeit: 0
Auftrag: 10	Wartezeit: 0,273126816231631
Auftrag: 17	Wartezeit: 0,100100764247937
Auftrag: 23	Wartezeit: 0,071455828160893
Auftrag: 1	Wartezeit: 0
Auftrag: 6	Wartezeit: 0
Auftrag: 12	Wartezeit: 0
Auftrag: 16	Wartezeit: 0,100100764247937
Auftrag: 22	Wartezeit: 0,071455828160893
Auftrag: 25	Wartezeit: 0,255785741114277
Auftrag: 27	Wartezeit: 0,558020968896184
Auftrag: 5	Wartezeit: 0
Auftrag: 11	Wartezeit: 0
Auftrag: 13	Wartezeit: 0,307533478537891
Auftrag: 21	Wartezeit: 0,071455828160893
Auftrag: 24	Wartezeit: 0,255785741114277
Auftrag: 4	Wartezeit: 0
Auftrag: 9	Wartezeit: 0
Auftrag: 15	Wartezeit: 0
Auftrag: 19	Wartezeit: 0,143755287534027
Auftrag: 20	Wartezeit: 0,495527985134572
Auftrag: 26	Wartezeit: 0,392693999566831
Auftrag: 2	Wartezeit: 0
Auftrag: 7	Wartezeit: 0
Auftrag: 14	Wartezeit: 0
Auftrag: 18	Wartezeit: 0,143755287534027

Tabelle 22: Feldfahrzeiten vom Schlagrand zum Feldhäcksler und vice versa (Berechnung 3)

Feldfahrzeit zu Auftrag 1 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0204620076369361
Fahrt zum Feldhäcksler: 0		
Feldfahrzeit zu Auftrag 2 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0299326035860442
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0204620076369361		
Feldfahrzeit zu Auftrag 3 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,00315263530915437
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0299326035860442		
Feldfahrzeit zu Auftrag 4 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0263295984356269
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,00315263530915437		
Feldfahrzeit zu Auftrag 5 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0268737944489193
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0263295984356269		
Feldfahrzeit zu Auftrag 6 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,00816638734751159
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0268737944489193		
Feldfahrzeit zu Auftrag 7 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0287556756873821
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,00816638734751159		
Feldfahrzeit zu Auftrag 8 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0235265030822278
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0287556756873821		
Feldfahrzeit zu Auftrag 9 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,00760231914817735
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0235265030822278		
Feldfahrzeit zu Auftrag 10 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,028875455498094
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,00760231914817735		
Feldfahrzeit zu Auftrag 11 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0236207252624717
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,028875455498094		
Feldfahrzeit zu Auftrag 12 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,00943598990408689
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0236207252624717		
Feldfahrzeit zu Auftrag 13 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0278241539736545
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,00943598990408689		
Feldfahrzeit zu Auftrag 14 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0368328268446345
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0278241539736545		
Feldfahrzeit zu Auftrag 15 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0113138630419603
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0368328268446345		
Feldfahrzeit zu Auftrag 16 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,013485687267661
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0113138630419603		
Feldfahrzeit zu Auftrag 17 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0174336942273396
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,013485687267661		
Feldfahrzeit zu Auftrag 18 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0221849635567323
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0174336942273396		
Feldfahrzeit zu Auftrag 19 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0195850578696825
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0221849635567323		

Tabelle 23: Früheste und späteste optimale Ankunftszeiten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 3)

## Optimale Ankunftszeiten am Schlag und Silo in [h]

Auftrag: 1	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 17,99861 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,00361
Auftrag: 1	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,3043379719038 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,3093379719038
Auftrag: 2	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,1398944642669 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,1448944642669
Auftrag: 2	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,4591539283567 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,4641539283567
Auftrag: 3	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,2834343247706 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,2884343247706
Auftrag: 3	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,5583452633219 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,5633452633219
Auftrag: 4	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,4013593280127 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,4063593280127
Auftrag: 4	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,7093521130252 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,7143521130252
Auftrag: 5	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,5292725145896 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,5342725145896
Auftrag: 5	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,8414122733054 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,8464122733054
Auftrag: 6	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,6705569788565 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,6755569788565
Auftrag: 6	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,9680502267077 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,9730502267077
Auftrag: 7	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,8140968393602 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,8190968393602
Auftrag: 7	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,1146108182897 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,1196108182897
Auftrag: 8	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,9320218426023 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,9370218426023
Auftrag: 8	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,2372115322614 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,2422115322614
Auftrag: 9	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,0599350291792 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,0649350291792
Auftrag: 9	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,3528033125942 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,3578033125942
Auftrag: 10	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,2012194934461 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,2062194934461
Auftrag: 10	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,5194218094479 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,5244218094479
Auftrag: 11	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,3447593539498 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,3497593539498
Auftrag: 11	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,6401383824544 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,6451383824544
Auftrag: 12	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,4626843571919 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,4676843571919
Auftrag: 12	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,7914201799139 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,7964201799139
Auftrag: 13	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,6228174900098 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,6278174900098
Auftrag: 13	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,9359076082503 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,9409076082503
Auftrag: 14	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,7641019542767 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,7691019542767
Auftrag: 14	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,090261641625 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,095261641625
Auftrag: 15	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,9076418147804 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,9126418147804
Auftrag: 15	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,2006188643992 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,2056188643992

Optimale Ankunftszeiten am Schlag und Silo in [h]

Auftrag: 16	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,0355550013573
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,0405550013573
Auftrag: 16	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,3683405214428
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,3733405214428
Auftrag: 17	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,1956881341751
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,2006881341751
Auftrag: 17	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,4983877926693
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,5033877926693
Auftrag: 18	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,336972598442
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,341972598442
Auftrag: 18	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,6484844225025
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,6534844225025
Auftrag: 19	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,4584789094414
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,4634789094414
Auftrag: 19	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,7533202783105
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,7583202783105

Tabelle 24: Abfahrtszeiten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 3)

## Abfahrtszeiten von Transportfahrzeug 1 in [h]

Auftrag: 3	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,4013593280127	Abfahrtszeit am Silo: 18,6596133976848
Auftrag: 7	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,9469409127917	Abfahrtszeit am Silo: 19,230798022842
Auftrag: 11	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,4904128226625	Abfahrtszeit am Silo: 19,7691349822879

## Abfahrtszeiten von Transportfahrzeug 2 in [h]

Auftrag: 4	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,5292725145896	Abfahrtszeit am Silo: 18,7892888079952
Auftrag: 8	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,0792656404489	Abfahrtszeit am Silo: 19,3364788385011
Auftrag: 15	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,0632834668279	Abfahrtszeit am Silo: 20,3082840248399
Auftrag: 19	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,6297472354157	Abfahrtszeit am Silo: 20,8790151420537

## Abfahrtszeiten von Transportfahrzeug 3 in [h]

Auftrag: 1	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,1398944642669	Abfahrtszeit am Silo: 18,3867515914827
Auftrag: 5	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,6706156541852	Abfahrtszeit am Silo: 18,9238845682131
Auftrag: 9	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,2205501047158	Abfahrtszeit am Silo: 19,4545475434429
Auftrag: 13	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,7918304197473	Abfahrtszeit am Silo: 20,0460496932998
Auftrag: 17	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,3647010639126	Abfahrtszeit am Silo: 20,6085298777189

## Abfahrtszeiten von Transportfahrzeug 4 in [h]

Auftrag: 2	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,2834343247706	Abfahrtszeit am Silo: 18,5632689245969
Auftrag: 6	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,8290159095496	Abfahrtszeit am Silo: 19,0870842931374
Auftrag: 10	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,3640899652195	Abfahrtszeit am Silo: 19,6428674169579
Auftrag: 14	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,935370280251	Abfahrtszeit am Silo: 20,2221051033359
Auftrag: 18	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,5082409244163	Abfahrtszeit am Silo: 20,7803278842134

## Abfahrtszeiten von Transportfahrzeug 5 in [h]

Auftrag: 12	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,6505459554804	Abfahrtszeit am Silo: 19,9150972771512
Auftrag: 16	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,2234165996457	Abfahrtszeit am Silo: 20,4920176186801

Tabelle 25: Ankunftszeiten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 3)

## Ankunftszeiten von Transportfahrzeug 1 in [h]

Auftrag: 3	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 17,398335403586	Ankunftszeit am Silo: 18,5583452633219
Auftrag: 7	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 18,7911016552217	Ankunftszeit am Silo: 19,1295298884791
Auftrag: 11	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,3724878194204	Ankunftszeit am Silo: 19,667866847925

## Ankunftszeiten von Transportfahrzeug 2 in [h]

Auftrag: 4	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 17,3815415353092	Ankunftszeit am Silo: 18,7093521130252
Auftrag: 8	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 18,951352453872	Ankunftszeit am Silo: 19,2565421435311
Auftrag: 15	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,504509960627	Ankunftszeit am Silo: 20,2283473298698
Auftrag: 19	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,4708914379009	Ankunftszeit am Silo: 20,8030822932854

## Ankunftszeiten von Transportfahrzeug 3 in [h]

Auftrag: 1	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 17,37625	Ankunftszeit am Silo: 18,3043379719038
Auftrag: 5	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 18,5293311899184	Ankunftszeit am Silo: 18,8414709486341
Auftrag: 9	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,0792656404489	Ankunftszeit am Silo: 19,3721339238639
Auftrag: 13	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,5923574296639	Ankunftszeit am Silo: 19,9636360737209
Auftrag: 17	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,1757853805675	Ankunftszeit am Silo: 20,5261162581399

## Ankunftszeiten von Transportfahrzeug 4 in [h]

Auftrag: 2	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 17,3757953376369	Ankunftszeit am Silo: 18,4591539283567
Auftrag: 6	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 18,6854760490459	Ankunftszeit am Silo: 18,9829692968971
Auftrag: 10	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,2093505535553	Ankunftszeit am Silo: 19,5387524207176
Auftrag: 14	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,7744227551324	Ankunftszeit am Silo: 20,1179901070957
Auftrag: 18	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,3348721275633	Ankunftszeit am Silo: 20,6762128879731

## Ankunftszeiten von Transportfahrzeug 5 in [h]

Auftrag: 12	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 17,4237935907331	Ankunftszeit am Silo: 19,8191486453845
Auftrag: 16	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,0388555401932	Ankunftszeit am Silo: 20,3960689869134

Tabelle 26: Kapazitäten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 3)

Transportfahrzeug 1, Kapazität in [t]: 14,64

Auftrag: 3	Beladung am Feldhäcksler: 14,64	Entladung am Silo: 14,64
Auftrag: 7	Beladung am Feldhäcksler: 14,64	Entladung am Silo: 14,64
Auftrag: 11	Beladung am Feldhäcksler: 14,64	Entladung am Silo: 14,64

Transportfahrzeug 2, Kapazität in [t]: 15,88

Auftrag: 4	Beladung am Feldhäcksler: 15,88	Entladung am Silo: 15,88
Auftrag: 8	Beladung am Feldhäcksler: 15,88	Entladung am Silo: 15,88
Auftrag: 15	Beladung am Feldhäcksler: 15,88	Entladung am Silo: 15,88
Auftrag: 19	Beladung am Feldhäcksler: 15,88	Entladung am Silo: 15,88

Transportfahrzeug 3, Kapazität in [t]: 17,54

Auftrag: 1	Beladung am Feldhäcksler: 17,54	Entladung am Silo: 17,54
Auftrag: 5	Beladung am Feldhäcksler: 17,54	Entladung am Silo: 17,54
Auftrag: 9	Beladung am Feldhäcksler: 17,54	Entladung am Silo: 17,54
Auftrag: 13	Beladung am Feldhäcksler: 17,54	Entladung am Silo: 17,54
Auftrag: 17	Beladung am Feldhäcksler: 17,54	Entladung am Silo: 17,54

Transportfahrzeug 4, Kapazität in [t]: 17,82

Auftrag: 2	Beladung am Feldhäcksler: 17,82	Entladung am Silo: 17,82
Auftrag: 6	Beladung am Feldhäcksler: 17,82	Entladung am Silo: 17,82
Auftrag: 10	Beladung am Feldhäcksler: 17,82	Entladung am Silo: 17,82
Auftrag: 14	Beladung am Feldhäcksler: 17,82	Entladung am Silo: 17,82
Auftrag: 18	Beladung am Feldhäcksler: 17,82	Entladung am Silo: 17,82

Transportfahrzeug 5, Kapazität in [t]: 19,88

Auftrag: 12	Beladung am Feldhäcksler: 19,88	Entladung am Silo: 19,88
Auftrag: 16	Beladung am Feldhäcksler: 19,88	Entladung am Silo: 19,88

Tabelle 27: Servicebeginnzeiten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 3)

## Servicebeginnzeiten von Transportfahrzeug 1 in [h]

Auftrag: 3	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,2834343247706 Servicebeginnzeit am Silo: 18,5583452633219
Auftrag: 7	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,8290159095496 Servicebeginnzeit am Silo: 19,1295298884791
Auftrag: 11	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,3724878194204 Servicebeginnzeit am Silo: 19,667866847925

## Servicebeginnzeiten von Transportfahrzeug 2 in [h]

Auftrag: 4	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,4013593280127 Servicebeginnzeit am Silo: 18,7093521130252
Auftrag: 8	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,951352453872 Servicebeginnzeit am Silo: 19,2565421435311
Auftrag: 15	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,935370280251 Servicebeginnzeit am Silo: 20,2283473298698
Auftrag: 19	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,5082409244163 Servicebeginnzeit am Silo: 20,8030822932854

## Servicebeginnzeiten von Transportfahrzeug 3 in [h]

Auftrag: 1	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 17,99861 Servicebeginnzeit am Silo: 18,3043379719038
Auftrag: 5	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,5293311899184 Servicebeginnzeit am Silo: 18,8414709486341
Auftrag: 9	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,0792656404489 Servicebeginnzeit am Silo: 19,3721339238639
Auftrag: 13	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,6505459554804 Servicebeginnzeit am Silo: 19,9636360737209
Auftrag: 17	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,2234165996457 Servicebeginnzeit am Silo: 20,5261162581399

## Servicebeginnzeiten von Transportfahrzeug 4 in [h]

Auftrag: 2	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,1398944642669 Servicebeginnzeit am Silo: 18,4591539283567
Auftrag: 6	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,6854760490459 Servicebeginnzeit am Silo: 18,9829692968971
Auftrag: 10	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,2205501047158 Servicebeginnzeit am Silo: 19,5387524207176
Auftrag: 14	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,7918304197473 Servicebeginnzeit am Silo: 20,1179901070957
Auftrag: 18	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,3647010639126 Servicebeginnzeit am Silo: 20,6762128879731

## Servicebeginnzeiten von Transportfahrzeug 5 in [h]

Auftrag: 12	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,4904128226625 Servicebeginnzeit am Silo: 19,8191486453845
Auftrag: 16	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,0632834668279 Servicebeginnzeit am Silo: 20,3960689869134

Tabelle 28: Servicezeiten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 3)

## Servicezeiten von Transportfahrzeug 1 in [h]

Auftrag: 3	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,117925003242132	Servicezeit am Silo: 0,101268134362893
Auftrag: 7	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,117925003242132	Servicezeit am Silo: 0,101268134362893
Auftrag: 11	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,117925003242132	Servicezeit am Silo: 0,101268134362893

## Servicezeiten von Transportfahrzeug 2 in [h]

Auftrag: 4	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,127913186576848	Servicezeit am Silo: 0,0799366949700288
Auftrag: 8	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,127913186576848	Servicezeit am Silo: 0,0799366949700288
Auftrag: 15	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,127913186576848	Servicezeit am Silo: 0,0799366949700288
Auftrag: 19	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,121506310999393	Servicezeit am Silo: 0,0759328487682733

## Servicezeiten von Transportfahrzeug 3 in [h]

Auftrag: 1	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,141284464266871	Servicezeit am Silo: 0,08241361957892
Auftrag: 5	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,141284464266871	Servicezeit am Silo: 0,08241361957892
Auftrag: 9	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,141284464266871	Servicezeit am Silo: 0,08241361957892
Auftrag: 13	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,141284464266871	Servicezeit am Silo: 0,08241361957892
Auftrag: 17	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,141284464266871	Servicezeit am Silo: 0,08241361957892

## Servicezeiten von Transportfahrzeug 4 in [h]

Auftrag: 2	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,143539860503743	Servicezeit am Silo: 0,104114996240292
Auftrag: 6	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,143539860503743	Servicezeit am Silo: 0,104114996240292
Auftrag: 10	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,143539860503743	Servicezeit am Silo: 0,104114996240292
Auftrag: 14	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,143539860503743	Servicezeit am Silo: 0,104114996240292
Auftrag: 18	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,143539860503743	Servicezeit am Silo: 0,104114996240292

## Servicezeiten von Transportfahrzeug 5 in [h]

Auftrag: 12	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,160133132817868	Servicezeit am Silo: 0,0959486317667193
Auftrag: 16	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,160133132817868	Servicezeit am Silo: 0,0959486317667193

Tabelle 29: Wartezeiten der Transportfahrzeuge am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 3)

## Wartezeiten von Transportfahrzeug 1 in [h]

Auftrag: 3	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 7	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,0379142543279016	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 11	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0

## Wartezeiten von Transportfahrzeug 2 in [h]

Auftrag: 4	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 8	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 15	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,430860319624045	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 19	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,03734948651541	Wartezeit am Silo: 0

## Wartezeiten von Transportfahrzeug 3 in [h]

Auftrag: 1	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 5	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 9	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 13	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,0581885258164547	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 17	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,0476312190782267	Wartezeit am Silo: 0

## Wartezeiten von Transportfahrzeug 4 in [h]

Auftrag: 2	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 6	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 10	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,0111995511604697	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 14	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,0174076646148329	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 18	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,0298289363493218	Wartezeit am Silo: 0

## Wartezeiten von Transportfahrzeug 5 in [h]

Auftrag: 12	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 16	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,0244279266346936	Wartezeit am Silo: 0

Tabelle 30: Wartezeiten des Feldhäckslers (Berechnung 3)

Wartezeiten des Feldhäckslers in [h] bezüglich des optimalen Serviceauftrags

Auftrag: 3	Wartezeit: 0
Auftrag: 7	Wartezeit: 0,00991907018940452
Auftrag: 11	Wartezeit: 0,0227284654705997
Auftrag: 4	Wartezeit: 0
Auftrag: 8	Wartezeit: 0,0143306112696955
Auftrag: 15	Wartezeit: 0,0227284654705997
Auftrag: 19	Wartezeit: 0,0447620149749497
Auftrag: 1	Wartezeit: 0
Auftrag: 5	Wartezeit: 0
Auftrag: 9	Wartezeit: 0,0143306112696955
Auftrag: 13	Wartezeit: 0,0227284654705997
Auftrag: 17	Wartezeit: 0,0227284654705997
Auftrag: 2	Wartezeit: 0
Auftrag: 6	Wartezeit: 0,00991907018940452
Auftrag: 10	Wartezeit: 0,0143306112696955
Auftrag: 14	Wartezeit: 0,0227284654705997
Auftrag: 18	Wartezeit: 0,0227284654705997
Auftrag: 12	Wartezeit: 0,0227284654705997
Auftrag: 16	Wartezeit: 0,0227284654705997

## 10.2 FEGA:

**Berechnung 1: (9.43 t, 10.31 t, 10.36 t, 12.03 t, 13.03 t),**

**Berechnung 2: (10.51 t, 11.49 t, 12.03 t, 12.36 t, 14.41 t),**

**Berechnung 3: (14.64 t, 15.88 t, 17.54 t, 17.82 t, 19.88 t)**

Tabelle 31: Feldfahrzeiten vom Schlagrand zum Feldhäcksler und vice versa (Berechnung 1)

Feldfahrzeit zu Auftrag 1 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0283201419024679
Fahrt zum Feldhäcksler: 0		
Feldfahrzeit zu Auftrag 2 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,00478791668915682
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0283201419024679		
Feldfahrzeit zu Auftrag 3 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0254512028632612
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,00478791668915682		
Feldfahrzeit zu Auftrag 4 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0194162182373563
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0254512028632612		
Feldfahrzeit zu Auftrag 5 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0170995760386838
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0194162182373563		
Feldfahrzeit zu Auftrag 6 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0274296769001459
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0170995760386838		
Feldfahrzeit zu Auftrag 7 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0135728457415523
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0274296769001459		
Feldfahrzeit zu Auftrag 8 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0330015633144237
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0135728457415523		
Feldfahrzeit zu Auftrag 9 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,00499145734928545
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0330015633144237		
Feldfahrzeit zu Auftrag 10 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0280786184239541
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,00499145734928545		
Feldfahrzeit zu Auftrag 11 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0132059179321529
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0280786184239541		
Feldfahrzeit zu Auftrag 12 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0286593016181534
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0132059179321529		
Feldfahrzeit zu Auftrag 13 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0218682015455526
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0286593016181534		
Feldfahrzeit zu Auftrag 14 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0171487175533969
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0218682015455526		
Feldfahrzeit zu Auftrag 15 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0379382640767979
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0171487175533969		
Feldfahrzeit zu Auftrag 16 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0124445538130535
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0379382640767979		
Feldfahrzeit zu Auftrag 17 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,03298625813608
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0124445538130535		
Feldfahrzeit zu Auftrag 18 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0144316732194143
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,03298625813608		
Feldfahrzeit zu Auftrag 19 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0281508382783624
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0144316732194143		
Feldfahrzeit zu Auftrag 20 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0285079865326799
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0281508382783624		
Feldfahrzeit zu Auftrag 21 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,020488417815281
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0285079865326799		
Feldfahrzeit zu Auftrag 22 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0310177524224547
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,020488417815281		
Feldfahrzeit zu Auftrag 23 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0127491005472664
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0310177524224547		
Feldfahrzeit zu Auftrag 24 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0308595071888619
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0127491005472664		
Feldfahrzeit zu Auftrag 25 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0146911786562984
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0308595071888619		
Feldfahrzeit zu Auftrag 26 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0227333751966388
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0146911786562984		
Feldfahrzeit zu Auftrag 27 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0316103810735375
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0227333751966388		
Feldfahrzeit zu Auftrag 28 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,016206158732368
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0316103810735375		
Feldfahrzeit zu Auftrag 29 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0246952309585929
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,016206158732368		
Feldfahrzeit zu Auftrag 30 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0195850573272083
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0246952309585929		

Tabelle 32: Früheste und späteste optimale Ankunftszeiten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 1)

## Optimale Ankunftszeiten am Schlag und Silo in [h]

Auftrag: 1	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 17,99861 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,00361
Auftrag: 1	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,2637512182984 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,2687512182984
Auftrag: 2	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,0816810763959 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,0866810763959
Auftrag: 2	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,3505599480189 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,3555599480189
Auftrag: 3	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,1866053313298 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,1916053313298
Auftrag: 3	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,439511859917 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,444511859917
Auftrag: 4	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,2700791570537 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,2750791570537
Auftrag: 4	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,5193033085274 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,5243033085274
Auftrag: 5	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,34605379029 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,35105379029
Auftrag: 5	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,6058096347023 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,6108096347023
Auftrag: 6	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,4429230586637 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,4479230586637
Auftrag: 6	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,7071738119597 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,7121738119597
Auftrag: 7	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,5259941350596 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,5309941350596
Auftrag: 7	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,803657935735 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,808657935735
Auftrag: 8	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,6309183899935 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,6359183899935
Auftrag: 8	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,9007410297038 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,9057410297038
Auftrag: 9	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,7139894663894 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,7189894663894
Auftrag: 9	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,9464362494626 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,9514362494626
Auftrag: 10	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,7974632921133 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,8024632921133
Auftrag: 10	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,0553498437736 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,0603498437736
Auftrag: 11	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,8734379253496 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,8784379253496
Auftrag: 11	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,1507347982156 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,1557347982156
Auftrag: 12	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,9783621802835 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,9833621802835
Auftrag: 12	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,2496777502753 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,2546777502753
Auftrag: 13	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,0752314486571 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,0802314486571
Auftrag: 13	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,3245549759266 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,3295549759266
Auftrag: 14	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,158705274381 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,163705274381
Auftrag: 14	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,4126750683303 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,4176750683303
Auftrag: 15	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,2417763507769 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,2467763507769
Auftrag: 15	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,5095225480901 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,5145225480901

## Optimale Ankunftszeiten am Schlag und Silo in [h]

Auftrag: 16	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,3177509840133 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,3227509840133
Auftrag: 16	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,5600034710627 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,5650034710626
Auftrag: 17	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,3937256172496 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,3987256172496
Auftrag: 17	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,6693681437593 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,6743681437593
Auftrag: 18	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,4905948856232 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,4955948856232
Auftrag: 18	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,7691175137765 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,7741175137765
Auftrag: 19	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,5955191405571 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,6005191405571
Auftrag: 19	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,8604910552314 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,8654910552314
Auftrag: 20	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,678590216953 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,683590216953
Auftrag: 20	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,9345535292096 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,9395535292096
Auftrag: 21	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,7620640426769 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,7670640426769
Auftrag: 21	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,0252087288658 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,0302087288658
Auftrag: 22	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,8589333110506 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,8639333110506
Auftrag: 22	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,1540420184069 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,1590420184069
Auftrag: 23	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,9638575659844 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,9688575659844
Auftrag: 23	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,206414599768 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,211414599768
Auftrag: 24	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,0398321992208 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,0448321992208
Auftrag: 24	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,2981470321335 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,3031470321335
Auftrag: 25	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,1233060249447 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,1283060249447
Auftrag: 25	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,3678051368373 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,3728051368373
Auftrag: 26	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,199280658181 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,204280658181
Auftrag: 26	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,4588351097736 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,4638351097736
Auftrag: 27	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,2823517345769 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,2873517345769
Auftrag: 27	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,5566183840241 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,5616183840241
Auftrag: 28	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,3792210029506 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,3842210029506
Auftrag: 28	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,6228824874068 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,6278824874068
Auftrag: 29	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,4626948286745 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,4676948286745
Auftrag: 29	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,724211136029 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,729211136029
Auftrag: 30	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,5189476919326 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,5239476919326
Auftrag: 30	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,7539523125179 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,7589523125179

Tabelle 33: Abfahrtszeiten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 1)

## Abfahrtszeiten von Transportfahrzeug 1 in [h]

Auftrag: 4	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,34605379029	Abfahrtszeit am Silo: 18,5845465491907
Auftrag: 10	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,8734379253496	Abfahrtszeit am Silo: 19,1205930844369
Auftrag: 15	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,3669809140672	Abfahrtszeit am Silo: 19,6239957188073
Auftrag: 16	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,9041592362057	Abfahrtszeit am Silo: 20,135680330682
Auftrag: 23	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,3759322641002	Abfahrtszeit am Silo: 20,6077579053108
Auftrag: 25	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,8622152608362	Abfahrtszeit am Silo: 21,0959829801558

## Abfahrtszeiten von Transportfahrzeug 2 in [h]

Auftrag: 1	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,0816810763959	Abfahrtszeit am Silo: 18,3156647658567
Auftrag: 6	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,5342243182913	Abfahrtszeit am Silo: 18,7673175427497
Auftrag: 8	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,9823503648872	Abfahrtszeit am Silo: 19,2210154757599
Auftrag: 14	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,489205332542	Abfahrtszeit am Silo: 19,7120175976537
Auftrag: 19	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,9872303126016	Abfahrtszeit am Silo: 20,2210446984383
Auftrag: 26	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,4605793560025	Abfahrtszeit am Silo: 20,6889762787575
Auftrag: 29	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,945862828986	Abfahrtszeit am Silo: 21,1762216075029

## Abfahrtszeiten von Transportfahrzeug 3 in [h]

Auftrag: 3	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,2700791570537	Abfahrtszeit am Silo: 18,4882035554527
Auftrag: 9	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,7974632921133	Abfahrtszeit am Silo: 18,9951279449983
Auftrag: 13	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,268372751181	Abfahrtszeit am Silo: 19,4829141482622
Auftrag: 20	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,8281846029694	Abfahrtszeit am Silo: 20,0493657850377
Auftrag: 24	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,2999576308639	Abfahrtszeit am Silo: 20,5234903335884
Auftrag: 28	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,7862406275999	Abfahrtszeit am Silo: 20,9951199818679

## Abfahrtszeiten von Transportfahrzeug 4 in [h]

Auftrag: 5	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,4429230586637	Abfahrtszeit am Silo: 18,6760726506836
Auftrag: 12	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,0792196332608	Abfahrtszeit am Silo: 19,3239289508602
Auftrag: 17	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,5860746009156	Abfahrtszeit am Silo: 19,8351108750329
Auftrag: 21	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,09851752164	Abfahrtszeit am Silo: 20,3350559554365
Auftrag: 27	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,5733754315188	Abfahrtszeit am Silo: 20,8210358285736

## Abfahrtszeiten von Transportfahrzeug 5 in [h]

Auftrag: 2	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,1866053313298	Abfahrtszeit am Silo: 18,4134285032198
Auftrag: 7	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,6582268350538	Abfahrtszeit am Silo: 18,8938349359963
Auftrag: 11	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,1841438881947	Abfahrtszeit am Silo: 19,4193850613277
Auftrag: 18	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,6909988558495	Abfahrtszeit am Silo: 19,9274657842698
Auftrag: 22	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,2034417765739	Abfahrtszeit am Silo: 20,4564947841972
Auftrag: 30	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,7027668018759	Abfahrtszeit am Silo: 20,9152241710985

Tabelle 34: Ankunftszeiten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 1)

## Ankunftszeiten von Transportfahrzeug 1 in [h]

Auftrag: 4	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 17,3938540028633	Ankunftszeit am Silo: 18,5193033085274
Auftrag: 10	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 18,69794080654	Ankunftszeit am Silo: 19,0553498437736
Auftrag: 15	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,2910062808309	Ankunftszeit am Silo: 19,558752478144
Auftrag: 16	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,8281846029694	Ankunftszeit am Silo: 20,0704370900187
Auftrag: 23	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,2999576308639	Ankunftszeit am Silo: 20,5425146646474
Auftrag: 25	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,7862406275999	Ankunftszeit am Silo: 21,0307397394925

## Ankunftszeiten von Transportfahrzeug 2 in [h]

Auftrag: 1	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 17,3783889	Ankunftszeit am Silo: 18,2637512182984
Auftrag: 6	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 18,4511532418954	Ankunftszeit am Silo: 18,7154039951914
Auftrag: 8	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 18,8992792884913	Ankunftszeit am Silo: 19,1691019282016
Auftrag: 14	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,4061342561461	Ankunftszeit am Silo: 19,6601040500954
Auftrag: 19	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,9041592362057	Ankunftszeit am Silo: 20,16913115088
Auftrag: 26	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,3775082796066	Ankunftszeit am Silo: 20,6370627311992
Auftrag: 29	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,8627917525901	Ankunftszeit am Silo: 21,1243080599446

## Ankunftszeiten von Transportfahrzeug 3 in [h]

Auftrag: 3	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 17,3810379166892	Ankunftszeit am Silo: 18,439511859917
Auftrag: 9	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 18,6374551187671	Ankunftszeit am Silo: 18,9464362494626
Auftrag: 13	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,184898925457	Ankunftszeit am Silo: 19,4342224527265
Auftrag: 20	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,6485738679924	Ankunftszeit am Silo: 20,000674089502
Auftrag: 24	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,2164838051399	Ankunftszeit am Silo: 20,4747986380527
Auftrag: 28	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,7027668018759	Ankunftszeit am Silo: 20,9464282863322

## Ankunftszeiten von Transportfahrzeug 4 in [h]

Auftrag: 5	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 17,3747495482374	Ankunftszeit am Silo: 18,6058096347023
Auftrag: 12	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 18,7886000832195	Ankunftszeit am Silo: 19,253665934879
Auftrag: 17	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,489205332542	Ankunftszeit am Silo: 19,7648478590517
Auftrag: 21	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,0016482532664	Ankunftszeit am Silo: 20,2647929394553
Auftrag: 27	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,4765061631452	Ankunftszeit am Silo: 20,7507728125924

## Ankunftszeiten von Transportfahrzeug 5 in [h]

Auftrag: 2	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 17,4007645419025	Ankunftszeit am Silo: 18,3505599480189
Auftrag: 7	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 18,55330258012	Ankunftszeit am Silo: 18,8309663807954
Auftrag: 11	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,0792196332608	Ankunftszeit am Silo: 19,3565165061269
Auftrag: 18	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,5860746009156	Ankunftszeit am Silo: 19,8645972290689
Auftrag: 22	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,09851752164	Ankunftszeit am Silo: 20,3936262289963
Auftrag: 30	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,6169611819937	Ankunftszeit am Silo: 20,8815185592032

Tabelle 35: Kapazitäten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 1)

Transportfahrzeug 1, Kapazität in [t]: 9,432

Auftrag: 4	Beladung am Feldhäcksler: 9,432	Entladung am Silo: 9,432
Auftrag: 10	Beladung am Feldhäcksler: 9,432	Entladung am Silo: 9,432
Auftrag: 15	Beladung am Feldhäcksler: 9,432	Entladung am Silo: 9,432
Auftrag: 16	Beladung am Feldhäcksler: 9,432	Entladung am Silo: 9,432
Auftrag: 23	Beladung am Feldhäcksler: 9,432	Entladung am Silo: 9,432
Auftrag: 25	Beladung am Feldhäcksler: 9,432	Entladung am Silo: 9,432

Transportfahrzeug 2, Kapazität in [t]: 10,313

Auftrag: 1	Beladung am Feldhäcksler: 10,313	Entladung am Silo: 10,313
Auftrag: 6	Beladung am Feldhäcksler: 10,313	Entladung am Silo: 10,313
Auftrag: 8	Beladung am Feldhäcksler: 10,313	Entladung am Silo: 10,313
Auftrag: 14	Beladung am Feldhäcksler: 10,313	Entladung am Silo: 10,313
Auftrag: 19	Beladung am Feldhäcksler: 10,313	Entladung am Silo: 10,313
Auftrag: 26	Beladung am Feldhäcksler: 10,313	Entladung am Silo: 10,313
Auftrag: 29	Beladung am Feldhäcksler: 10,313	Entladung am Silo: 10,313

Transportfahrzeug 3, Kapazität in [t]: 10,363

Auftrag: 3	Beladung am Feldhäcksler: 10,363	Entladung am Silo: 10,363
Auftrag: 9	Beladung am Feldhäcksler: 10,363	Entladung am Silo: 10,363
Auftrag: 13	Beladung am Feldhäcksler: 10,363	Entladung am Silo: 10,363
Auftrag: 20	Beladung am Feldhäcksler: 10,363	Entladung am Silo: 10,363
Auftrag: 24	Beladung am Feldhäcksler: 10,363	Entladung am Silo: 10,363
Auftrag: 28	Beladung am Feldhäcksler: 10,363	Entladung am Silo: 10,363

Transportfahrzeug 4, Kapazität in [t]: 12,026

Auftrag: 5	Beladung am Feldhäcksler: 12,026	Entladung am Silo: 12,026
Auftrag: 12	Beladung am Feldhäcksler: 12,026	Entladung am Silo: 12,026
Auftrag: 17	Beladung am Feldhäcksler: 12,026	Entladung am Silo: 12,026
Auftrag: 21	Beladung am Feldhäcksler: 12,026	Entladung am Silo: 12,026
Auftrag: 27	Beladung am Feldhäcksler: 12,026	Entladung am Silo: 12,026

Transportfahrzeug 5, Kapazität in [t]: 13,026

Auftrag: 2	Beladung am Feldhäcksler: 13,026	Entladung am Silo: 13,026
Auftrag: 7	Beladung am Feldhäcksler: 13,026	Entladung am Silo: 13,026
Auftrag: 11	Beladung am Feldhäcksler: 13,026	Entladung am Silo: 13,026
Auftrag: 18	Beladung am Feldhäcksler: 13,026	Entladung am Silo: 13,026
Auftrag: 22	Beladung am Feldhäcksler: 13,026	Entladung am Silo: 13,026
Auftrag: 30	Beladung am Feldhäcksler: 13,026	Entladung am Silo: 13,026

Tabelle 36: Servicebeginnzeiten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 1)

## Servicebeginnzeiten von Transportfahrzeug 1 in [h]

Auftrag: 4	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,2700791570537 Servicebeginnzeit am Silo: 18,5193033085274
Auftrag: 10	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,7974632921133 Servicebeginnzeit am Silo: 19,0553498437736
Auftrag: 15	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,2910062808309 Servicebeginnzeit am Silo: 19,558752478144
Auftrag: 16	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,8281846029694 Servicebeginnzeit am Silo: 20,0704370900187
Auftrag: 23	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,2999576308639 Servicebeginnzeit am Silo: 20,5425146646474
Auftrag: 25	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,7862406275999 Servicebeginnzeit am Silo: 21,0307397394925

## Servicebeginnzeiten von Transportfahrzeug 2 in [h]

Auftrag: 1	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 17,99861 Servicebeginnzeit am Silo: 18,2637512182984
Auftrag: 6	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,4511532418954 Servicebeginnzeit am Silo: 18,7154039951914
Auftrag: 8	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,8992792884913 Servicebeginnzeit am Silo: 19,1691019282016
Auftrag: 14	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,4061342561461 Servicebeginnzeit am Silo: 19,6601040500954
Auftrag: 19	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,9041592362057 Servicebeginnzeit am Silo: 20,16913115088
Auftrag: 26	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,3775082796066 Servicebeginnzeit am Silo: 20,6370627311992
Auftrag: 29	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,8627917525901 Servicebeginnzeit am Silo: 21,1243080599446

## Servicebeginnzeiten von Transportfahrzeug 3 in [h]

Auftrag: 3	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,1866053313298 Servicebeginnzeit am Silo: 18,439511859917
Auftrag: 9	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,7139894663894 Servicebeginnzeit am Silo: 18,9464362494626
Auftrag: 13	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,184898925457 Servicebeginnzeit am Silo: 19,4342224527265
Auftrag: 20	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,7447107772454 Servicebeginnzeit am Silo: 20,000674089502
Auftrag: 24	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,2164838051399 Servicebeginnzeit am Silo: 20,4747986380527
Auftrag: 28	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,7027668018759 Servicebeginnzeit am Silo: 20,9464282863322

## Servicebeginnzeiten von Transportfahrzeug 4 in [h]

Auftrag: 5	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,34605379029 Servicebeginnzeit am Silo: 18,6058096347023
Auftrag: 12	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,9823503648872 Servicebeginnzeit am Silo: 19,253665934879
Auftrag: 17	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,489205332542 Servicebeginnzeit am Silo: 19,7648478590517
Auftrag: 21	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,0016482532664 Servicebeginnzeit am Silo: 20,2647929394553
Auftrag: 27	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,4765061631452 Servicebeginnzeit am Silo: 20,7507728125924

Tabelle 37: Servicezeiten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 1)

## Servicezeiten von Transportfahrzeug 1 in [h]

Auftrag: 4	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0759746332363244	Servicezeit am Silo: 0,0652432406633063
Auftrag: 10	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0759746332363244	Servicezeit am Silo: 0,0652432406633063
Auftrag: 15	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0759746332363244	Servicezeit am Silo: 0,0652432406633063
Auftrag: 16	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0759746332363244	Servicezeit am Silo: 0,0652432406633063
Auftrag: 23	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0759746332363244	Servicezeit am Silo: 0,0652432406633063
Auftrag: 25	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0759746332363244	Servicezeit am Silo: 0,0652432406633063

## Servicezeiten von Transportfahrzeug 2 in [h]

Auftrag: 1	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,083071076395909	Servicezeit am Silo: 0,0519135475583065
Auftrag: 6	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,083071076395909	Servicezeit am Silo: 0,0519135475583065
Auftrag: 8	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,083071076395909	Servicezeit am Silo: 0,0519135475583065
Auftrag: 14	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,083071076395909	Servicezeit am Silo: 0,0519135475583065
Auftrag: 19	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,083071076395909	Servicezeit am Silo: 0,0519135475583065
Auftrag: 26	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,083071076395909	Servicezeit am Silo: 0,0519135475583065
Auftrag: 29	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,083071076395909	Servicezeit am Silo: 0,0519135475583065

## Servicezeiten von Transportfahrzeug 3 in [h]

Auftrag: 3	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0834738257239218	Servicezeit am Silo: 0,0486916955357097
Auftrag: 9	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0834738257239218	Servicezeit am Silo: 0,0486916955357097
Auftrag: 13	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0834738257239218	Servicezeit am Silo: 0,0486916955357097
Auftrag: 20	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0834738257239218	Servicezeit am Silo: 0,0486916955357097
Auftrag: 24	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0834738257239218	Servicezeit am Silo: 0,0486916955357097
Auftrag: 28	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0834738257239218	Servicezeit am Silo: 0,0486916955357097

## Servicezeiten von Transportfahrzeug 4 in [h]

Auftrag: 5	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0968692683736257	Servicezeit am Silo: 0,0702630159812429
Auftrag: 12	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0968692683736257	Servicezeit am Silo: 0,0702630159812429
Auftrag: 17	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0968692683736257	Servicezeit am Silo: 0,0702630159812429
Auftrag: 21	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0968692683736257	Servicezeit am Silo: 0,0702630159812429
Auftrag: 27	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0968692683736257	Servicezeit am Silo: 0,0702630159812429

## Servicezeiten von Transportfahrzeug 5 in [h]

Auftrag: 2	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,104924254933881	Servicezeit am Silo: 0,0628685552008695
Auftrag: 7	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,104924254933881	Servicezeit am Silo: 0,0628685552008695
Auftrag: 11	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,104924254933881	Servicezeit am Silo: 0,0628685552008695
Auftrag: 18	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,104924254933881	Servicezeit am Silo: 0,0628685552008695
Auftrag: 22	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,104924254933881	Servicezeit am Silo: 0,0628685552008695
Auftrag: 30	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0562528632581234	Servicezeit am Silo: 0,0337056118953875

Tabelle 38: Wartezeiten der Transportfahrzeuge am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 1)

## Wartezeiten von Transportfahrzeug 1 in [h]

Auftrag: 4	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 10	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,0995224855733028	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 15	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 16	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 23	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 25	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0

## Wartezeiten von Transportfahrzeug 2 in [h]

Auftrag: 1	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 6	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 8	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 14	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 19	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 26	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 29	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0

## Wartezeiten von Transportfahrzeug 3 in [h]

Auftrag: 3	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 9	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,0765343476222604	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 13	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 20	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,0961369092530369	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 24	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 28	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0

## Wartezeiten von Transportfahrzeug 4 in [h]

Auftrag: 5	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 12	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,193750281667747	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 17	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 21	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 27	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0

## Wartezeiten von Transportfahrzeug 5 in [h]

Auftrag: 2	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 7	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 11	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 18	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 22	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 30	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,0295527566241525	Wartezeit am Silo: 0

Tabelle 39: Wartezeiten des Feldhäckslers (Berechnung 1)

Wartezeiten des Feldhäckslers in [h] bezüglich des optimalen Serviceauftrags

Auftrag: 4	Wartezeit: 0
Auftrag: 10	Wartezeit: 0
Auftrag: 15	Wartezeit: 0,0442299300539233
Auftrag: 16	Wartezeit: 0,505433618956083
Auftrag: 23	Wartezeit: 0,331100064879415
Auftrag: 25	Wartezeit: 0,657934602655178
Auftrag: 1	Wartezeit: 0
Auftrag: 6	Wartezeit: 0,00323018323170743
Auftrag: 8	Wartezeit: 0,263360898497833
Auftrag: 14	Wartezeit: 0,242428981765048
Auftrag: 19	Wartezeit: 0,303640095648575
Auftrag: 26	Wartezeit: 0,173227621425603
Auftrag: 29	Wartezeit: 0,39509692391562
Auftrag: 3	Wartezeit: 0
Auftrag: 9	Wartezeit: 0
Auftrag: 13	Wartezeit: 0,104667476799921
Auftrag: 20	Wartezeit: 0,0611205602924194
Auftrag: 24	Wartezeit: 0,17165160591917
Auftrag: 28	Wartezeit: 0,318545798925395
Auftrag: 5	Wartezeit: 0
Auftrag: 12	Wartezeit: 0
Auftrag: 17	Wartezeit: 0,0904797152923997
Auftrag: 21	Wartezeit: 0,234584210589432
Auftrag: 27	Wartezeit: 0,189154428568294
Auftrag: 2	Wartezeit: 0
Auftrag: 7	Wartezeit: 0,0223084450603892
Auftrag: 11	Wartezeit: 0,200781707911215
Auftrag: 18	Wartezeit: 0,0904797152923997
Auftrag: 22	Wartezeit: 0,234584210589432
Auftrag: 30	Wartezeit: 0,122566246685228

Tabelle 40: Feldfahrzeiten vom Schlagrand zum Feldhäcksler und vice versa (Berechnung 2)

Feldfahrzeit zu Auftrag 1 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0289220705213212
Fahrt zum Feldhäcksler: 0		
Feldfahrzeit zu Auftrag 2 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0017143746681591
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0289220705213212		
Feldfahrzeit zu Auftrag 3 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,032770643850774
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0017143746681591		
Feldfahrzeit zu Auftrag 4 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,00418269925448269
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,032770643850774		
Feldfahrzeit zu Auftrag 5 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0308843430388
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,00418269925448269		
Feldfahrzeit zu Auftrag 6 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,00900403834332389
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0308843430388		
Feldfahrzeit zu Auftrag 7 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0251979992449836
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,00900403834332389		
Feldfahrzeit zu Auftrag 8 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0181951018190047
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0251979992449836		
Feldfahrzeit zu Auftrag 9 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0227890519495957
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0181951018190047		
Feldfahrzeit zu Auftrag 10 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0147546770480483
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0227890519495957		
Feldfahrzeit zu Auftrag 11 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0271213540842189
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0147546770480483		
Feldfahrzeit zu Auftrag 12 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0230088234424249
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0271213540842189		
Feldfahrzeit zu Auftrag 13 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0165405660680976
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0230088234424249		
Feldfahrzeit zu Auftrag 14 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0306323375667363
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0165405660680976		
Feldfahrzeit zu Auftrag 15 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,021242177231079
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0306323375667363		
Feldfahrzeit zu Auftrag 16 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0288678380326733
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,021242177231079		
Feldfahrzeit zu Auftrag 17 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0247884362885301
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0288678380326733		
Feldfahrzeit zu Auftrag 18 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0288242253050355
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0247884362885301		
Feldfahrzeit zu Auftrag 19 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0210749461366584
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0288242253050355		
Feldfahrzeit zu Auftrag 20 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0322313524975629
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0210749461366584		
Feldfahrzeit zu Auftrag 21 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0185576229557469
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0322313524975629		
Feldfahrzeit zu Auftrag 22 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0246536591433194
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0185576229557469		
Feldfahrzeit zu Auftrag 23 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0264595856207115
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0246536591433194		
Feldfahrzeit zu Auftrag 24 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0140550748645659
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0264595856207115		
Feldfahrzeit zu Auftrag 25 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0140330974079306
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0140550748645659		
Feldfahrzeit zu Auftrag 26 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0266710475619429
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0140330974079306		
Feldfahrzeit zu Auftrag 27 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0195850568809874
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0266710475619429		

Tabelle 41: Früheste und späteste optimale Ankunftszeiten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 2)

## Optimale Ankunftszeiten am Schlag und Silo in [h]

Auftrag: 1	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 17,99861 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,00361
Auftrag: 1	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,3027711268546 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,3077711268546
Auftrag: 2	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,1146823563333 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,1196823563333
Auftrag: 2	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,3548879397497 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,3598879397497
Auftrag: 3	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,1993402650816 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,2043402650816
Auftrag: 3	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,4784127045097 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,4834127045097
Auftrag: 4	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,2918920606589 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,2968920606589
Auftrag: 4	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,5414213937981 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,5464213937981
Auftrag: 5	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,3914516945436 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,3964516945436
Auftrag: 5	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,6686378331598 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,6736378331598
Auftrag: 6	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,484003490121 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,489003490121
Auftrag: 6	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,7338905167842 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,7388905167841
Auftrag: 7	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,5809049784408 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,5859049784408
Auftrag: 7	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,8445941864341 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,8495941864341
Auftrag: 8	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,6655628871891 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,6705628871891
Auftrag: 8	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,9300597845854 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,9350597845854
Auftrag: 9	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,7581146827664 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,7631146827664
Auftrag: 9	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,0262503686008 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,0312503686008
Auftrag: 10	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,8576743166512 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,8626743166512
Auftrag: 10	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,1476680500325 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,1526680500325
Auftrag: 11	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,9737466729845 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,9787466729845
Auftrag: 11	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,2417510153885 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,2467510153885
Auftrag: 12	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,0706481613043 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,0756481613043
Auftrag: 12	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,332148193495 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,337148193495
Auftrag: 13	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,1553060700526 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,1603060700526
Auftrag: 13	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,410337844869 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,415337844869
Auftrag: 14	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,2399639788009 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,2449639788009
Auftrag: 14	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,5159429502524 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,5209429502524
Auftrag: 15	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,3395236126856 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,3445236126856
Auftrag: 15	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,63600484625 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,64100484625

## Optimale Ankunftszeiten am Schlag und Silo in [h]

Auftrag: 16	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,4555959690189
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,4605959690189
Auftrag: 16	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,7253467953715
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,7303467953715
Auftrag: 17	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,5524974573388
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,5574974573388
Auftrag: 17	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,8525249499606
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,8575249499606
Auftrag: 18	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,6685698136721
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,6735698136721
Auftrag: 18	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,9436958345544
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,9486958345544
Auftrag: 19	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,7611216092494
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,7661216092494
Auftrag: 19	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,0275431892708
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,0325431892708
Auftrag: 20	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,8606812431341
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,8656812431341
Auftrag: 20	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,1382592295164
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,1432592295164
Auftrag: 21	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,9602408770189
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,9652408770189
Auftrag: 21	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,2196814882945
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,2246814882945
Auftrag: 22	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,0571423653387
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,0621423653387
Auftrag: 22	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,3202872332303
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,3252872332303
Auftrag: 23	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,141800274087
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,146800274087
Auftrag: 23	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,4145616552851
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,4195616552851
Auftrag: 24	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,2343520696644
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,2393520696644
Auftrag: 24	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,4947089401063
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,4997089401063
Auftrag: 25	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,3269038652417
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,3319038652417
Auftrag: 25	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,6161760189829
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,6211760189829
Auftrag: 26	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,442976221575
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,447976221575
Auftrag: 26	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,7105302574568
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,7155302574568
Auftrag: 27	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,5051172786788
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,5101172786788
Auftrag: 27	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,7406766926637
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,7456766926637

Tabelle 42: Abfahrtszeiten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 2)

## Abfahrtszeiten von Transportfahrzeug 1 in [h]

Auftrag: 2	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,1993402650816	Abfahrtszeit am Silo: 18,4275879460444
Auftrag: 7	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,6655628871891	Abfahrtszeit am Silo: 18,9172941927288
Auftrag: 12	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,1620463269533	Abfahrtszeit am Silo: 19,4115884566904
Auftrag: 13	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,6825371521412	Abfahrtszeit am Silo: 19,925611024504
Auftrag: 22	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,2268859904807	Abfahrtszeit am Silo: 20,4780729559187
Auftrag: 27	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,7448732899718	Abfahrtszeit am Silo: 20,971655300023

## Abfahrtszeiten von Transportfahrzeug 2 in [h]

Auftrag: 3	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,2918920606589	Abfahrtszeit am Silo: 18,5362510310339
Auftrag: 5	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,7581146827664	Abfahrtszeit am Silo: 19,0005873523295
Auftrag: 8	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,2545981225306	Abfahrtszeit am Silo: 19,4843815508739
Auftrag: 18	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,8227410294102	Abfahrtszeit am Silo: 20,0631535812395
Auftrag: 23	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,322214232193	Abfahrtszeit am Silo: 20,560262144338
Auftrag: 24	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,8672478549233	Abfahrtszeit am Silo: 21,0928912563122

## Abfahrtszeiten von Transportfahrzeug 3 in [h]

Auftrag: 6	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,5809049784408	Abfahrtszeit am Silo: 18,7904147952069
Auftrag: 11	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,077388418205	Abfahrtszeit am Silo: 19,3050155507119
Auftrag: 16	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,597879243393	Abfahrtszeit am Silo: 19,8272528598483
Auftrag: 21	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,1422280817324	Abfahrtszeit am Silo: 20,3612914831109
Auftrag: 26	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,6827322328679	Abfahrtszeit am Silo: 20,9099090588526

## Abfahrtszeiten von Transportfahrzeug 4 in [h]

Auftrag: 4	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,3914516945436	Abfahrtszeit am Silo: 18,6136358356348
Auftrag: 9	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,8644145735519	Abfahrtszeit am Silo: 19,1052050673382
Auftrag: 14	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,3641359449651	Abfahrtszeit am Silo: 19,6127697243686
Auftrag: 19	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,922300663295	Abfahrtszeit am Silo: 20,1613770512683
Auftrag: 20	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,4217738660778	Abfahrtszeit am Silo: 20,672006660412

## Abfahrtszeiten von Transportfahrzeug 5 in [h]

Auftrag: 1	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,1146823563333	Abfahrtszeit am Silo: 18,3723194057157
Auftrag: 10	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,9804869298851	Abfahrtszeit am Silo: 19,2239565857943
Auftrag: 15	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,5009777550731	Abfahrtszeit am Silo: 19,7509349111653
Auftrag: 17	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,0453265934125	Abfahrtszeit am Silo: 20,2988300085622
Auftrag: 25	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,585830744548	Abfahrtszeit am Silo: 20,8285788208171

Tabelle 43: Ankunftszeiten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 2)

## Ankunftszeiten von Transportfahrzeug 1 in [h]

Auftrag: 2	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 17,3973248705213	Ankunftszeit am Silo: 18,3548879397497
Auftrag: 7	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 18,5449947843877	Ankunftszeit am Silo: 18,8445941864341
Auftrag: 12	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,0595586037137	Ankunftszeit am Silo: 19,3388884503957
Auftrag: 13	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,597879243393	Ankunftszeit am Silo: 19,8529110182093
Auftrag: 22	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,0760377436926	Ankunftszeit am Silo: 20,405372949624
Auftrag: 27	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,6827322328679	Ankunftszeit am Silo: 20,9182916468528

## Ankunftszeiten von Transportfahrzeug 2 in [h]

Auftrag: 3	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 17,3801032746682	Ankunftszeit am Silo: 18,4784127045097
Auftrag: 5	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 18,6655628871891	Ankunftszeit am Silo: 18,9427490258052
Auftrag: 8	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,1620463269533	Ankunftszeit am Silo: 19,4265432243496
Auftrag: 18	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,6645659750438	Ankunftszeit am Silo: 20,0053152547152
Auftrag: 23	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,2296624366157	Ankunftszeit am Silo: 20,5024238178137
Auftrag: 24	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,774696059346	Ankunftszeit am Silo: 21,0350529297879

## Ankunftszeiten von Transportfahrzeug 3 in [h]

Auftrag: 6	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 17,4071343430388	Ankunftszeit am Silo: 18,7338905167842
Auftrag: 11	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 18,9281597291556	Ankunftszeit am Silo: 19,2484912722892
Auftrag: 16	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,4811492570965	Ankunftszeit am Silo: 19,7707285814256
Auftrag: 21	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,0154381426854	Ankunftszeit am Silo: 20,3047672046882
Auftrag: 26	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,5493433870982	Ankunftszeit am Silo: 20,8533847804298

## Ankunftszeiten von Transportfahrzeug 4 in [h]

Auftrag: 4	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 17,3881039738508	Ankunftszeit am Silo: 18,5414213937981
Auftrag: 9	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 18,7339045243545	Ankunftszeit am Silo: 19,0329906255015
Auftrag: 14	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,2349510387851	Ankunftszeit am Silo: 19,5405552825319
Auftrag: 19	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,7739343675549	Ankunftszeit am Silo: 20,0891626094316
Auftrag: 20	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,322214232193	Ankunftszeit am Silo: 20,5997922185753

## Ankunftszeiten von Transportfahrzeug 5 in [h]

Auftrag: 1	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 17,3724444	Ankunftszeit am Silo: 18,3027711268546
Auftrag: 10	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 18,514293114566	Ankunftszeit am Silo: 19,1544083069332
Auftrag: 15	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,3849053987398	Ankunftszeit am Silo: 19,6813866323042
Auftrag: 17	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,9292542370793	Ankunftszeit am Silo: 20,2292817297011
Auftrag: 25	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,4697583882148	Ankunftszeit am Silo: 20,759030541956

Tabelle 44: Kapazitäten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 2)

Transportfahrzeug 1, Kapazität in [t]: 10,51

Auftrag: 2	Beladung am Feldhäcksler: 10,51	Entladung am Silo: 10,51
Auftrag: 7	Beladung am Feldhäcksler: 10,51	Entladung am Silo: 10,51
Auftrag: 12	Beladung am Feldhäcksler: 10,51	Entladung am Silo: 10,51
Auftrag: 13	Beladung am Feldhäcksler: 10,51	Entladung am Silo: 10,51
Auftrag: 22	Beladung am Feldhäcksler: 10,51	Entladung am Silo: 10,51
Auftrag: 27	Beladung am Feldhäcksler: 10,51	Entladung am Silo: 10,51

Transportfahrzeug 2, Kapazität in [t]: 11,49

Auftrag: 3	Beladung am Feldhäcksler: 11,49	Entladung am Silo: 11,49
Auftrag: 5	Beladung am Feldhäcksler: 11,49	Entladung am Silo: 11,49
Auftrag: 8	Beladung am Feldhäcksler: 11,49	Entladung am Silo: 11,49
Auftrag: 18	Beladung am Feldhäcksler: 11,49	Entladung am Silo: 11,49
Auftrag: 23	Beladung am Feldhäcksler: 11,49	Entladung am Silo: 11,49
Auftrag: 24	Beladung am Feldhäcksler: 11,49	Entladung am Silo: 11,49

Transportfahrzeug 3, Kapazität in [t]: 12,03

Auftrag: 6	Beladung am Feldhäcksler: 12,03	Entladung am Silo: 12,03
Auftrag: 11	Beladung am Feldhäcksler: 12,03	Entladung am Silo: 12,03
Auftrag: 16	Beladung am Feldhäcksler: 12,03	Entladung am Silo: 12,03
Auftrag: 21	Beladung am Feldhäcksler: 12,03	Entladung am Silo: 12,03
Auftrag: 26	Beladung am Feldhäcksler: 12,03	Entladung am Silo: 12,03

Transportfahrzeug 4, Kapazität in [t]: 12,36

Auftrag: 4	Beladung am Feldhäcksler: 12,36	Entladung am Silo: 12,36
Auftrag: 9	Beladung am Feldhäcksler: 12,36	Entladung am Silo: 12,36
Auftrag: 14	Beladung am Feldhäcksler: 12,36	Entladung am Silo: 12,36
Auftrag: 19	Beladung am Feldhäcksler: 12,36	Entladung am Silo: 12,36
Auftrag: 20	Beladung am Feldhäcksler: 12,36	Entladung am Silo: 12,36

Transportfahrzeug 5, Kapazität in [t]: 14,41

Auftrag: 1	Beladung am Feldhäcksler: 14,41	Entladung am Silo: 14,41
Auftrag: 10	Beladung am Feldhäcksler: 14,41	Entladung am Silo: 14,41
Auftrag: 15	Beladung am Feldhäcksler: 14,41	Entladung am Silo: 14,41
Auftrag: 17	Beladung am Feldhäcksler: 14,41	Entladung am Silo: 14,41
Auftrag: 25	Beladung am Feldhäcksler: 14,41	Entladung am Silo: 14,41

Tabelle 45: Servicebeginnzeiten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 2)

## Servicebeginnzeiten von Transportfahrzeug 1 in [h]

Auftrag: 2	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,1146823563333 Servicebeginnzeit am Silo: 18,3548879397497
Auftrag: 7	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,5809049784408 Servicebeginnzeit am Silo: 18,8445941864341
Auftrag: 12	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,077388418205 Servicebeginnzeit am Silo: 19,3388884503957
Auftrag: 13	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,597879243393 Servicebeginnzeit am Silo: 19,8529110182093
Auftrag: 22	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,1422280817324 Servicebeginnzeit am Silo: 20,405372949624
Auftrag: 27	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,6827322328679 Servicebeginnzeit am Silo: 20,9182916468528

## Servicebeginnzeiten von Transportfahrzeug 2 in [h]

Auftrag: 3	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,1993402650816 Servicebeginnzeit am Silo: 18,4784127045097
Auftrag: 5	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,6655628871891 Servicebeginnzeit am Silo: 18,9427490258052
Auftrag: 8	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,1620463269533 Servicebeginnzeit am Silo: 19,4265432243496
Auftrag: 18	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,7301892338329 Servicebeginnzeit am Silo: 20,0053152547152
Auftrag: 23	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,2296624366157 Servicebeginnzeit am Silo: 20,5024238178137
Auftrag: 24	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,774696059346 Servicebeginnzeit am Silo: 21,0350529297879

## Servicebeginnzeiten von Transportfahrzeug 3 in [h]

Auftrag: 6	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,484003490121 Servicebeginnzeit am Silo: 18,7338905167842
Auftrag: 11	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,9804869298851 Servicebeginnzeit am Silo: 19,2484912722892
Auftrag: 16	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,5009777550731 Servicebeginnzeit am Silo: 19,7707285814256
Auftrag: 21	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,0453265934125 Servicebeginnzeit am Silo: 20,3047672046882
Auftrag: 26	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,585830744548 Servicebeginnzeit am Silo: 20,8533847804298

## Servicebeginnzeiten von Transportfahrzeug 4 in [h]

Auftrag: 4	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,2918920606589 Servicebeginnzeit am Silo: 18,5414213937981
Auftrag: 9	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,7648549396671 Servicebeginnzeit am Silo: 19,0329906255015
Auftrag: 14	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,2645763110804 Servicebeginnzeit am Silo: 19,5405552825319
Auftrag: 19	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,8227410294102 Servicebeginnzeit am Silo: 20,0891626094316
Auftrag: 20	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,322214232193 Servicebeginnzeit am Silo: 20,5997922185753

## Servicebeginnzeiten von Transportfahrzeug 5 in [h]

Auftrag: 1	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 17,99861
------------	---

Auftrag: 10 Servicebeginnzeit am Silo: 18,3027711268546  
Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,8644145735519  
Servicebeginnzeit am Silo: 19,1544083069332  
Auftrag: 15 Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,3849053987398  
Servicebeginnzeit am Silo: 19,6813866323042  
Auftrag: 17 Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,9292542370793  
Servicebeginnzeit am Silo: 20,2292817297011  
Auftrag: 25 Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,4697583882148  
Servicebeginnzeit am Silo: 20,759030541956

Tabelle 46: Servicezeiten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 2)

## Servicezeiten von Transportfahrzeug 1 in [h]

Auftrag: 2	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0846579087482793	Servicezeit am Silo: 0,0727000062946723
Auftrag: 7	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0846579087482793	Servicezeit am Silo: 0,0727000062946723
Auftrag: 12	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0846579087482793	Servicezeit am Silo: 0,0727000062946723
Auftrag: 13	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0846579087482793	Servicezeit am Silo: 0,0727000062946723
Auftrag: 22	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0846579087482793	Servicezeit am Silo: 0,0727000062946723
Auftrag: 27	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0621410571038723	Servicezeit am Silo: 0,0533636531702635

## Servicezeiten von Transportfahrzeug 2 in [h]

Auftrag: 3	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0925517955773291	Servicezeit am Silo: 0,057838326524284
Auftrag: 5	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0925517955773291	Servicezeit am Silo: 0,057838326524284
Auftrag: 8	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0925517955773291	Servicezeit am Silo: 0,057838326524284
Auftrag: 18	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0925517955773291	Servicezeit am Silo: 0,057838326524284
Auftrag: 23	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0925517955773291	Servicezeit am Silo: 0,057838326524284
Auftrag: 24	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0925517955773291	Servicezeit am Silo: 0,057838326524284

## Servicezeiten von Transportfahrzeug 3 in [h]

Auftrag: 6	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0969014883198667	Servicezeit am Silo: 0,0565242784227142
Auftrag: 11	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0969014883198667	Servicezeit am Silo: 0,0565242784227142
Auftrag: 16	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0969014883198667	Servicezeit am Silo: 0,0565242784227142
Auftrag: 21	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0969014883198667	Servicezeit am Silo: 0,0565242784227142
Auftrag: 26	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0969014883198667	Servicezeit am Silo: 0,0565242784227142

## Servicezeiten von Transportfahrzeug 4 in [h]

Auftrag: 4	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0995596338847509	Servicezeit am Silo: 0,0722144418367007
Auftrag: 9	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0995596338847509	Servicezeit am Silo: 0,0722144418367007
Auftrag: 14	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0995596338847509	Servicezeit am Silo: 0,0722144418367007
Auftrag: 19	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0995596338847509	Servicezeit am Silo: 0,0722144418367007
Auftrag: 20	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0995596338847509	Servicezeit am Silo: 0,0722144418367007

## Servicezeiten von Transportfahrzeug 5 in [h]

Auftrag: 1	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,116072356333273	Servicezeit am Silo: 0,0695482788610878
Auftrag: 10	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,116072356333273	Servicezeit am Silo: 0,0695482788610878
Auftrag: 15	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,116072356333273	Servicezeit am Silo: 0,0695482788610878
Auftrag: 17	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,116072356333273	Servicezeit am Silo: 0,0695482788610878
Auftrag: 25	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,116072356333273	Servicezeit am Silo: 0,0695482788610878

Tabelle 47: Wartezeiten der Transportfahrzeuge am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 2)

## Wartezeiten von Transportfahrzeug 1 in [h]

Auftrag: 2	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 7	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,0359101940531197	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 12	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,0178298144913462	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 13	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 22	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,0661903380398243	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 27	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0

## Wartezeiten von Transportfahrzeug 2 in [h]

Auftrag: 3	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 5	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 8	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 18	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,0656232587890848	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 23	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 24	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0

## Wartezeiten von Transportfahrzeug 3 in [h]

Auftrag: 6	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 11	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,0523272007295503	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 16	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,0198284979765759	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 21	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,0298884507271566	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 26	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,0364873574498219	Wartezeit am Silo: 0

## Wartezeiten von Transportfahrzeug 4 in [h]

Auftrag: 4	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 9	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,0309504153126134	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 14	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,0296252722953056	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 19	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,0488066618552701	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 20	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0

## Wartezeiten von Transportfahrzeug 5 in [h]

Auftrag: 1	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 10	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,35012145898591	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 15	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 17	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 25	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0

Tabelle 48: Wartezeiten des Feldhäckslers (FEGA)

Wartezeiten des Feldhäckslers in [h] bezüglich des optimalen Serviceauftrags

Auftrag: 2	Wartezeit: 0
Auftrag: 7	Wartezeit: 0
Auftrag: 12	Wartezeit: 0,00174025690068902
Auftrag: 13	Wartezeit: 0,437573173340347
Auftrag: 22	Wartezeit: 0,0800857163936648
Auftrag: 27	Wartezeit: 0,172614954189076
Auftrag: 3	Wartezeit: 0
Auftrag: 5	Wartezeit: 0,269111192645475
Auftrag: 8	Wartezeit: 0,491483439764188
Auftrag: 18	Wartezeit: 0,0566194201608248
Auftrag: 23	Wartezeit: 0,0828621625286523
Auftrag: 24	Wartezeit: 0,535343989681639
Auftrag: 6	Wartezeit: 0
Auftrag: 11	Wartezeit: 0,00174025690068902
Auftrag: 16	Wartezeit: 0,0403817860541764
Auftrag: 21	Wartezeit: 0,0800857163936648
Auftrag: 26	Wartezeit: 0,137854522973083
Auftrag: 4	Wartezeit: 0
Auftrag: 9	Wartezeit: 0,00174025690068902
Auftrag: 14	Wartezeit: 0,019612332279479
Auftrag: 19	Wartezeit: 0,0566194201608248
Auftrag: 20	Wartezeit: 0,456532989058879
Auftrag: 1	Wartezeit: 0
Auftrag: 10	Wartezeit: 0,00174025690068902
Auftrag: 15	Wartezeit: 0,0403817860541764
Auftrag: 17	Wartezeit: 0,371756779740497
Auftrag: 25	Wartezeit: 0,137854522973083

Tabelle 49: Feldfahrzeiten vom Schlagrand zum Feldhäcksler und vice versa (Berechnung 3)

Feldfahrzeit zu Auftrag 1 in [h]		
Fahrt zum Feldhäcksler: 0		Fahrt zum Schlagrand: 0,0197051968996748
Feldfahrzeit zu Auftrag 2 in [h]		
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0197051968996748		Fahrt zum Schlagrand: 0,0254457970722808
Feldfahrzeit zu Auftrag 3 in [h]		
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0254457970722808		Fahrt zum Schlagrand: 0,00534494431527682
Feldfahrzeit zu Auftrag 4 in [h]		
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,00534494431527682		Fahrt zum Schlagrand: 0,0263295984356269
Feldfahrzeit zu Auftrag 5 in [h]		
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0263295984356269		Fahrt zum Schlagrand: 0,0276306051861806
Feldfahrzeit zu Auftrag 6 in [h]		
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0276306051861806		Fahrt zum Schlagrand: 0,0144911627946238
Feldfahrzeit zu Auftrag 7 in [h]		
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0144911627946238		Fahrt zum Schlagrand: 0,02243090024027
Feldfahrzeit zu Auftrag 8 in [h]		
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,02243090024027		Fahrt zum Schlagrand: 0,0343380850431033
Feldfahrzeit zu Auftrag 9 in [h]		
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0343380850431033		Fahrt zum Schlagrand: 0,0151080314582816
Feldfahrzeit zu Auftrag 10 in [h]		
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0151080314582816		Fahrt zum Schlagrand: 0,0225506800509819
Feldfahrzeit zu Auftrag 11 in [h]		
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0225506800509819		Fahrt zum Schlagrand: 0,0299455007095838
Feldfahrzeit zu Auftrag 12 in [h]		
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0299455007095838		Fahrt zum Schlagrand: 0,0157607653511991
Feldfahrzeit zu Auftrag 13 in [h]		
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0157607653511991		Fahrt zum Schlagrand: 0,0207425677892811
Feldfahrzeit zu Auftrag 14 in [h]		
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0207425677892811		Fahrt zum Schlagrand: 0,0386707957779834
Feldfahrzeit zu Auftrag 15 in [h]		
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0386707957779834		Fahrt zum Schlagrand: 0,00980024156743769
Feldfahrzeit zu Auftrag 16 in [h]		
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,00980024156743769		Fahrt zum Schlagrand: 0,0144096852353898
Feldfahrzeit zu Auftrag 17 in [h]		
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0144096852353898		Fahrt zum Schlagrand: 0,011486627061838
Feldfahrzeit zu Auftrag 18 in [h]		
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,011486627061838		Fahrt zum Schlagrand: 0,0137628078589088
Feldfahrzeit zu Auftrag 19 in [h]		
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0137628078589088		Fahrt zum Schlagrand: 0,0195850546244312

Tabelle 50: Früheste und späteste optimale Ankunftszeiten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 3)

## Optimale Ankunftszeiten am Schlag und Silo in [h]

Auftrag: 1	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 17,99861 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,00361
Auftrag: 1	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,3076420574034 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,3126420574034
Auftrag: 2	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,1421498605037 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,1471498605037
Auftrag: 2	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,4492588441529 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,4542588441529
Auftrag: 3	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,2700630470806 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,2750630470806
Auftrag: 3	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,547166294638 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,552166294638
Auftrag: 4	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,3879880503227 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,3929880503227
Auftrag: 4	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,6995836130252 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,7045836130252
Auftrag: 5	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,5292725145896 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,5342725145896
Auftrag: 5	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,8462299802795 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,8512299802795
Auftrag: 6	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,6728123750933 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,6778123750933
Auftrag: 6	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,0066033707058 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,0116033707058
Auftrag: 7	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,8329455079112 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,8379455079112
Auftrag: 7	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,1271347113936 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,1321347113936
Auftrag: 8	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,9508705111533 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,9558705111533
Auftrag: 8	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,2704745604633 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,2754745604633
Auftrag: 9	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,0921549754202 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,0971549754202
Auftrag: 9	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,3965898673822 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,4015898673822
Auftrag: 10	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,235694835924 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,240694835924
Auftrag: 10	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,5399087025518 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,5449087025518
Auftrag: 11	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,3636080225008 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,3686080225008
Auftrag: 11	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,821593623912
Auftrag: 13	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,6416661585608 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,6466661585608
Auftrag: 13	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,9517355868538 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,9567355868538
Auftrag: 14	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,7852060190645 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,7902060190645
Auftrag: 14	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,1055400014194 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,1105400014194
Auftrag: 15	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,9131192056414 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,9181192056414
Auftrag: 15	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,194677750451 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,199677750451
Auftrag: 16	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,0310442088835 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,0360442088835
Auftrag: 16	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,3307198583858 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,3357198583858
Auftrag: 17	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,1723286731504

Optimale Ankunftszeiten am Schlag und Silo in [h]

Auftrag: 17	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,1773286731504 Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,473142160716
Auftrag: 18	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,478142160716 Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,3158685336541
Auftrag: 18	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,3208685336541 Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,6112945280899
Auftrag: 19	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,6162945280899 Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,474105573697
Auftrag: 19	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,479105573697 Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,8110943683643
Auftrag: 19	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,8160943683643

Tabelle 51: Abfahrtszeiten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 3)

## Abfahrtszeiten von Transportfahrzeug 1 in [h]

Auftrag: 3	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,3879880503227	Abfahrtszeit am Silo: 18,6484344290009
Auftrag: 7	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,9550179786431	Abfahrtszeit am Silo: 19,2325503132462
Auftrag: 11	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,4856804932327	Abfahrtszeit am Silo: 19,7707274283051
Auftrag: 15	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,0357260273253	Abfahrtszeit am Silo: 20,3006277032556

## Abfahrtszeiten von Transportfahrzeug 2 in [h]

Auftrag: 2	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,2700630470806	Abfahrtszeit am Silo: 18,5291955391229
Auftrag: 10	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,3677554899905	Abfahrtszeit am Silo: 19,6239928650116
Auftrag: 14	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,9172666731311	Abfahrtszeit am Silo: 20,1896241638791
Auftrag: 18	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,4484635386727	Abfahrtszeit am Silo: 20,6959130415017

## Abfahrtszeiten von Transportfahrzeug 3 in [h]

Auftrag: 4	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,5292725145896	Abfahrtszeit am Silo: 18,7819972326041
Auftrag: 8	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,0963024429099	Abfahrtszeit am Silo: 19,357035647532
Auftrag: 16	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,1770104915921	Abfahrtszeit am Silo: 20,4178152964064

## Abfahrtszeiten von Transportfahrzeug 4 in [h]

Auftrag: 1	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,1421498605037	Abfahrtszeit am Silo: 18,4117570536437
Auftrag: 5	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,6769598425831	Abfahrtszeit am Silo: 18,9544924440095
Auftrag: 9	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,2398423034137	Abfahrtszeit am Silo: 19,5048523311123
Auftrag: 13	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,7893534865543	Abfahrtszeit am Silo: 20,0599980505839
Auftrag: 17	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,3205503520959	Abfahrtszeit am Silo: 20,581938975398

## Abfahrtszeiten von Transportfahrzeug 5 in [h]

Auftrag: 6	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,8370929754009	Abfahrtszeit am Silo: 19,1066994699623
Auftrag: 12	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,6458136260505	Abfahrtszeit am Silo: 19,9166897231685
Auftrag: 19	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,6370244321816	Abfahrtszeit am Silo: 20,9105887135882

Tabelle 52: Ankunftszeiten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 3)

## Ankunftszeiten von Transportfahrzeug 1 in [h]

Auftrag: 3	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 17,3938485970723	Ankunftszeit am Silo: 18,547166294638
Auftrag: 7	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 18,7754758592853	Ankunftszeit am Silo: 19,1312821788833
Auftrag: 11	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,3635037932972	Ankunftszeit am Silo: 19,6694592939423
Auftrag: 15	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,9178010240831	Ankunftszeit am Silo: 20,1993595688927

## Ankunftszeiten von Transportfahrzeug 2 in [h]

Auftrag: 2	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 17,3980940968997	Ankunftszeit am Silo: 18,4492588441529
Auftrag: 10	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 18,6668399380709	Ankunftszeit am Silo: 19,5440561700415
Auftrag: 14	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,7631243328008	Ankunftszeit am Silo: 20,1096874689091
Auftrag: 18	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,320034041893	Ankunftszeit am Silo: 20,6159763465316

## Ankunftszeiten von Transportfahrzeug 3 in [h]

Auftrag: 4	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 17,3815949443153	Ankunftszeit am Silo: 18,6995836130252
Auftrag: 8	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 18,9248256003341	Ankunftszeit am Silo: 19,2746220279531
Auftrag: 16	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,4836202400514	Ankunftszeit am Silo: 20,3354016768275

## Ankunftszeiten von Transportfahrzeug 4 in [h]

Auftrag: 1	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 17,35533333	Ankunftszeit am Silo: 18,3076420574034
Auftrag: 5	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 18,5334199820793	Ankunftszeit am Silo: 18,8503774477693
Auftrag: 9	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,0883113265424	Ankunftszeit am Silo: 19,400737334872
Auftrag: 13	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,6159464264635	Ankunftszeit am Silo: 19,9558830543436
Auftrag: 17	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,1702754167712	Ankunftszeit am Silo: 20,4778239791577

## Ankunftszeiten von Transportfahrzeug 5 in [h]

Auftrag: 6	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 17,4042224726759	Ankunftszeit am Silo: 19,0107508381956
Auftrag: 12	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,2490893706719	Ankunftszeit am Silo: 19,8207410914017
Auftrag: 19	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,0434312819794	Ankunftszeit am Silo: 20,8157761868061

Tabelle 53: Kapazitäten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 3)

Transportfahrzeug 1, Kapazität in [t]: 14,64

Auftrag: 3	Beladung am Feldhäcksler: 14,64	Entladung am Silo: 14,64
Auftrag: 7	Beladung am Feldhäcksler: 14,64	Entladung am Silo: 14,64
Auftrag: 11	Beladung am Feldhäcksler: 14,64	Entladung am Silo: 14,64
Auftrag: 15	Beladung am Feldhäcksler: 14,64	Entladung am Silo: 14,64

Transportfahrzeug 2, Kapazität in [t]: 15,88

Auftrag: 2	Beladung am Feldhäcksler: 15,88	Entladung am Silo: 15,88
Auftrag: 10	Beladung am Feldhäcksler: 15,88	Entladung am Silo: 15,88
Auftrag: 14	Beladung am Feldhäcksler: 15,88	Entladung am Silo: 15,88
Auftrag: 18	Beladung am Feldhäcksler: 15,88	Entladung am Silo: 15,88

Transportfahrzeug 3, Kapazität in [t]: 17,54

Auftrag: 4	Beladung am Feldhäcksler: 17,54	Entladung am Silo: 17,54
Auftrag: 8	Beladung am Feldhäcksler: 17,54	Entladung am Silo: 17,54
Auftrag: 16	Beladung am Feldhäcksler: 17,54	Entladung am Silo: 17,54

Transportfahrzeug 4, Kapazität in [t]: 17,82

Auftrag: 1	Beladung am Feldhäcksler: 17,82	Entladung am Silo: 17,82
Auftrag: 5	Beladung am Feldhäcksler: 17,82	Entladung am Silo: 17,82
Auftrag: 9	Beladung am Feldhäcksler: 17,82	Entladung am Silo: 17,82
Auftrag: 13	Beladung am Feldhäcksler: 17,82	Entladung am Silo: 17,82
Auftrag: 17	Beladung am Feldhäcksler: 17,82	Entladung am Silo: 17,82

Transportfahrzeug 5, Kapazität in [t]: 19,88

Auftrag: 6	Beladung am Feldhäcksler: 19,88	Entladung am Silo: 19,88
Auftrag: 12	Beladung am Feldhäcksler: 19,88	Entladung am Silo: 19,88
Auftrag: 19	Beladung am Feldhäcksler: 19,88	Entladung am Silo: 19,88

Tabelle 54: Servicebeginnzeiten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 3)

## Servicebeginnzeiten von Transportfahrzeug 1 in [h]

Auftrag: 3	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,2700630470806 Servicebeginnzeit am Silo: 18,547166294638
Auftrag: 7	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,8370929754009 Servicebeginnzeit am Silo: 19,1312821788833
Auftrag: 11	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,3677554899905 Servicebeginnzeit am Silo: 19,6694592939423
Auftrag: 15	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,9178010240831 Servicebeginnzeit am Silo: 20,1993595688927

## Servicebeginnzeiten von Transportfahrzeug 2 in [h]

Auftrag: 2	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,1421498605037 Servicebeginnzeit am Silo: 18,4492588441529
Auftrag: 10	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,2398423034137 Servicebeginnzeit am Silo: 19,5440561700415
Auftrag: 14	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,7893534865543 Servicebeginnzeit am Silo: 20,1096874689091
Auftrag: 18	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,3205503520959 Servicebeginnzeit am Silo: 20,6159763465316

## Servicebeginnzeiten von Transportfahrzeug 3 in [h]

Auftrag: 4	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,3879880503227 Servicebeginnzeit am Silo: 18,6995836130252
Auftrag: 8	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,9550179786431 Servicebeginnzeit am Silo: 19,2746220279531
Auftrag: 16	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,0357260273253 Servicebeginnzeit am Silo: 20,3354016768275

## Servicebeginnzeiten von Transportfahrzeug 4 in [h]

Auftrag: 1	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 17,99861 Servicebeginnzeit am Silo: 18,3076420574034
Auftrag: 5	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,5334199820793 Servicebeginnzeit am Silo: 18,8503774477693
Auftrag: 9	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,0963024429099 Servicebeginnzeit am Silo: 19,400737334872
Auftrag: 13	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,6458136260505 Servicebeginnzeit am Silo: 19,9558830543436
Auftrag: 17	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,1770104915921 Servicebeginnzeit am Silo: 20,4778239791577

## Servicebeginnzeiten von Transportfahrzeug 5 in [h]

Auftrag: 6	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,6769598425831 Servicebeginnzeit am Silo: 19,0107508381956
Auftrag: 12	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,4856804932327 Servicebeginnzeit am Silo: 19,8207410914017
Auftrag: 19	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,4787873921388 Servicebeginnzeit am Silo: 20,8157761868061

Tabelle 55: Servicezeiten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 3)

## Servicezeiten von Transportfahrzeug 1 in [h]

Auftrag: 3	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,117925003242132	Servicezeit am Silo: 0,101268134362893
Auftrag: 7	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,117925003242132	Servicezeit am Silo: 0,101268134362893
Auftrag: 11	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,117925003242132	Servicezeit am Silo: 0,101268134362893
Auftrag: 15	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,117925003242132	Servicezeit am Silo: 0,101268134362893

## Servicezeiten von Transportfahrzeug 2 in [h]

Auftrag: 2	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,127913186576848	Servicezeit am Silo: 0,0799366949700288
Auftrag: 10	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,127913186576848	Servicezeit am Silo: 0,0799366949700288
Auftrag: 14	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,127913186576848	Servicezeit am Silo: 0,0799366949700288
Auftrag: 18	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,127913186576848	Servicezeit am Silo: 0,0799366949700288

## Servicezeiten von Transportfahrzeug 3 in [h]

Auftrag: 4	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,141284464266871	Servicezeit am Silo: 0,08241361957892
Auftrag: 8	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,141284464266871	Servicezeit am Silo: 0,08241361957892
Auftrag: 16	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,141284464266871	Servicezeit am Silo: 0,08241361957892

## Servicezeiten von Transportfahrzeug 4 in [h]

Auftrag: 1	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,143539860503743	Servicezeit am Silo: 0,104114996240292
Auftrag: 5	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,143539860503743	Servicezeit am Silo: 0,104114996240292
Auftrag: 9	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,143539860503743	Servicezeit am Silo: 0,104114996240292
Auftrag: 13	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,143539860503743	Servicezeit am Silo: 0,104114996240292
Auftrag: 17	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,143539860503743	Servicezeit am Silo: 0,104114996240292

## Servicezeiten von Transportfahrzeug 5 in [h]

Auftrag: 6	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,160133132817868	Servicezeit am Silo: 0,0959486317667193
Auftrag: 12	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,160133132817868	Servicezeit am Silo: 0,0959486317667193
Auftrag: 19	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,158237040042877	Servicezeit am Silo: 0,0948125267821043

Tabelle 56: Wartezeiten der Transportfahrzeuge am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 3)

## Wartezeiten von Transportfahrzeug 1 in [h]

Auftrag: 2	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 6	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,0120473942127788	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 11	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,186487739325582	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 16	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,152159962658605	Wartezeit am Silo: 0

## Wartezeiten von Transportfahrzeug 2 in [h]

Auftrag: 3	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 8	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,181517399830515	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 13	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,166708443454567	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 18	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,168900608067464	Wartezeit am Silo: 0

## Wartezeiten von Transportfahrzeug 3 in [h]

Auftrag: 1	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 5	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,0221025616952168	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 10	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,158991925485793	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 15	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,146375361608548	Wartezeit am Silo: 0

## Wartezeiten von Transportfahrzeug 4 in [h]

Auftrag: 7	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 12	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,144076095003726	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 17	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,176558061730876	Wartezeit am Silo: 0

## Wartezeiten von Transportfahrzeug 5 in [h]

Auftrag: 4	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 9	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,113246681305018	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 14	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,120927408128196	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 19	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,12166667882185	Wartezeit am Silo: 0

Tabelle 57: Wartezeiten des Feldhäckslers (Berechnung 3)

Wartezeiten des Feldhäckslers in [h] bezüglich des optimalen Serviceauftrags

Auftrag: 2	Wartezeit: 0
Auftrag: 7	Wartezeit: 0
Auftrag: 12	Wartezeit: 0,00174025690068902
Auftrag: 13	Wartezeit: 0,437573173340347
Auftrag: 22	Wartezeit: 0,0800857163936648
Auftrag: 27	Wartezeit: 0,172614954189076
Auftrag: 3	Wartezeit: 0
Auftrag: 5	Wartezeit: 0,269111192645475
Auftrag: 8	Wartezeit: 0,491483439764188
Auftrag: 18	Wartezeit: 0,0566194201608248
Auftrag: 23	Wartezeit: 0,0828621625286523
Auftrag: 24	Wartezeit: 0,535343989681639
Auftrag: 6	Wartezeit: 0
Auftrag: 11	Wartezeit: 0,00174025690068902
Auftrag: 16	Wartezeit: 0,0403817860541764
Auftrag: 21	Wartezeit: 0,0800857163936648
Auftrag: 26	Wartezeit: 0,137854522973083
Auftrag: 4	Wartezeit: 0
Auftrag: 9	Wartezeit: 0,00174025690068902
Auftrag: 14	Wartezeit: 0,019612332279479
Auftrag: 19	Wartezeit: 0,0566194201608248
Auftrag: 20	Wartezeit: 0,456532989058879
Auftrag: 1	Wartezeit: 0
Auftrag: 10	Wartezeit: 0,00174025690068902
Auftrag: 15	Wartezeit: 0,0403817860541764
Auftrag: 17	Wartezeit: 0,371756779740497
Auftrag: 25	Wartezeit: 0,137854522973083

### 10.3 Differential Evolution:

**Berechnung 1: (9.43 t, 10.31 t, 10.36 t, 12.03 t, 13.03 t),**

**Berechnung 2: (10.51 t, 11.49 t, 12.03 t, 12.36 t, 14.41 t),**

**Berechnung 3: (14.64 t, 15.88 t, 17.54 t, 17.82 t, 19.88 t)**

Tabelle 58: Feldfahrzeiten vom Schlagrand zum Feldhäcksler und vice versa (Berechnung 1)

Feldfahrzeit zu Auftrag 1 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0329502018772128
Fahrt zum Feldhäcksler: 0		
Feldfahrzeit zu Auftrag 2 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,00735566740486475
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0329502018772128		
Feldfahrzeit zu Auftrag 3 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0203670564461595
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,00735566740486475		
Feldfahrzeit zu Auftrag 4 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0221191137275752
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0203670564461595		
Feldfahrzeit zu Auftrag 5 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0170995760386837
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0221191137275752		
Feldfahrzeit zu Auftrag 6 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,022799616925401
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0170995760386837		
Feldfahrzeit zu Auftrag 7 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0108699502513334
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,022799616925401		
Feldfahrzeit zu Auftrag 8 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0355693140301317
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0108699502513334		
Feldfahrzeit zu Auftrag 9 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,00769435283950439
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0355693140301317		
Feldfahrzeit zu Auftrag 10 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0253757229337351
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,00769435283950439		
Feldfahrzeit zu Auftrag 11 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0159088134223718
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0253757229337351		
Feldfahrzeit zu Auftrag 12 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0259564061279345
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0159088134223718		
Feldfahrzeit zu Auftrag 13 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0245710970357715
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0259564061279345		
Feldfahrzeit zu Auftrag 14 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0217787775281418
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0245710970357715		
Feldfahrzeit zu Auftrag 15 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,033308204102053
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0217787775281418		
Feldfahrzeit zu Auftrag 16 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,00749254787233563
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,033308204102053		
Feldfahrzeit zu Auftrag 17 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,03298625813608
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,00749254787233563		
Feldfahrzeit zu Auftrag 18 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0171345687096332
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,03298625813608		
Feldfahrzeit zu Auftrag 19 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0254479427881435
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0171345687096332		
Feldfahrzeit zu Auftrag 20 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,024013071332445
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0254479427881435		
Feldfahrzeit zu Auftrag 21 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,020488417815281
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,024013071332445		
Feldfahrzeit zu Auftrag 22 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0337206479126736
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,020488417815281		
Feldfahrzeit zu Auftrag 23 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0125626007584412
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0337206479126736		
Feldfahrzeit zu Auftrag 24 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0238481962872343
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0125626007584412		
Feldfahrzeit zu Auftrag 25 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,028713800459554
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0238481962872343		
Feldfahrzeit zu Auftrag 26 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0131279817114207
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,028713800459554		
Feldfahrzeit zu Auftrag 27 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0187009979195387
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0131279817114207		
Feldfahrzeit zu Auftrag 28 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0329316760258425
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0187009979195387		
Feldfahrzeit zu Auftrag 29 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0195850580018552
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0329316760258425		

Tabelle 59: Früheste und späteste optimale Ankunftszeiten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 1)

## Optimale Ankunftszeiten am Schlag und Silo in [h]

Auftrag: 1	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 17,99861 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,00361
Auftrag: 1	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,2742164702508 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,2792164702508
Auftrag: 2	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,0954792683736 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,1004792683736
Auftrag: 2	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,3302902615024 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,3352902615024
Auftrag: 3	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,1789530940975 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,1839530940975
Auftrag: 3	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,42912808378 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,43412808378
Auftrag: 4	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,2549277273339 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,2599277273339
Auftrag: 4	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,5138679174574 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,5188679174574
Auftrag: 5	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,3379988037298 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,3429988037298
Auftrag: 5	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,6191893347023 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,6241893347023
Auftrag: 6	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,4429230586637 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,4479230586637
Auftrag: 6	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,7083789439627 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,7133789439627
Auftrag: 7	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,5397923270373 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,5447923270373
Auftrag: 7	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,7874833536845 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,7924833536845
Auftrag: 8	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,6228634034332 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,6278634034332
Auftrag: 8	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,8858880431873 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,8908880431873
Auftrag: 9	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,7063372291571 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,7113372291571
Auftrag: 9	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,9508526583925 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,9558526583925
Auftrag: 10	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,789408305553 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,794408305553
Auftrag: 10	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,0445919617231 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,0495919617231
Auftrag: 11	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,8653829387894 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,8703829387894
Auftrag: 11	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,1453827071456 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,1503827071456
Auftrag: 12	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,9703071937232 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,9753071937232
Auftrag: 12	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,2389198682248 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,2439198682248
Auftrag: 13	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,0671764620969 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,0721764620969
Auftrag: 13	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,3192028848566 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,3242028848566
Auftrag: 14	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,1506502878208 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,1556502878208
Auftrag: 14	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,4365200202828 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,4415200202828
Auftrag: 15	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,2555745427547 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,2605745427547
Auftrag: 15	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,518690680093 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,523690680093

## Optimale Ankunftszeiten am Schlag und Silo in [h]

Auftrag: 16	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,331549175991
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,336549175991
Auftrag: 16	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,5758628002592
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,5808628002592
Auftrag: 17	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,4146202523869
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,4196202523869
Auftrag: 17	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,6774144437593
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,6824144437593
Auftrag: 18	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,4905948856232
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,4955948856232
Auftrag: 18	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,7503857227065
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,7553857227065
Auftrag: 19	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,5874641539969
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,5924641539969
Auftrag: 19	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,8497331731809
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,8547331731809
Auftrag: 20	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,6705352303928
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,6755352303928
Auftrag: 20	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,9586392566591
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,9636392566591
Auftrag: 21	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,7754594853266
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,7804594853266
Auftrag: 21	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,0234032288658
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,0284032288658
Auftrag: 22	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,8589333110506
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,8639333110506
Auftrag: 22	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,1353102273369
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,1403102273369
Auftrag: 23	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,9558025794242
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,9608025794242
Auftrag: 23	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,1958205059066
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,2008205059066
Auftrag: 24	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,0392764051481
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,0442764051481
Auftrag: 24	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,3272155563692
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,3322155563692
Auftrag: 25	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,144200660082
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,149200660082
Auftrag: 25	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,4155707289152
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,4205707289152
Auftrag: 26	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,2410699284556
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,2460699284556
Auftrag: 26	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,4910189865629
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,4960189865629
Auftrag: 27	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,3241410048515
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,3291410048515
Auftrag: 27	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,6069329577049
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,6119329577049
Auftrag: 28	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,4290652597854
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,4340652597854
Auftrag: 28	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,6894522615352
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,6944522615352
Auftrag: 29	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,5185449446151
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,5235449446151
Auftrag: 29	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,7733966874467
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,7783966874467

Tabelle 60: Abfahrtszeiten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 1)

## Abfahrtszeiten von Transportfahrzeug 1 in [h]

Auftrag: 3	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,2549277273339	Abfahrtszeit am Silo: 18,4943713244433
Auftrag: 10	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,8660156915733	Abfahrtszeit am Silo: 19,110467955170
Auftrag: 15	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,3321819287749	Abfahrtszeit am Silo: 19,5845666735403
Auftrag: 17	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,776436654649	Abfahrtszeit am Silo: 20,0284994534483

## Abfahrtszeiten von Transportfahrzeug 2 in [h]

Auftrag: 4	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,3379988037298	Abfahrtszeit am Silo: 18,5657814650157
Auftrag: 7	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,790041058337	Abfahrtszeit am Silo: 19,0065745561466
Auftrag: 9	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,2442365993566	Abfahrtszeit am Silo: 19,4575944997544
Auftrag: 16	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,6923626802524	Abfahrtszeit am Silo: 19,905518775683
Auftrag: 19	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,1518448168084	Abfahrtszeit am Silo: 20,3829563071548
Auftrag: 26	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,6236393659453	Abfahrtszeit am Silo: 20,842430895215

## Abfahrtszeiten von Transportfahrzeug 3 in [h]

Auftrag: 2	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,1789530940975	Abfahrtszeit am Silo: 18,3789819570381
Auftrag: 8	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,7063372291571	Abfahrtszeit am Silo: 18,934579738723
Auftrag: 13	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,1608927233588	Abfahrtszeit am Silo: 19,3781370159302
Auftrag: 21	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,8599104803729	Abfahrtszeit am Silo: 20,0730720937239
Auftrag: 23	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,3339036468419	Abfahrtszeit am Silo: 20,539139443136
Auftrag: 28	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,7680735487145	Abfahrtszeit am Silo: 20,9936784202761

## Abfahrtszeiten von Transportfahrzeug 4 in [h]

Auftrag: 1	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,0954792683736	Abfahrtszeit am Silo: 18,3444794862321
Auftrag: 6	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,5537816606444	Abfahrtszeit am Silo: 18,792631293551
Auftrag: 12	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,0678092148808	Abfahrtszeit am Silo: 19,30981563699
Auftrag: 18	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,5880969067808	Abfahrtszeit am Silo: 19,8212814914717
Auftrag: 22	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,0617040036804	Abfahrtszeit am Silo: 20,3114746675743
Auftrag: 25	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,5380347441702	Abfahrtszeit am Silo: 20,782798560611
Auftrag: 29	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 21,0175345306947	Abfahrtszeit am Silo: 21,2478096530321

## Abfahrtszeiten von Transportfahrzeug 5 in [h]

Auftrag: 5	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,4429230586637	Abfahrtszeit am Silo: 18,6820578899032
Auftrag: 11	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,9709399465072	Abfahrtszeit am Silo: 19,2088840151304
Auftrag: 14	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,4508237671001	Abfahrtszeit am Silo: 19,6946377998291
Auftrag: 20	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,9648347353068	Abfahrtszeit am Silo: 20,2108830618401
Auftrag: 24	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,4411654757965	Abfahrtszeit am Silo: 20,6870489272846
Auftrag: 27	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,928054845865	Abfahrtszeit am Silo: 21,1687910989854

Tabelle 61: Ankunftszeiten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 1)

## Ankunftszeiten von Transportfahrzeug 1 in [h]

Auftrag: 3	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 17,3757584674049	Ankunftszeit am Silo: 18,42912808378
Auftrag: 10	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 18,6111012300668	Ankunftszeit am Silo: 19,045224714507
Auftrag: 15	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,2406495326985	Ankunftszeit am Silo: 19,519323432877
Auftrag: 17	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,7004620214126	Ankunftszeit am Silo: 19,963256212785

## Ankunftszeiten von Transportfahrzeug 2 in [h]

Auftrag: 4	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 17,3987559564462	Ankunftszeit am Silo: 18,5138679174574
Auftrag: 7	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 18,7069699819411	Ankunftszeit am Silo: 18,9546610085883
Auftrag: 9	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,1611655229607	Ankunftszeit am Silo: 19,4056809521961
Auftrag: 16	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,6092916038565	Ankunftszeit am Silo: 19,8536052281247
Auftrag: 19	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,0687737404124	Ankunftszeit am Silo: 20,3310427595965
Auftrag: 26	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,5405682895494	Ankunftszeit am Silo: 20,7905173476567

## Ankunftszeiten von Transportfahrzeug 3 in [h]

Auftrag: 2	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 17,4092002018772	Ankunftszeit am Silo: 18,3302902615024
Auftrag: 8	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 18,5061019072895	Ankunftszeit am Silo: 18,8858880431873
Auftrag: 13	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,0774188976348	Ankunftszeit am Silo: 19,3294453203945
Auftrag: 21	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,5187445038011	Ankunftszeit am Silo: 20,0243803981882
Auftrag: 23	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,250429821118	Ankunftszeit am Silo: 20,4904477476003
Auftrag: 28	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,6845997229906	Ankunftszeit am Silo: 20,9449867247404

## Ankunftszeiten von Transportfahrzeug 4 in [h]

Auftrag: 1	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 17,35533333	Ankunftszeit am Silo: 18,2742164702508
Auftrag: 6	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 18,4569123922708	Ankunftszeit am Silo: 18,7223682775698
Auftrag: 12	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 18,9045061897574	Ankunftszeit am Silo: 19,2395526210087
Auftrag: 18	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,4381352251261	Ankunftszeit am Silo: 19,7510184754904
Auftrag: 22	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,9648347353068	Ankunftszeit am Silo: 20,2412116515931
Auftrag: 25	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,4411654757965	Ankunftszeit am Silo: 20,7125355446297
Auftrag: 29	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,928054845865	Ankunftszeit am Silo: 21,1829065886965

## Ankunftszeiten von Transportfahrzeug 5 in [h]

Auftrag: 5	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 17,3945635137276	Ankunftszeit am Silo: 18,6191893347023
Auftrag: 11	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 18,8205107656209	Ankunftszeit am Silo: 19,1460154599296
Auftrag: 14	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,3458995121662	Ankunftszeit am Silo: 19,6317692446282
Auftrag: 20	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,8599104803729	Ankunftszeit am Silo: 20,1480145066392
Auftrag: 24	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,3362412208627	Ankunftszeit am Silo: 20,6241803720838
Auftrag: 27	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,8231305909311	Ankunftszeit am Silo: 21,1059225437845

Tabelle 62: Kapazitäten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 1)

## Transportfahrzeug 1, Kapazität in [t]: 9,432

Auftrag: 3	Beladung am Feldhäcksler: 9,432	Entladung am Silo: 9,432
Auftrag: 10	Beladung am Feldhäcksler: 9,432	Entladung am Silo: 9,432
Auftrag: 15	Beladung am Feldhäcksler: 9,432	Entladung am Silo: 9,432
Auftrag: 17	Beladung am Feldhäcksler: 9,432	Entladung am Silo: 9,432

## Transportfahrzeug 2, Kapazität in [t]: 10,313

Auftrag: 4	Beladung am Feldhäcksler: 10,313	Entladung am Silo: 10,313
Auftrag: 7	Beladung am Feldhäcksler: 10,313	Entladung am Silo: 10,313
Auftrag: 9	Beladung am Feldhäcksler: 10,313	Entladung am Silo: 10,313
Auftrag: 16	Beladung am Feldhäcksler: 10,313	Entladung am Silo: 10,313
Auftrag: 19	Beladung am Feldhäcksler: 10,313	Entladung am Silo: 10,313
Auftrag: 26	Beladung am Feldhäcksler: 10,313	Entladung am Silo: 10,313

## Transportfahrzeug 3, Kapazität in [t]: 10,363

Auftrag: 2	Beladung am Feldhäcksler: 10,363	Entladung am Silo: 10,363
Auftrag: 8	Beladung am Feldhäcksler: 10,363	Entladung am Silo: 10,363
Auftrag: 13	Beladung am Feldhäcksler: 10,363	Entladung am Silo: 10,363
Auftrag: 21	Beladung am Feldhäcksler: 10,363	Entladung am Silo: 10,363
Auftrag: 23	Beladung am Feldhäcksler: 10,363	Entladung am Silo: 10,363
Auftrag: 28	Beladung am Feldhäcksler: 10,363	Entladung am Silo: 10,363

## Transportfahrzeug 4, Kapazität in [t]: 12,026

Auftrag: 1	Beladung am Feldhäcksler: 12,026	Entladung am Silo: 12,026
Auftrag: 6	Beladung am Feldhäcksler: 12,026	Entladung am Silo: 12,026
Auftrag: 12	Beladung am Feldhäcksler: 12,026	Entladung am Silo: 12,026
Auftrag: 18	Beladung am Feldhäcksler: 12,026	Entladung am Silo: 12,026
Auftrag: 22	Beladung am Feldhäcksler: 12,026	Entladung am Silo: 12,026
Auftrag: 25	Beladung am Feldhäcksler: 12,026	Entladung am Silo: 12,026
Auftrag: 29	Beladung am Feldhäcksler: 12,026	Entladung am Silo: 12,026

## Transportfahrzeug 5, Kapazität in [t]: 13,026

Auftrag: 5	Beladung am Feldhäcksler: 13,026	Entladung am Silo: 13,026
Auftrag: 11	Beladung am Feldhäcksler: 13,026	Entladung am Silo: 13,026
Auftrag: 14	Beladung am Feldhäcksler: 13,026	Entladung am Silo: 13,026
Auftrag: 20	Beladung am Feldhäcksler: 13,026	Entladung am Silo: 13,026
Auftrag: 24	Beladung am Feldhäcksler: 13,026	Entladung am Silo: 13,026
Auftrag: 27	Beladung am Feldhäcksler: 13,026	Entladung am Silo: 13,026

Tabelle 63: Servicebeginnzeiten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 1)

## Servicebeginnzeiten von Transportfahrzeug 1 in [h]

Auftrag: 3	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,1789530940975 Servicebeginnzeit am Silo: 18,42912808378
Auftrag: 10	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,790041058337 Servicebeginnzeit am Silo: 19,045224714507
Auftrag: 15	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,2562072955386 Servicebeginnzeit am Silo: 19,519323432877
Auftrag: 17	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,7004620214126 Servicebeginnzeit am Silo: 19,963256212785

## Servicebeginnzeiten von Transportfahrzeug 2 in [h]

Auftrag: 4	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,2549277273339 Servicebeginnzeit am Silo: 18,5138679174574
Auftrag: 7	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,7069699819411 Servicebeginnzeit am Silo: 18,9546610085883
Auftrag: 9	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,1611655229607 Servicebeginnzeit am Silo: 19,4056809521961
Auftrag: 16	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,6092916038565 Servicebeginnzeit am Silo: 19,8536052281247
Auftrag: 19	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,0687737404124 Servicebeginnzeit am Silo: 20,3310427595965
Auftrag: 26	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,5405682895494 Servicebeginnzeit am Silo: 20,7905173476567

## Servicebeginnzeiten von Transportfahrzeug 3 in [h]

Auftrag: 2	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,0954792683736 Servicebeginnzeit am Silo: 18,3302902615024
Auftrag: 8	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,6228634034332 Servicebeginnzeit am Silo: 18,8858880431873
Auftrag: 13	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,0774188976348 Servicebeginnzeit am Silo: 19,3294453203945
Auftrag: 21	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,776436654649 Servicebeginnzeit am Silo: 20,0243803981882
Auftrag: 23	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,250429821118 Servicebeginnzeit am Silo: 20,4904477476003
Auftrag: 28	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,6845997229906 Servicebeginnzeit am Silo: 20,9449867247404

## Servicebeginnzeiten von Transportfahrzeug 4 in [h]

Auftrag: 1	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 17,99861 Servicebeginnzeit am Silo: 18,2742164702508
Auftrag: 6	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,4569123922708 Servicebeginnzeit am Silo: 18,7223682775698
Auftrag: 12	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,9709399465072 Servicebeginnzeit am Silo: 19,2395526210087
Auftrag: 18	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,4912276384072 Servicebeginnzeit am Silo: 19,7510184754904
Auftrag: 22	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,9648347353068 Servicebeginnzeit am Silo: 20,2412116515931
Auftrag: 25	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,4411654757965 Servicebeginnzeit am Silo: 20,7125355446297
Auftrag: 29	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,928054845865 Servicebeginnzeit am Silo: 21,1829065886965

## Servicebeginnzeiten von Transportfahrzeug 5 in [h]

Auftrag: 5	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,3379988037298 Servicebeginnzeit am Silo: 18,6191893347023
Auftrag: 11	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,8660156915733 Servicebeginnzeit am Silo: 19,1460154599296
Auftrag: 14	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,3458995121662 Servicebeginnzeit am Silo: 19,6317692446282
Auftrag: 20	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,8599104803729 Servicebeginnzeit am Silo: 20,1480145066392
Auftrag: 24	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,3362412208627 Servicebeginnzeit am Silo: 20,6241803720838
Auftrag: 27	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,8231305909311 Servicebeginnzeit am Silo: 21,1059225437845

Tabelle 64: Servicezeiten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 1)

## Servicezeiten von Transportfahrzeug 1 in [h]

Auftrag: 3	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0759746332363244	Servicezeit am Silo: 0,0652432406633063
Auftrag: 10	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0759746332363244	Servicezeit am Silo: 0,0652432406633063
Auftrag: 15	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0759746332363244	Servicezeit am Silo: 0,0652432406633063
Auftrag: 17	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0759746332363244	Servicezeit am Silo: 0,0652432406633063

## Servicezeiten von Transportfahrzeug 2 in [h]

Auftrag: 4	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,083071076395909	Servicezeit am Silo: 0,0519135475583065
Auftrag: 7	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,083071076395909	Servicezeit am Silo: 0,0519135475583065
Auftrag: 9	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,083071076395909	Servicezeit am Silo: 0,0519135475583065
Auftrag: 16	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,083071076395909	Servicezeit am Silo: 0,0519135475583065
Auftrag: 19	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,083071076395909	Servicezeit am Silo: 0,0519135475583065
Auftrag: 26	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,083071076395909	Servicezeit am Silo: 0,0519135475583065

## Servicezeiten von Transportfahrzeug 3 in [h]

Auftrag: 2	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0834738257239218	Servicezeit am Silo: 0,0486916955357097
Auftrag: 8	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0834738257239218	Servicezeit am Silo: 0,0486916955357097
Auftrag: 13	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0834738257239218	Servicezeit am Silo: 0,0486916955357097
Auftrag: 21	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0834738257239218	Servicezeit am Silo: 0,0486916955357097
Auftrag: 23	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0834738257239218	Servicezeit am Silo: 0,0486916955357097
Auftrag: 28	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0834738257239218	Servicezeit am Silo: 0,0486916955357097

## Servicezeiten von Transportfahrzeug 4 in [h]

Auftrag: 1	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0968692683736257	Servicezeit am Silo: 0,0702630159812429
Auftrag: 6	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0968692683736257	Servicezeit am Silo: 0,0702630159812429
Auftrag: 12	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0968692683736257	Servicezeit am Silo: 0,0702630159812429
Auftrag: 18	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0968692683736257	Servicezeit am Silo: 0,0702630159812429
Auftrag: 22	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0968692683736257	Servicezeit am Silo: 0,0702630159812429
Auftrag: 25	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0968692683736257	Servicezeit am Silo: 0,0702630159812429
Auftrag: 29	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0894796848297119	Servicezeit am Silo: 0,0649030643355617

## Servicezeiten von Transportfahrzeug 5 in [h]

Auftrag: 5	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,104924254933881	Servicezeit am Silo: 0,0628685552008695
Auftrag: 11	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,104924254933881	Servicezeit am Silo: 0,0628685552008695
Auftrag: 14	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,104924254933881	Servicezeit am Silo: 0,0628685552008695
Auftrag: 20	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,104924254933881	Servicezeit am Silo: 0,0628685552008695
Auftrag: 24	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,104924254933881	Servicezeit am Silo: 0,0628685552008695
Auftrag: 27	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,104924254933881	Servicezeit am Silo: 0,0628685552008695

Tabelle 65: Wartezeiten der Transportfahrzeuge am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 1)

## Wartezeiten von Transportfahrzeug 1 in [h]

Auftrag: 3	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 10	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,178939828270188	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 15	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,0155577628401247	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 17	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0

## Wartezeiten von Transportfahrzeug 2 in [h]

Auftrag: 4	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 7	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 9	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 16	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 19	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 26	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0

## Wartezeiten von Transportfahrzeug 3 in [h]

Auftrag: 2	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 8	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,116761496143745	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 13	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 21	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,257692150847902	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 23	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 28	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0

## Wartezeiten von Transportfahrzeug 4 in [h]

Auftrag: 1	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 6	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 12	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,0664337567498237	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 18	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,053092413281103	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 22	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 25	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 29	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0

## Wartezeiten von Transportfahrzeug 5 in [h]

Auftrag: 5	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 11	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,0455049259524039	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 14	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 20	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 24	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 27	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0

Tabelle 66: Wartezeiten des Feldhäckslers (Berechnung 1)

Wartezeiten des Feldhäckslers in [h] bezüglich des optimalen Serviceauftrags

Auftrag: 3	Wartezeit: 0
Auftrag: 10	Wartezeit: 0
Auftrag: 15	Wartezeit: 0
Auftrag: 17	Wartezeit: 0,280841769025731
Auftrag: 4	Wartezeit: 0
Auftrag: 7	Wartezeit: 0,162177654903775
Auftrag: 9	Wartezeit: 0,449828293803566
Auftrag: 16	Wartezeit: 0,27274242786547
Auftrag: 19	Wartezeit: 0,476309586415596
Auftrag: 26	Wartezeit: 0,294498361093751
Auftrag: 2	Wartezeit: 0
Auftrag: 8	Wartezeit: 0
Auftrag: 13	Wartezeit: 0,00524243553797632
Auftrag: 21	Wartezeit: 0
Auftrag: 23	Wartezeit: 0,289627241693783
Auftrag: 28	Wartezeit: 0,250534463205181
Auftrag: 1	Wartezeit: 0
Auftrag: 6	Wartezeit: 0,0089893336071043
Auftrag: 12	Wartezeit: 0
Auftrag: 18	Wartezeit: 0
Auftrag: 22	Wartezeit: 0,100901424256193
Auftrag: 25	Wartezeit: 0,29196481571455
Auftrag: 29	Wartezeit: 0,404509901249831
Auftrag: 5	Wartezeit: 0
Auftrag: 11	Wartezeit: 0
Auftrag: 14	Wartezeit: 0,190249224345408
Auftrag: 20	Wartezeit: 0,184375249980114
Auftrag: 24	Wartezeit: 0,29196481571455
Auftrag: 27	Wartezeit: 0,493989586079543

Tabelle 67: Feldfahrzeiten vom Schlagrand zum Feldhäcksler und vice versa (Berechnung 2)

Feldfahrzeit zu Auftrag 1 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0329610134591737
Fahrt zum Feldhäcksler: 0		
Feldfahrzeit zu Auftrag 2 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,00194717352893679
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0329610134591737		
Feldfahrzeit zu Auftrag 3 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0286892716605435
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,00194717352893679		
Feldfahrzeit zu Auftrag 4 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,00272313568976452
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0286892716605435		
Feldfahrzeit zu Auftrag 5 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0338034701682364
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,00272313568976452		
Feldfahrzeit zu Auftrag 6 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0101933123590202
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0338034701682364		
Feldfahrzeit zu Auftrag 7 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0266575628097018
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0101933123590202		
Feldfahrzeit zu Auftrag 8 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,00884308342284745
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0266575628097018		
Feldfahrzeit zu Auftrag 9 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0312491148339807
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,00884308342284745		
Feldfahrzeit zu Auftrag 10 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,00629461416366334
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0312491148339807		
Feldfahrzeit zu Auftrag 11 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0364733724803761
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,00629461416366334		
Feldfahrzeit zu Auftrag 12 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0110079674658532
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0364733724803761		
Feldfahrzeit zu Auftrag 13 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0285414220446693
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0110079674658532		
Feldfahrzeit zu Auftrag 14 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0186314815901645
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0285414220446693		
Feldfahrzeit zu Auftrag 15 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0268101419409298
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0186314815901645		
Feldfahrzeit zu Auftrag 16 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0168669820561016
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0268101419409298		
Feldfahrzeit zu Auftrag 17 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0288968374336627
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0168669820561016		
Feldfahrzeit zu Auftrag 18 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0273646617403173
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0288968374336627		
Feldfahrzeit zu Auftrag 19 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0201829906248862
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0273646617403173		
Feldfahrzeit zu Auftrag 20 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0340152635211075
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0201829906248862		
Feldfahrzeit zu Auftrag 21 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0176656674439745
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0340152635211075		
Feldfahrzeit zu Auftrag 22 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,015004322243238
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0176656674439745		
Feldfahrzeit zu Auftrag 23 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0318394301031861
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,015004322243238		
Feldfahrzeit zu Auftrag 24 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0234070932607231
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0318394301031861		
Feldfahrzeit zu Auftrag 25 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0125085977017485
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0234070932607231		
Feldfahrzeit zu Auftrag 26 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0252114839972249
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0125085977017485		
Feldfahrzeit zu Auftrag 27 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0195850565744807
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0252114839972249		

Tabelle 68: Früheste und späteste optimale Ankunftszeiten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 2)

## Optimale Ankunftszeiten am Schlag und Silo in [h]

Auftrag: 1	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 17,99861 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,00361
Auftrag: 1	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,272454001779 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,277454001779
Auftrag: 2	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,0955114883199 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,1005114883199
Auftrag: 2	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,3428052957336 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,3478052957336
Auftrag: 3	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,1950711222046 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,2000711222046
Auftrag: 3	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,4622516026134 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,4672516026134
Auftrag: 4	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,2797290309529 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,2847290309529
Auftrag: 4	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,5576912229759 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,5626912229759
Auftrag: 5	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,3958013872862 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,4008013872862
Auftrag: 5	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,6704878457743 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,6754878457743
Auftrag: 6	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,492702875606 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,497702875606
Auftrag: 6	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,7413873967133 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,7463873967133
Auftrag: 7	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,5773607843543 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,5823607843543
Auftrag: 7	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,8503201427413 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,8553201427413
Auftrag: 8	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,6699125799316 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,6749125799316
Auftrag: 8	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,9539947196878 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,9589947196878
Auftrag: 9	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,7859849362649 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,7909849362649
Auftrag: 9	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,0581170394188 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,0631170394188
Auftrag: 10	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,8828864245848 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,8878864245848
Auftrag: 10	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,1644200950817 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,1694200950817
Auftrag: 11	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,9989587809181 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,0039587809181
Auftrag: 11	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,280778782832 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,285778782832
Auftrag: 12	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,0985184148028 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,1035184148028
Auftrag: 12	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,355828177846 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,360828177846
Auftrag: 13	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,1910702103801 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,1960702103801
Auftrag: 13	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,4581028411731 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,4631028411731
Auftrag: 14	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,2757281191284 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,2807281191284
Auftrag: 14	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,5397062346033 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,5447062346033
Auftrag: 15	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,3752877530132 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,3802877530132
Auftrag: 15	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,642980883274 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,647980883274
Auftrag: 16	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,472189241333

## Optimale Ankunftszeiten am Schlag und Silo in [h]

	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,477189241333
Auftrag: 16	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,7642952797224
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,7692952797224
Auftrag: 17	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,5882615976663
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,5932615976663
Auftrag: 17	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,8634602306773
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,8684602306773
Auftrag: 18	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,6808133932436
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,6858133932436
Auftrag: 18	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,9466692637322
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,9516692637322
Auftrag: 19	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,7654713019919
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,7704713019919
Auftrag: 19	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,0319560881941
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,0369560881941
Auftrag: 20	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,8580230975692
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,8630230975692
Auftrag: 20	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,1329213494102
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,1379213494102
Auftrag: 21	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,9549245858891
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,9599245858891
Auftrag: 21	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,2179368872178
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,2229368872178
Auftrag: 22	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,0544842197739
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,0594842197739
Auftrag: 22	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,3447275983504
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,3497275983504
Auftrag: 23	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,1705565761071
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,1755565761071
Auftrag: 23	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,4408872149586
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,4458872149586
Auftrag: 24	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,2552144848554
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,2602144848554
Auftrag: 24	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,5239682120009
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,5289682120009
Auftrag: 25	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,3547741187402
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,3597741187402
Auftrag: 25	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,6081657047618
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,6131657047618
Auftrag: 26	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,45167560706
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,45667560706
Auftrag: 26	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,7231888866346
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,7281888866346
Auftrag: 27	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,5094669705079
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,5144669705079
Auftrag: 27	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,7460100905303
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,7510100905303

Tabelle 69: Abfahrtszeiten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 2)

## Abfahrtszeiten von Transportfahrzeug 1 in [h]

Auftrag: 3	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,2797290309529	Abfahrtszeit am Silo: 18,5349516089081
Auftrag: 6	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,7618157878246	Abfahrtszeit am Silo: 18,9985424064783
Auftrag: 13	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,2779260627554	Abfahrtszeit am Silo: 19,5330007910947
Auftrag: 18	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,7841819680674	Abfahrtszeit am Silo: 20,0380799361024
Auftrag: 23	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,2974457116869	Abfahrtszeit am Silo: 20,5558184480847

## Abfahrtszeiten von Transportfahrzeug 2 in [h]

Auftrag: 7	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,6699125799316	Abfahrtszeit am Silo: 18,9081584692656
Auftrag: 12	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,1932681540071	Abfahrtszeit am Silo: 19,4158644479973
Auftrag: 17	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,6995240593191	Abfahrtszeit am Silo: 19,9400092232771
Auftrag: 19	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,2018351413507	Abfahrtszeit am Silo: 20,4336064584999
Auftrag: 26	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,7079199921298	Abfahrtszeit am Silo: 20,9447198026513

## Abfahrtszeiten von Transportfahrzeug 3 in [h]

Auftrag: 1	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,0955114883199	Abfahrtszeit am Silo: 18,3289782802018
Auftrag: 5	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,5448529042114	Abfahrtszeit am Silo: 18,7791621528023
Auftrag: 9	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,001156724545	Abfahrtszeit am Silo: 19,2329116178017
Auftrag: 15	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,4908999074085	Abfahrtszeit am Silo: 19,7182158277722
Auftrag: 20	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,9971558127206	Abfahrtszeit am Silo: 20,2316768546644
Auftrag: 25	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,51041955634	Abfahrtszeit am Silo: 20,7234339324645

## Abfahrtszeiten von Transportfahrzeug 4 in [h]

Auftrag: 2	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,1950711222046	Abfahrtszeit am Silo: 18,4150197375703
Auftrag: 11	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,1007163584298	Abfahrtszeit am Silo: 19,3551911727469
Auftrag: 14	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,5951382811248	Abfahrtszeit am Silo: 19,8317712045517
Auftrag: 21	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,0967154466053	Abfahrtszeit am Silo: 20,332382555886
Auftrag: 24	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,6099791902248	Abfahrtszeit am Silo: 20,8513877253222

## Abfahrtszeiten von Transportfahrzeug 5 in [h]

Auftrag: 4	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,3958013872862	Abfahrtszeit am Silo: 18,627239501837
Auftrag: 8	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,88241382098	Abfahrtszeit am Silo: 19,1199718832639
Auftrag: 10	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,3939984190887	Abfahrtszeit am Silo: 19,6290080121134
Auftrag: 16	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,9002543244007	Abfahrtszeit am Silo: 20,1458362853179
Auftrag: 22	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,4135180680201	Abfahrtszeit am Silo: 20,6572373691245
Auftrag: 27	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,8941006461563	Abfahrtszeit am Silo: 21,1074798550288

Tabelle 70: Ankunftszeiten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 2)

## Ankunftszeiten von Transportfahrzeug 1 in [h]

Auftrag: 3	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 17,3703499735289	Ankunftszeit am Silo: 18,4622516026134
Auftrag: 6	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 18,6771578790764	Ankunftszeit am Silo: 18,9258424001837
Auftrag: 13	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,1201511175712	Ankunftszeit am Silo: 19,4603007848001
Auftrag: 18	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,6868131509769	Ankunftszeit am Silo: 19,9653799298077
Auftrag: 23	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,1850076191016	Ankunftszeit am Silo: 20,4831184417901

## Ankunftszeiten von Transportfahrzeug 2 in [h]

Auftrag: 7	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 17,388582212359	Ankunftszeit am Silo: 18,8503201427413
Auftrag: 12	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,065218685373	Ankunftszeit am Silo: 19,358026121473
Auftrag: 17	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,5676330525019	Ankunftszeit am Silo: 19,8821708967528
Auftrag: 19	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,1092833457734	Ankunftszeit am Silo: 20,3757681319756
Auftrag: 26	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,6153681965524	Ankunftszeit am Silo: 20,886881476127

## Ankunftszeiten von Transportfahrzeug 3 in [h]

Auftrag: 1	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 17,37625	Ankunftszeit am Silo: 18,272454001779
Auftrag: 5	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 18,4479514158915	Ankunftszeit am Silo: 18,7226378743796
Auftrag: 9	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 18,9042552362252	Ankunftszeit am Silo: 19,176387339379
Auftrag: 15	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,3865037654674	Ankunftszeit am Silo: 19,6616915493495
Auftrag: 20	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,878169379153	Ankunftszeit am Silo: 20,1751525762417
Auftrag: 25	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,3878466703736	Ankunftszeit am Silo: 20,6669096540418

## Ankunftszeiten von Transportfahrzeug 4 in [h]

Auftrag: 2	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 17,3882943434592	Ankunftszeit am Silo: 18,3428052957336
Auftrag: 11	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 18,5188456253609	Ankunftszeit am Silo: 19,2829767309102
Auftrag: 14	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,4955786472401	Ankunftszeit am Silo: 19,759556762715
Auftrag: 21	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,9846403588287	Ankunftszeit am Silo: 20,2601681140493
Auftrag: 24	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,51041955634	Ankunftszeit am Silo: 20,7791732834855

## Ankunftszeiten von Transportfahrzeug 5 in [h]

Auftrag: 4	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 17,4011336716605	Ankunftszeit am Silo: 18,5576912229759
Auftrag: 8	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 18,7663414646467	Ankunftszeit am Silo: 19,0504236044028
Auftrag: 10	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,2779260627554	Ankunftszeit am Silo: 19,5594597332523
Auftrag: 16	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,7841819680674	Ankunftszeit am Silo: 20,0762880064568
Auftrag: 22	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,2974457116869	Ankunftszeit am Silo: 20,5876890902634
Auftrag: 27	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,8363092827084	Ankunftszeit am Silo: 21,0728524027308

Tabelle 71: Kapazitäten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 2)

Transportfahrzeug 1, Kapazität in [t]: 10,51

Auftrag: 3	Beladung am Feldhäcksler: 10,51	Entladung am Silo: 10,51
Auftrag: 6	Beladung am Feldhäcksler: 10,51	Entladung am Silo: 10,51
Auftrag: 13	Beladung am Feldhäcksler: 10,51	Entladung am Silo: 10,51
Auftrag: 18	Beladung am Feldhäcksler: 10,51	Entladung am Silo: 10,51
Auftrag: 23	Beladung am Feldhäcksler: 10,51	Entladung am Silo: 10,51

Transportfahrzeug 2, Kapazität in [t]: 11,49

Auftrag: 7	Beladung am Feldhäcksler: 11,49	Entladung am Silo: 11,49
Auftrag: 12	Beladung am Feldhäcksler: 11,49	Entladung am Silo: 11,49
Auftrag: 17	Beladung am Feldhäcksler: 11,49	Entladung am Silo: 11,49
Auftrag: 19	Beladung am Feldhäcksler: 11,49	Entladung am Silo: 11,49
Auftrag: 26	Beladung am Feldhäcksler: 11,49	Entladung am Silo: 11,49

Transportfahrzeug 3, Kapazität in [t]: 12,03

Auftrag: 1	Beladung am Feldhäcksler: 12,03	Entladung am Silo: 12,03
Auftrag: 5	Beladung am Feldhäcksler: 12,03	Entladung am Silo: 12,03
Auftrag: 9	Beladung am Feldhäcksler: 12,03	Entladung am Silo: 12,03
Auftrag: 15	Beladung am Feldhäcksler: 12,03	Entladung am Silo: 12,03
Auftrag: 20	Beladung am Feldhäcksler: 12,03	Entladung am Silo: 12,03
Auftrag: 25	Beladung am Feldhäcksler: 12,03	Entladung am Silo: 12,03

Transportfahrzeug 4, Kapazität in [t]: 12,36

Auftrag: 2	Beladung am Feldhäcksler: 12,36	Entladung am Silo: 12,36
Auftrag: 11	Beladung am Feldhäcksler: 12,36	Entladung am Silo: 12,36
Auftrag: 14	Beladung am Feldhäcksler: 12,36	Entladung am Silo: 12,36
Auftrag: 21	Beladung am Feldhäcksler: 12,36	Entladung am Silo: 12,36
Auftrag: 24	Beladung am Feldhäcksler: 12,36	Entladung am Silo: 12,36

Transportfahrzeug 5, Kapazität in [t]: 14,41

Auftrag: 4	Beladung am Feldhäcksler: 14,41	Entladung am Silo: 14,41
Auftrag: 8	Beladung am Feldhäcksler: 14,41	Entladung am Silo: 14,41
Auftrag: 10	Beladung am Feldhäcksler: 14,41	Entladung am Silo: 14,41
Auftrag: 16	Beladung am Feldhäcksler: 14,41	Entladung am Silo: 14,41
Auftrag: 22	Beladung am Feldhäcksler: 14,41	Entladung am Silo: 14,41
Auftrag: 27	Beladung am Feldhäcksler: 14,41	Entladung am Silo: 14,41

Tabelle 72: Servicebeginnzeiten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 2)

## Servicebeginnzeiten von Transportfahrzeug 1 in [h]

Auftrag: 3	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,1950711222046 Servicebeginnzeit am Silo: 18,4622516026134
Auftrag: 6	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,6771578790764 Servicebeginnzeit am Silo: 18,9258424001837
Auftrag: 13	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,1932681540071 Servicebeginnzeit am Silo: 19,4603007848001
Auftrag: 18	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,6995240593191 Servicebeginnzeit am Silo: 19,9653799298077
Auftrag: 23	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,2127878029386 Servicebeginnzeit am Silo: 20,4831184417901

## Servicebeginnzeiten von Transportfahrzeug 2 in [h]

Auftrag: 7	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,5773607843543 Servicebeginnzeit am Silo: 18,8503201427413
Auftrag: 12	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,1007163584298 Servicebeginnzeit am Silo: 19,358026121473
Auftrag: 17	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,6069722637418 Servicebeginnzeit am Silo: 19,8821708967528
Auftrag: 19	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,1092833457734 Servicebeginnzeit am Silo: 20,3757681319756
Auftrag: 26	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,6153681965524 Servicebeginnzeit am Silo: 20,886881476127

## Servicebeginnzeiten von Transportfahrzeug 3 in [h]

Auftrag: 1	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 17,99861 Servicebeginnzeit am Silo: 18,272454001779
Auftrag: 5	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,4479514158915 Servicebeginnzeit am Silo: 18,7226378743796
Auftrag: 9	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,9042552362252 Servicebeginnzeit am Silo: 19,176387339379
Auftrag: 15	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,3939984190887 Servicebeginnzeit am Silo: 19,6616915493495
Auftrag: 20	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,9002543244007 Servicebeginnzeit am Silo: 20,1751525762417
Auftrag: 25	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,4135180680201 Servicebeginnzeit am Silo: 20,6669096540418

## Servicebeginnzeiten von Transportfahrzeug 4 in [h]

Auftrag: 2	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,0955114883199 Servicebeginnzeit am Silo: 18,3428052957336
Auftrag: 11	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,001156724545 Servicebeginnzeit am Silo: 19,2829767309102
Auftrag: 14	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,4955786472401 Servicebeginnzeit am Silo: 19,759556762715
Auftrag: 21	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,9971558127206 Servicebeginnzeit am Silo: 20,2601681140493
Auftrag: 24	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,51041955634 Servicebeginnzeit am Silo: 20,7791732834855

## Servicebeginnzeiten von Transportfahrzeug 5 in [h]

Auftrag: 4	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,2797290309529 Servicebeginnzeit am Silo: 18,5576912229759
Auftrag: 8	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,7663414646467

Auftrag: 10 Servicebeginnzeit am Silo: 19,0504236044028  
Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,2779260627554  
Servicebeginnzeit am Silo: 19,5594597332523  
Auftrag: 16 Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,7841819680674  
Servicebeginnzeit am Silo: 20,0762880064568  
Auftrag: 22 Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,2974457116869  
Servicebeginnzeit am Silo: 20,5876890902634  
Auftrag: 27 Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,8363092827084  
Servicebeginnzeit am Silo: 21,0728524027308

Tabelle 73: Servicezeiten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 2)

## Servicezeiten von Transportfahrzeug 1 in [h]

Auftrag: 3	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0846579087482793	Servicezeit am Silo: 0,0727000062946723
Auftrag: 6	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0846579087482793	Servicezeit am Silo: 0,0727000062946723
Auftrag: 13	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0846579087482793	Servicezeit am Silo: 0,0727000062946723
Auftrag: 18	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0846579087482793	Servicezeit am Silo: 0,0727000062946723
Auftrag: 23	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0846579087482793	Servicezeit am Silo: 0,0727000062946723

## Servicezeiten von Transportfahrzeug 2 in [h]

Auftrag: 7	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0925517955773291	Servicezeit am Silo: 0,057838326524284
Auftrag: 12	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0925517955773291	Servicezeit am Silo: 0,057838326524284
Auftrag: 17	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0925517955773291	Servicezeit am Silo: 0,057838326524284
Auftrag: 19	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0925517955773291	Servicezeit am Silo: 0,057838326524284
Auftrag: 26	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0925517955773291	Servicezeit am Silo: 0,057838326524284

## Servicezeiten von Transportfahrzeug 3 in [h]

Auftrag: 1	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0969014883198667	Servicezeit am Silo: 0,0565242784227142
Auftrag: 5	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0969014883198667	Servicezeit am Silo: 0,0565242784227142
Auftrag: 9	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0969014883198667	Servicezeit am Silo: 0,0565242784227142
Auftrag: 15	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0969014883198667	Servicezeit am Silo: 0,0565242784227142
Auftrag: 20	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0969014883198667	Servicezeit am Silo: 0,0565242784227142
Auftrag: 25	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0969014883198667	Servicezeit am Silo: 0,0565242784227142

## Servicezeiten von Transportfahrzeug 4 in [h]

Auftrag: 2	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0995596338847509	Servicezeit am Silo: 0,0722144418367007
Auftrag: 11	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0995596338847509	Servicezeit am Silo: 0,0722144418367007
Auftrag: 14	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0995596338847509	Servicezeit am Silo: 0,0722144418367007
Auftrag: 21	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0995596338847509	Servicezeit am Silo: 0,0722144418367007
Auftrag: 24	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0995596338847509	Servicezeit am Silo: 0,0722144418367007

## Servicezeiten von Transportfahrzeug 5 in [h]

Auftrag: 4	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,116072356333273	Servicezeit am Silo: 0,0695482788610878
Auftrag: 8	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,116072356333273	Servicezeit am Silo: 0,0695482788610878
Auftrag: 10	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,116072356333273	Servicezeit am Silo: 0,0695482788610878
Auftrag: 16	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,116072356333273	Servicezeit am Silo: 0,0695482788610878
Auftrag: 22	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,116072356333273	Servicezeit am Silo: 0,0695482788610878
Auftrag: 27	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0577913634479046	Servicezeit am Silo: 0,0346274522979722

Tabelle 74: Wartezeiten der Transportfahrzeuge am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 2)

## Wartezeiten von Transportfahrzeug 1 in [h]

Auftrag: 3	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 6	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 13	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,0731170364359599	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 18	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,0127109083422141	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 23	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,0277801838369918	Wartezeit am Silo: 0

## Wartezeiten von Transportfahrzeug 2 in [h]

Auftrag: 7	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 12	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,0354976730568026	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 17	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,039339211239934	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 19	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 26	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0

## Wartezeiten von Transportfahrzeug 3 in [h]

Auftrag: 1	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 5	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 9	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 15	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,007494653621265	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 20	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,0220849452476806	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 25	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,0256713976465122	Wartezeit am Silo: 0

## Wartezeiten von Transportfahrzeug 4 in [h]

Auftrag: 2	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 11	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,482311099184141	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 14	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 21	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,0125154538918331	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 24	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0

## Wartezeiten von Transportfahrzeug 5 in [h]

Auftrag: 4	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 8	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 10	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 16	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 22	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 27	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0

Tabelle 75: Wartezeiten des Feldhäckslers (Berechnung 2)

Wartezeiten des Feldhäckslers in [h] bezüglich des optimalen Serviceauftrags

Auftrag: 3	Wartezeit: 0
Auftrag: 6	Wartezeit: 0,179455003470316
Auftrag: 13	Wartezeit: 0
Auftrag: 18	Wartezeit: 0,0137106660755109
Auftrag: 23	Wartezeit: 0,0372312268314552
Auftrag: 7	Wartezeit: 0
Auftrag: 12	Wartezeit: 0
Auftrag: 17	Wartezeit: 0,0137106660755109
Auftrag: 19	Wartezeit: 0,338812043781438
Auftrag: 26	Wartezeit: 0,158692589492404
Auftrag: 1	Wartezeit: 0
Auftrag: 5	Wartezeit: 0,0471500286053477
Auftrag: 9	Wartezeit: 0,113270299960263
Auftrag: 15	Wartezeit: 0,0137106660755109
Auftrag: 20	Wartezeit: 0,0372312268314552
Auftrag: 25	Wartezeit: 0,0537439492799763
Auftrag: 2	Wartezeit: 0
Auftrag: 11	Wartezeit: 0
Auftrag: 14	Wartezeit: 0,214850528111647
Auftrag: 21	Wartezeit: 0,0372312268314552
Auftrag: 24	Wartezeit: 0,250205071484594
Auftrag: 4	Wartezeit: 0
Auftrag: 8	Wartezeit: 0,0914288847150786
Auftrag: 10	Wartezeit: 0,390039638170624
Auftrag: 16	Wartezeit: 0,306992726734393
Auftrag: 22	Wartezeit: 0,237961491913008
Auftrag: 27	Wartezeit: 0,321842312200481

Tabelle 76: Feldfahrzeiten vom Schlagrand zum Feldhäcksler und vice versa (Berechnung 3)

Feldfahrzeit zu Auftrag 1 in [h]		
Fahrt zum Feldhäcksler: 0		Fahrt zum Schlagrand: 0,0197051968996748
Feldfahrzeit zu Auftrag 2 in [h]		
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0197051968996748		Fahrt zum Schlagrand: 0,0299326035860442
Feldfahrzeit zu Auftrag 3 in [h]		
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0299326035860442		Fahrt zum Schlagrand: 0,00315263530915437
Feldfahrzeit zu Auftrag 4 in [h]		
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,00315263530915437		Fahrt zum Schlagrand: 0,0263295984356269
Feldfahrzeit zu Auftrag 5 in [h]		
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0263295984356269		Fahrt zum Schlagrand: 0,0276306051861806
Feldfahrzeit zu Auftrag 6 in [h]		
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0276306051861806		Fahrt zum Schlagrand: 0,0144911627946238
Feldfahrzeit zu Auftrag 7 in [h]		
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0144911627946238		Fahrt zum Schlagrand: 0,0145925033186352
Feldfahrzeit zu Auftrag 8 in [h]		
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0145925033186352		Fahrt zum Schlagrand: 0,0343380850431033
Feldfahrzeit zu Auftrag 9 in [h]		
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0343380850431033		Fahrt zum Schlagrand: 0,0151080314582816
Feldfahrzeit zu Auftrag 10 in [h]		
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0151080314582816		Fahrt zum Schlagrand: 0,0117390980901064
Feldfahrzeit zu Auftrag 11 in [h]		
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0117390980901064		Fahrt zum Schlagrand: 0,0340303684189914
Feldfahrzeit zu Auftrag 12 in [h]		
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0340303684189914		Fahrt zum Schlagrand: 0,0202475718649624
Feldfahrzeit zu Auftrag 13 in [h]		
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0202475718649624		Fahrt zum Schlagrand: 0,0162557612755177
Feldfahrzeit zu Auftrag 14 in [h]		
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0162557612755177		Fahrt zum Schlagrand: 0,0424268284159058
Feldfahrzeit zu Auftrag 15 in [h]		
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0424268284159058		Fahrt zum Schlagrand: 0,028450220449948
Feldfahrzeit zu Auftrag 16 in [h]		
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,028450220449948		Fahrt zum Schlagrand: 0,0164588723069016
Feldfahrzeit zu Auftrag 17 in [h]		
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0164588723069016		Fahrt zum Schlagrand: 0,0204068792665803
Feldfahrzeit zu Auftrag 18 in [h]		
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0204068792665803		Fahrt zum Schlagrand: 0,0199145313449485
Feldfahrzeit zu Auftrag 19 in [h]		
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0199145313449485		Fahrt zum Schlagrand: 0,0195850591798317

Tabelle 77: Früheste und späteste optimale Ankunftszeiten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 3)

## Optimale Ankunftszeiten am Schlag und Silo in [h]

Auftrag: 1	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 17,99861 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,00361
Auftrag: 1	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,3076420574034 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,3126420574034
Auftrag: 2	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,1421498605037 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,1471498605037
Auftrag: 2	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,4573484283567 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,4623484283567
Auftrag: 3	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,2834343247706 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,2884343247706
Auftrag: 3	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,5583452633219 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,5633452633219
Auftrag: 4	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,4013593280127 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,4063593280127
Auftrag: 4	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,7093521130252 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,7143521130252
Auftrag: 5	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,5292725145896 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,5342725145896
Auftrag: 5	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,8462299802795 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,8512299802795
Auftrag: 6	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,6728123750933 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,6778123750933
Auftrag: 6	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,0066033707058 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,0116033707058
Auftrag: 7	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,8329455079112 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,8379455079112
Auftrag: 7	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,1328039754967 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,1378039754967
Auftrag: 8	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,9742299721781 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,9792299721781
Auftrag: 8	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,2803263604633 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,2853263604633
Auftrag: 9	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,0921549754202 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,0971549754202
Auftrag: 9	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,3965898673822 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,4015898673822
Auftrag: 10	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,235694835924 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,240694835924
Auftrag: 10	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,5667337668319 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,5717337668319
Auftrag: 11	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,3958279687418 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,4008279687418
Auftrag: 11	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,7151243014277 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,7201243014277
Auftrag: 12	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,5371124330087 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,5421124330087
Auftrag: 12	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,8291183081158 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,8341183081158
Auftrag: 13	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,6550374362508 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,6600374362508
Auftrag: 13	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,9606200580301 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,9656200580301
Auftrag: 14	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,7985772967546 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,8035772967546
Auftrag: 14	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,1226673117473 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,1276673117473
Auftrag: 15	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,9264904833314 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,9314904833314
Auftrag: 15	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,2742405365992 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,2792405365992
Auftrag: 16	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,0866236161493

Optimale Ankunftszeiten am Schlag und Silo in [h]

Auftrag: 16	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,0916236161493 Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,3748407916983
Auftrag: 17	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,3798407916983 Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,2045486193914
Auftrag: 17	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,2095486193914 Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,5102214629249
Auftrag: 18	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,5152214629249 Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,3458330836583
Auftrag: 18	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,3508330836583 Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,6474108015801
Auftrag: 19	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,6524108015801 Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,4741055872727
Auftrag: 19	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,4791055872727 Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,767750150067
Auftrag: 19	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,772750150067

Tabelle 78: Abfahrtszeiten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 3)

## Abfahrtszeiten von Transportfahrzeug 1 in [h]

Auftrag: 3	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,4013593280127	Abfahrtszeit am Silo: 18,6596133976848
Auftrag: 8	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,0963024429099	Abfahrtszeit am Silo: 19,3857419623159
Auftrag: 12	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,6591849037406	Abfahrtszeit am Silo: 19,9345339099684
Auftrag: 16	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,2086960868812	Abfahrtszeit am Silo: 20,4802563935509

## Abfahrtszeiten von Transportfahrzeug 2 in [h]

Auftrag: 4	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,5292725145896	Abfahrtszeit am Silo: 18,7892888079952
Auftrag: 14	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,9306379508212	Abfahrtszeit am Silo: 20,2067514742071
Auftrag: 18	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,4778937377249	Abfahrtszeit am Silo: 20,7314949640399

## Abfahrtszeiten von Transportfahrzeug 3 in [h]

Auftrag: 2	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,2834343247706	Abfahrtszeit am Silo: 18,5397620479356
Auftrag: 7	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,9783774396678	Abfahrtszeit am Silo: 19,2193650625654
Auftrag: 11	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,5412599004984	Abfahrtszeit am Silo: 19,8016853884963
Auftrag: 17	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,349980551148	Abfahrtszeit am Silo: 20,5967825499935

## Abfahrtszeiten von Transportfahrzeug 4 in [h]

Auftrag: 1	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,1421498605037	Abfahrtszeit am Silo: 18,4117570536437
Auftrag: 5	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,6769598425831	Abfahrtszeit am Silo: 18,9544924440095
Auftrag: 9	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,2398423034137	Abfahrtszeit am Silo: 19,5048523311123
Auftrag: 13	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,8027247642443	Abfahrtszeit am Silo: 20,0688825217601
Auftrag: 19	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,6065255583769	Abfahrtszeit am Silo: 20,8649386122849

## Abfahrtszeiten von Transportfahrzeug 5 in [h]

Auftrag: 6	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,8370929754009	Abfahrtszeit am Silo: 19,1066994699623
Auftrag: 10	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,3999754362316	Abfahrtszeit am Silo: 19,6668298660884
Auftrag: 15	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,090771083639	Abfahrtszeit am Silo: 20,3743366358557

Tabelle 79: Ankunftszeiten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 3)

## Ankunftszeiten von Transportfahrzeug 1 in [h]

Auftrag: 3	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 17,398335403586	Ankunftszeit am Silo: 18,5583452633219
Auftrag: 8	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 18,7867561684932	Ankunftszeit am Silo: 19,2844738279531
Auftrag: 12	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,5281751307349	Ankunftszeit am Silo: 19,8332657756055
Auftrag: 16	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,0713869304184	Ankunftszeit am Silo: 20,3789882591881

## Ankunftszeiten von Transportfahrzeug 2 in [h]

Auftrag: 4	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 17,3815415353092	Ankunftszeit am Silo: 18,7093521130252
Auftrag: 14	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 18,9280809367605	Ankunftszeit am Silo: 20,1268147792371
Auftrag: 18	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,3455472534737	Ankunftszeit am Silo: 20,6515582690698

## Ankunftszeiten von Transportfahrzeug 3 in [h]

Auftrag: 2	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 17,3959551968997	Ankunftszeit am Silo: 18,4573484283567
Auftrag: 7	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 18,6746506782199	Ankunftszeit am Silo: 19,1369514429865
Auftrag: 11	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,3473541606555	Ankunftszeit am Silo: 19,7192717689174
Auftrag: 17	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,9343942608032	Ankunftszeit am Silo: 20,5143689304146

## Ankunftszeiten von Transportfahrzeug 4 in [h]

Auftrag: 1	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 17,35533333	Ankunftszeit am Si 18,3076420574034
Auftrag: 5	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 18,5334199820793	Ankunftszeit am Silo: 18,8503774477693
Auftrag: 9	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,0883113265424	Ankunftszeit am Silo: 19,400737334872
Auftrag: 13	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,6204332329772	Ankunftszeit am Silo: 19,9647675255198
Auftrag: 19	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,1841303831051	Ankunftszeit am Silo: 20,7718976175567

## Ankunftszeiten von Transportfahrzeug 5 in [h]

Auftrag: 6	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 17,4042224726759	Ankunftszeit am Silo: 19,0107508381956
Auftrag: 10	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,2342519014206	Ankunftszeit am Silo: 19,5708812343217
Auftrag: 15	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,8217010945043	Ankunftszeit am Silo: 20,278388004089

Tabelle 80: Kapazitäten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 3)

Transportfahrzeug 1, Kapazität in [t]: 14,64

Auftrag: 3	Beladung am Feldhäcksler: 14,64	Entladung am Silo: 14,64
Auftrag: 8	Beladung am Feldhäcksler: 14,64	Entladung am Silo: 14,64
Auftrag: 12	Beladung am Feldhäcksler: 14,64	Entladung am Silo: 14,64
Auftrag: 16	Beladung am Feldhäcksler: 14,64	Entladung am Silo: 14,64

Transportfahrzeug 2, Kapazität in [t]: 15,88

Auftrag: 4	Beladung am Feldhäcksler: 15,88	Entladung am Silo: 15,88
Auftrag: 14	Beladung am Feldhäcksler: 15,88	Entladung am Silo: 15,88
Auftrag: 18	Beladung am Feldhäcksler: 15,88	Entladung am Silo: 15,88

Transportfahrzeug 3, Kapazität in [t]: 17,54

Auftrag: 2	Beladung am Feldhäcksler: 17,54	Entladung am Silo: 17,54
Auftrag: 7	Beladung am Feldhäcksler: 17,54	Entladung am Silo: 17,54
Auftrag: 11	Beladung am Feldhäcksler: 17,54	Entladung am Silo: 17,54
Auftrag: 17	Beladung am Feldhäcksler: 17,54	Entladung am Silo: 17,54

Transportfahrzeug 4, Kapazität in [t]: 17,82

Auftrag: 1	Beladung am Feldhäcksler: 17,82	Entladung am Silo: 17,82
Auftrag: 5	Beladung am Feldhäcksler: 17,82	Entladung am Silo: 17,82
Auftrag: 9	Beladung am Feldhäcksler: 17,82	Entladung am Silo: 17,82
Auftrag: 13	Beladung am Feldhäcksler: 17,82	Entladung am Silo: 17,82
Auftrag: 19	Beladung am Feldhäcksler: 17,82	Entladung am Silo: 17,82

Transportfahrzeug 5, Kapazität in [t]: 19,88

Auftrag: 6	Beladung am Feldhäcksler: 19,88	Entladung am Silo: 19,88
Auftrag: 10	Beladung am Feldhäcksler: 19,88	Entladung am Silo: 19,88
Auftrag: 15	Beladung am Feldhäcksler: 19,88	Entladung am Silo: 19,88

Tabelle 81: Servicebeginnzeiten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 3)

## Servicebeginnzeiten von Transportfahrzeug 1 in [h]

Auftrag: 3	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,2834343247706 Servicebeginnzeit am Silo: 18,5583452633219
Auftrag: 8	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,9783774396678 Servicebeginnzeit am Silo: 19,2844738279531
Auftrag: 12	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,5412599004984 Servicebeginnzeit am Silo: 19,8332657756055
Auftrag: 16	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,090771083639 Servicebeginnzeit am Silo: 20,3789882591881

## Servicebeginnzeiten von Transportfahrzeug 2 in [h]

Auftrag: 4	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,4013593280127 Servicebeginnzeit am Silo: 18,7093521130252
Auftrag: 14	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,8027247642443 Servicebeginnzeit am Silo: 20,1268147792371
Auftrag: 18	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,349980551148 Servicebeginnzeit am Silo: 20,6515582690698

## Servicebeginnzeiten von Transportfahrzeug 3 in [h]

Auftrag: 2	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,1421498605037 Servicebeginnzeit am Silo: 18,4573484283567
Auftrag: 7	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,8370929754009 Servicebeginnzeit am Silo: 19,1369514429865
Auftrag: 11	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,3999754362316 Servicebeginnzeit am Silo: 19,7192717689174
Auftrag: 17	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,2086960868812 Servicebeginnzeit am Silo: 20,5143689304146

## Servicebeginnzeiten von Transportfahrzeug 4 in [h]

Auftrag: 1	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 17,99861 Servicebeginnzeit am Silo: 18,3076420574034
Auftrag: 5	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,5334199820793 Servicebeginnzeit am Silo: 18,8503774477693
Auftrag: 9	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,0963024429099 Servicebeginnzeit am Silo: 19,400737334872
Auftrag: 13	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,6591849037406 Servicebeginnzeit am Silo: 19,9647675255198
Auftrag: 19	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,4782530547625 Servicebeginnzeit am Silo: 20,7718976175567

## Servicebeginnzeiten von Transportfahrzeug 5 in [h]

Auftrag: 6	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,6769598425831 Servicebeginnzeit am Silo: 19,0107508381956
Auftrag: 10	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,2398423034137 Servicebeginnzeit am Silo: 19,5708812343217
Auftrag: 15	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,9306379508212 Servicebeginnzeit am Silo: 20,278388004089

Tabelle 82: Servicezeiten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 3)

## Servicezeiten von Transportfahrzeug 1 in [h]

Auftrag: 3	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,117925003242132	Servicezeit am Silo: 0,101268134362893
Auftrag: 8	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,117925003242132	Servicezeit am Silo: 0,101268134362893
Auftrag: 12	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,117925003242132	Servicezeit am Silo: 0,101268134362893
Auftrag: 16	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,117925003242132	Servicezeit am Silo: 0,101268134362893

## Servicezeiten von Transportfahrzeug 2 in [h]

Auftrag: 4	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,127913186576848	Servicezeit am Silo: 0,0799366949700288
Auftrag: 14	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,127913186576848	Servicezeit am Silo: 0,0799366949700288
Auftrag: 18	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,127913186576848	Servicezeit am Silo: 0,0799366949700288

## Servicezeiten von Transportfahrzeug 3 in [h]

Auftrag: 2	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,141284464266871	Servicezeit am Silo: 0,08241361957892
Auftrag: 7	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,141284464266871	Servicezeit am Silo: 0,08241361957892
Auftrag: 11	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,141284464266871	Servicezeit am Silo: 0,08241361957892
Auftrag: 17	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,141284464266871	Servicezeit am Silo: 0,08241361957892

## Servicezeiten von Transportfahrzeug 4 in [h]

Auftrag: 1	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,143539860503743	Servicezeit am Silo: 0,104114996240292
Auftrag: 5	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,143539860503743	Servicezeit am Silo: 0,104114996240292
Auftrag: 9	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,143539860503743	Servicezeit am Silo: 0,104114996240292
Auftrag: 13	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,143539860503743	Servicezeit am Silo: 0,104114996240292
Auftrag: 19	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,128272503614426	Servicezeit am Silo: 0,0930409947281753

## Servicezeiten von Transportfahrzeug 5 in [h]

Auftrag: 6	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,160133132817868	Servicezeit am Silo: 0,0959486317667193
Auftrag: 10	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,160133132817868	Servicezeit am Silo: 0,0959486317667193
Auftrag: 15	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,160133132817868	Servicezeit am Silo: 0,0959486317667193

Tabelle 83: Wartezeiten der Transportfahrzeuge am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 3)

## Wartezeiten von Transportfahrzeug 1 in [h]

Auftrag: 3	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 8	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,191621271174647	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 12	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,0130847697634948	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 16	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,0193841532206562	Wartezeit am Silo: 0

## Wartezeiten von Transportfahrzeug 2 in [h]

Auftrag: 4	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 14	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,874643827483801	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 18	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,00443329767435685	Wartezeit am Silo: 0

## Wartezeiten von Transportfahrzeug 3 in [h]

Auftrag: 2	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 7	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,162442297181006	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 11	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,0526212755760831	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 17	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,27430182607791	Wartezeit am Silo: 0

## Wartezeiten von Transportfahrzeug 4 in [h]

Auftrag: 1	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 5	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 9	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,00799111636755612	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 13	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,038751670763336	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 19	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,294122671657387	Wartezeit am Silo: 0

## Wartezeiten von Transportfahrzeug 5 in [h]

Auftrag: 6	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 10	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,00559040199312122	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 15	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,108936856316859	Wartezeit am Silo: 0

Tabelle 84: Wartezeiten des Feldhäckslers (Berechnung 3)

Wartezeiten des Feldhäckslers in [h] bezüglich des optimalen Serviceauftrags

Auftrag: 3	Wartezeit: 0
Auftrag: 8	Wartezeit: 0
Auftrag: 12	Wartezeit: 0
Auftrag: 16	Wartezeit: 0
Auftrag: 4	Wartezeit: 0
Auftrag: 14	Wartezeit: 0
Auftrag: 18	Wartezeit: 0
Auftrag: 2	Wartezeit: 0
Auftrag: 7	Wartezeit: 0
Auftrag: 11	Wartezeit: 0
Auftrag: 17	Wartezeit: 0
Auftrag: 1	Wartezeit: 0
Auftrag: 5	Wartezeit: 0
Auftrag: 9	Wartezeit: 0
Auftrag: 13	Wartezeit: 0
Auftrag: 19	Wartezeit: 0
Auftrag: 6	Wartezeit: 0
Auftrag: 10	Wartezeit: 0
Auftrag: 15	Wartezeit: 0

## 10.4 Ultimativer Algorithmus:

**Berechnung 1: (9.43 t, 10.31 t, 10.36 t, 12.03 t, 13.03 t),**

**Berechnung 2: (10.51 t, 11.49 t, 12.03 t, 12.36 t, 14.41 t),**

**Berechnung 3: (14.64 t, 15.88 t, 17.54 t, 17.82 t, 19.88 t)**

Tabelle 85: Feldfahrzeiten vom Schlagrand zum Feldhäcksler und vice versa (Berechnung 1)

Feldfahrzeit zu Auftrag 1 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0259388909755
Fahrt zum Feldhäcksler: 0		
Feldfahrzeit zu Auftrag 2 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0143669783064925
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,025938890975585		
Feldfahrzeit zu Auftrag 3 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0157369964714146
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0143669783064925		
Feldfahrzeit zu Auftrag 4 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0221191137275752
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0157369964714146		
Feldfahrzeit zu Auftrag 5 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0170995760386837
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0221191137275752		
Feldfahrzeit zu Auftrag 6 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0298109278270288
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0170995760386837		
Feldfahrzeit zu Auftrag 7 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,00399378412421656
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0298109278270288		
Feldfahrzeit zu Auftrag 8 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0318687453148438
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,00399378412421656		
Feldfahrzeit zu Auftrag 9 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0100756037663872
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0318687453148438		
Feldfahrzeit zu Auftrag 10 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,032708678398699
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0100756037663872		
Feldfahrzeit zu Auftrag 11 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0182900643492546
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,032708678398699		
Feldfahrzeit zu Auftrag 12 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0190802400008177
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0182900643492546		
Feldfahrzeit zu Auftrag 13 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0315824079373992
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0190802400008177		
Feldfahrzeit zu Auftrag 14 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0120645711362951
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0315824079373992		
Feldfahrzeit zu Auftrag 15 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,033308204102053
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0120645711362951		
Feldfahrzeit zu Auftrag 16 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,00762769264684658
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,033308204102053		
Feldfahrzeit zu Auftrag 17 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0355026538374738
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,00762769264684658		
Feldfahrzeit zu Auftrag 18 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0146181730082394
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0355026538374738		
Feldfahrzeit zu Auftrag 19 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,035297293954501
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0146181730082394		
Feldfahrzeit zu Auftrag 20 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,023877926557935
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,035297293954501		
Feldfahrzeit zu Auftrag 21 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0206235625897919
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,023877926557935		
Feldfahrzeit zu Auftrag 22 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0405968140397903
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0206235625897919		
Feldfahrzeit zu Auftrag 23 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0125867080746522
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0405968140397903		
Feldfahrzeit zu Auftrag 24 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0335613958219518
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0125867080746522		
Feldfahrzeit zu Auftrag 25 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0145046788674734
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0335613958219518		
Feldfahrzeit zu Auftrag 26 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0155869195204999
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0145046788674734		
Feldfahrzeit zu Auftrag 27 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0317455258480484
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0155869195204999		
Feldfahrzeit zu Auftrag 28 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,016341303506879
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0317455258480484		
Feldfahrzeit zu Auftrag 29 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,024560086184082
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,016341303506879		
Feldfahrzeit zu Auftrag 30 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0195850563265733
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,024560086184082		

Tabelle 86: Früheste und späteste optimale Ankunftszeiten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 1)

## Optimale Ankunftszeiten am Schlag und Silo in [h]

Auftrag: 1	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 17,99861 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,00361
Auftrag: 1	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,2543568242119 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,2593568242119
Auftrag: 2	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,0745846332363 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,0795846332363
Auftrag: 2	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,3164069372667 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,3214069372667
Auftrag: 3	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,1580584589602 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,1630584589602
Auftrag: 3	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,4106165318276 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,4156165318276
Auftrag: 4	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,2411295353562 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,2461295353562
Auftrag: 4	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,5059049174574 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,5109049174574
Auftrag: 5	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,3379988037298 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,3429988037298
Auftrag: 5	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,6191893347023 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,6241893347023
Auftrag: 6	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,4429230586637 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,4479230586637
Auftrag: 6	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,702541919727 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,707541919727
Auftrag: 7	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,5188976919 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,5238976919
Auftrag: 7	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,7503468017481 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,7553468017481
Auftrag: 8	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,6023715176239 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,6073715176239
Auftrag: 8	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,8710613393347 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,8760613393347
Auftrag: 9	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,6854425940198 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,6904425940198
Auftrag: 9	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,9381744661598 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,9431744661598
Auftrag: 10	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,7823118623934 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,7873118623934
Auftrag: 10	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,079111495726 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,084111495726
Auftrag: 11	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,8872361173273 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,8922361173273
Auftrag: 11	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,1353341149129 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,1403341149129
Auftrag: 12	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,9632107505637 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,9682107505636
Auftrag: 12	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,2097463162884 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,2147463162884
Auftrag: 13	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,0466845762876 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,0516845762876
Auftrag: 13	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,3150880606209 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,3200880606209
Auftrag: 14	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,1297556526835 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,1347556526835
Auftrag: 14	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,3844764921934 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,3894764921934
Auftrag: 15	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,2266249210571 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,2316249210571
Auftrag: 15	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,524024080093 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,529024080093

## Optimale Ankunftszeiten am Schlag und Silo in [h]

Auftrag: 16	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,331549175991 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,336549175991
Auftrag: 16	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,5666321943618 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,5716321943618
Auftrag: 17	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,4150230017149 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,4200230017149
Auftrag: 17	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,6873467319483 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,6923467319483
Auftrag: 18	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,4980940781108 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,5030940781108
Auftrag: 18	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,7553685194927 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,7603685194927
Auftrag: 19	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,5949633464844 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,5999633464844
Auftrag: 19	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,8943515953728 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,8993515953728
Auftrag: 20	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,6998876014183 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,7048876014183
Auftrag: 20	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,9535734612126 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,9585734612126
Auftrag: 21	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,7758622346547 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,7808622346547
Auftrag: 21	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,0239411229684 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,0289411229684
Auftrag: 22	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,8593360603786 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,8643360603786
Auftrag: 22	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,1297408076547 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,1347408076547
Auftrag: 23	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,9353106936149 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,9403106936149
Auftrag: 23	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,1753527274135 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,1803527274135
Auftrag: 24	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,0187845193388 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,0237845193388
Auftrag: 24	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,2891669915567 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,2941669915567
Auftrag: 25	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,1018555957347 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,1068555957347
Auftrag: 25	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,3590165429758 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,3640165429758
Auftrag: 26	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,1987248641084 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,2037248641084
Auftrag: 26	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,4784027385627 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,4834027385627
Auftrag: 27	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,3036491190422 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,3086491190422
Auftrag: 27	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,5652025781266 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,5702025781266
Auftrag: 28	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,3796237522786 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,3846237522786
Auftrag: 28	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,6234203815094 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,6284203815094
Auftrag: 29	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,4630975780025 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,4680975780025
Auftrag: 29	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,7244787405825 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,7294787405825
Auftrag: 30	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,5189476889506 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,5239476889506
Auftrag: 30	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,7401698562252 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,7451698562252

Tabelle 87: Abfahrtszeiten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 1)

## Abfahrtszeiten von Transportfahrzeug 1 in [h]

Auftrag: 1	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,0745846332363	Abfahrtszeit am Silo: 18,3196000648752
Auftrag: 6	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,5210770741502	Abfahrtszeit am Silo: 18,7699645426406
Auftrag: 11	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,9892300365258	Abfahrtszeit am Silo: 19,2265966415384
Auftrag: 20	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,8079636617129	Abfahrtszeit am Silo: 20,0509181289341
Auftrag: 22	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,3559116635306	Abfahrtszeit am Silo: 20,6155850182337
Auftrag: 27	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,9099574390623	Abfahrtszeit am Silo: 21,1607795055737

## Abfahrtszeiten von Transportfahrzeug 2 in [h]

Auftrag: 3	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,2411295353562	Abfahrtszeit am Silo: 18,4625300793859
Auftrag: 8	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,6876219762701	Abfahrtszeit am Silo: 18,9251542691432
Auftrag: 13	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,1695343892519	Abfahrtszeit am Silo: 19,4067803447476
Auftrag: 17	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,6158680137903	Abfahrtszeit am Silo: 19,8570342151861
Auftrag: 24	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,1830677619206	Abfahrtszeit am Silo: 20,4222927053009
Auftrag: 29	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,7756750090416	Abfahrtszeit am Silo: 21,005898642784

## Abfahrtszeiten von Transportfahrzeug 3 in [h]

Auftrag: 2	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,1580584589602	Abfahrtszeit am Silo: 18,3650986328024
Auftrag: 7	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,6045508998741	Abfahrtszeit am Silo: 18,8012178795341
Auftrag: 12	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,0727038622497	Abfahrtszeit am Silo: 19,2844572977863
Auftrag: 16	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,5174893276122	Abfahrtszeit am Silo: 19,7177902157948
Auftrag: 21	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,9965848483004	Abfahrtszeit am Silo: 20,2098816064259
Auftrag: 23	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,5857832700275	Abfahrtszeit am Silo: 20,7910431736378
Auftrag: 28	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 21,0322213690864	Abfahrtszeit am Silo: 21,241235868129

## Abfahrtszeiten von Transportfahrzeug 4 in [h]

Auftrag: 4	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,3379988037298	Abfahrtszeit am Silo: 18,5761679334386
Auftrag: 9	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,8024186593773	Abfahrtszeit am Silo: 19,0285442791249
Auftrag: 14	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,2761691891479	Abfahrtszeit am Silo: 19,5042837762654
Auftrag: 18	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,7319890284765	Abfahrtszeit am Silo: 19,962657217466
Auftrag: 25	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,2799370302943	Abfahrtszeit am Silo: 20,510491725143
Auftrag: 30	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,8315251199897	Abfahrtszeit am Silo: 21,0374074163442

## Abfahrtszeiten von Transportfahrzeug 5 in [h]

Auftrag: 5	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,4429230586637	Abfahrtszeit am Silo: 18,6820578899032
Auftrag: 10	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,9116815308537	Abfahrtszeit am Silo: 19,1664254644533
Auftrag: 15	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,4196985942354	Abfahrtszeit am Silo: 19,6750420535383
Auftrag: 19	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,9131110225765	Abfahrtszeit am Silo: 20,1704435717318
Auftrag: 26	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,5023094443036	Abfahrtszeit am Silo: 20,7399316190249

Tabelle 88: Ankunftszeiten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 1)

## Ankunftszeiten von Transportfahrzeug 1 in [h]

Auftrag: 1	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 17,3684028	Ankunftszeit am Silo: 18,2543568242119
Auftrag: 6	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 18,4451024409139	Ankunftszeit am Silo: 18,7047213019773
Auftrag: 11	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 18,9132554032895	Ankunftszeit am Silo: 19,1613534008751
Auftrag: 20	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,4002187803009	Ankunftszeit am Silo: 19,9856748882708
Auftrag: 22	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,2799370302943	Ankunftszeit am Silo: 20,5503417775704
Auftrag: 27	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,833982805826	Ankunftszeit am Silo: 21,0955362649104

## Ankunftszeiten von Transportfahrzeug 2 in [h]

Auftrag: 3	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 17,3927558783065	Ankunftszeit am Silo: 18,4106165318276
Auftrag: 8	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 18,5870921457603	Ankunftszeit am Silo: 18,8732407215849
Auftrag: 13	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,086463312856	Ankunftszeit am Silo: 19,3548667971893
Auftrag: 17	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,5327969373944	Ankunftszeit am Silo: 19,8051206676278
Auftrag: 24	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,0432027034845	Ankunftszeit am Silo: 20,3703791577426
Auftrag: 29	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,6926039326457	Ankunftszeit am Silo: 20,9539850952257

## Ankunftszeiten von Transportfahrzeug 3 in [h]

Auftrag: 2	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 17,4021888909756	Ankunftszeit am Silo: 18,3164069372667
Auftrag: 7	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 18,5133389428797	Ankunftszeit am Silo: 18,7525261839984
Auftrag: 12	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 18,9595978475953	Ankunftszeit am Silo: 19,2357656022506
Auftrag: 16	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,4340155018883	Ankunftszeit am Silo: 19,6690985202591
Auftrag: 21	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,9131110225765	Ankunftszeit am Silo: 20,1611899108902
Auftrag: 23	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,5023094443036	Ankunftszeit am Silo: 20,7423514781021
Auftrag: 28	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,9487475433625	Ankunftszeit am Silo: 21,1925441725933

## Ankunftszeiten von Transportfahrzeug 4 in [h]

Auftrag: 4	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 17,3710703264714	Ankunftszeit am Silo: 18,5059049174574
Auftrag: 9	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 18,7055493910037	Ankunftszeit am Silo: 18,9582812631437
Auftrag: 14	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,1792999207743	Ankunftszeit am Silo: 19,4340207602842
Auftrag: 18	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,6351197601029	Ankunftszeit am Silo: 19,8923942014848
Auftrag: 25	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,1467448235117	Ankunftszeit am Silo: 20,4402287091617
Auftrag: 30	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,7756750090416	Ankunftszeit am Silo: 20,9968971763162

## Ankunftszeiten von Transportfahrzeug 5 in [h]

Auftrag: 5	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 17,3945635137276	Ankunftszeit am Silo: 18,6191893347023
Auftrag: 10	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 18,8067572759198	Ankunftszeit am Silo: 19,1035569092524
Auftrag: 15	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,3147743393015	Ankunftszeit am Silo: 19,6121734983374
Auftrag: 19	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,8081867676426	Ankunftszeit am Silo: 20,107575016531
Auftrag: 26	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,3973851893697	Ankunftszeit am Silo: 20,6770630638241

Tabelle 89: Kapazitäten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 1)

Transportfahrzeug 1, Kapazität in [t]: 9,432

Auftrag: 1	Beladung am Feldhäcksler: 9,432	Entladung am Silo: 9,432
Auftrag: 6	Beladung am Feldhäcksler: 9,432	Entladung am Silo: 9,432
Auftrag: 11	Beladung am Feldhäcksler: 9,432	Entladung am Silo: 9,432
Auftrag: 20	Beladung am Feldhäcksler: 9,432	Entladung am Silo: 9,432
Auftrag: 22	Beladung am Feldhäcksler: 9,432	Entladung am Silo: 9,432
Auftrag: 27	Beladung am Feldhäcksler: 9,432	Entladung am Silo: 9,432

Transportfahrzeug 2, Kapazität in [t]: 10,313

Auftrag: 3	Beladung am Feldhäcksler: 10,313	Entladung am Silo: 10,313
Auftrag: 8	Beladung am Feldhäcksler: 10,313	Entladung am Silo: 10,313
Auftrag: 13	Beladung am Feldhäcksler: 10,313	Entladung am Silo: 10,313
Auftrag: 17	Beladung am Feldhäcksler: 10,313	Entladung am Silo: 10,313
Auftrag: 24	Beladung am Feldhäcksler: 10,313	Entladung am Silo: 10,313
Auftrag: 29	Beladung am Feldhäcksler: 10,313	Entladung am Silo: 10,313

Transportfahrzeug 3, Kapazität in [t]: 10,363

Auftrag: 2	Beladung am Feldhäcksler: 10,363	Entladung am Silo: 10,363
Auftrag: 7	Beladung am Feldhäcksler: 10,363	Entladung am Silo: 10,363
Auftrag: 12	Beladung am Feldhäcksler: 10,363	Entladung am Silo: 10,363
Auftrag: 16	Beladung am Feldhäcksler: 10,363	Entladung am Silo: 10,363
Auftrag: 21	Beladung am Feldhäcksler: 10,363	Entladung am Silo: 10,363
Auftrag: 23	Beladung am Feldhäcksler: 10,363	Entladung am Silo: 10,363
Auftrag: 28	Beladung am Feldhäcksler: 10,363	Entladung am Silo: 10,363

Transportfahrzeug 4, Kapazität in [t]: 12,026

Auftrag: 4	Beladung am Feldhäcksler: 12,026	Entladung am Silo: 12,026
Auftrag: 9	Beladung am Feldhäcksler: 12,026	Entladung am Silo: 12,026
Auftrag: 14	Beladung am Feldhäcksler: 12,026	Entladung am Silo: 12,026
Auftrag: 18	Beladung am Feldhäcksler: 12,026	Entladung am Silo: 12,026
Auftrag: 25	Beladung am Feldhäcksler: 12,026	Entladung am Silo: 12,026
Auftrag: 30	Beladung am Feldhäcksler: 12,026	Entladung am Silo: 12,026

Transportfahrzeug 5, Kapazität in [t]: 13,026

Auftrag: 5	Beladung am Feldhäcksler: 13,026	Entladung am Silo: 13,026
Auftrag: 10	Beladung am Feldhäcksler: 13,026	Entladung am Silo: 13,026
Auftrag: 15	Beladung am Feldhäcksler: 13,026	Entladung am Silo: 13,026
Auftrag: 19	Beladung am Feldhäcksler: 13,026	Entladung am Silo: 13,026
Auftrag: 26	Beladung am Feldhäcksler: 13,026	Entladung am Silo: 13,026

Tabelle 90: Servicebeginnzeiten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 1)

## Servicebeginnzeiten von Transportfahrzeug 1 in [h]

Auftrag: 1	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 17,99861 Servicebeginnzeit am Silo: 18,2543568242119
Auftrag: 6	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,4451024409139 Servicebeginnzeit am Silo: 18,7047213019773
Auftrag: 11	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,9132554032895 Servicebeginnzeit am Silo: 19,1613534008751
Auftrag: 20	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,7319890284765 Servicebeginnzeit am Silo: 19,9856748882708
Auftrag: 22	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,2799370302943 Servicebeginnzeit am Silo: 20,5503417775704
Auftrag: 27	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,833982805826 Servicebeginnzeit am Silo: 21,0955362649104

## Servicebeginnzeiten von Transportfahrzeug 2 in [h]

Auftrag: 3	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,1580584589602 Servicebeginnzeit am Silo: 18,4106165318276
Auftrag: 8	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,6045508998741 Servicebeginnzeit am Silo: 18,8732407215849
Auftrag: 13	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,086463312856 Servicebeginnzeit am Silo: 19,3548667971893
Auftrag: 17	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,5327969373944 Servicebeginnzeit am Silo: 19,8051206676278
Auftrag: 24	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,0999966855247 Servicebeginnzeit am Silo: 20,3703791577426
Auftrag: 29	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,6926039326457 Servicebeginnzeit am Silo: 20,9539850952257

## Servicebeginnzeiten von Transportfahrzeug 3 in [h]

Auftrag: 2	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,0745846332363 Servicebeginnzeit am Silo: 18,3164069372667
Auftrag: 7	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,5210770741502 Servicebeginnzeit am Silo: 18,7525261839984
Auftrag: 12	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,9892300365258 Servicebeginnzeit am Silo: 19,2357656022506
Auftrag: 16	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,4340155018883 Servicebeginnzeit am Silo: 19,669098520259
Auftrag: 21	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,9131110225765 Servicebeginnzeit am Silo: 20,1611899108902
Auftrag: 23	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,5023094443036 Servicebeginnzeit am Silo: 20,7423514781021
Auftrag: 28	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,9487475433625 Servicebeginnzeit am Silo: 21,1925441725933

## Servicebeginnzeiten von Transportfahrzeug 4 in [h]

Auftrag: 4	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,2411295353562 Servicebeginnzeit am Silo: 18,5059049174574
Auftrag: 9	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,7055493910037 Servicebeginnzeit am Silo: 18,9582812631437
Auftrag: 14	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,1792999207743 Servicebeginnzeit am Silo: 19,4340207602842
Auftrag: 18	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,6351197601029 Servicebeginnzeit am Silo: 19,8923942014848
Auftrag: 25	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,1830677619206 Servicebeginnzeit am Silo: 20,4402287091617
Auftrag: 30	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,7756750090416

Servicebeginnzeit am Silo: 20,9968971763162

Servicebeginnzeiten von Transportfahrzeug 5 in [h]

Auftrag: 5	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,3379988037298 Servicebeginnzeit am Silo: 18,6191893347023
Auftrag: 10	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,8067572759198 Servicebeginnzeit am Silo: 19,1035569092524
Auftrag: 15	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,3147743393015 Servicebeginnzeit am Silo: 19,6121734983374
Auftrag: 19	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,8081867676426 Servicebeginnzeit am Silo: 20,107575016531
Auftrag: 26	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,3973851893697 Servicebeginnzeit am Silo: 20,6770630638241

Tabelle 91: Servicezeiten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 1)

## Servicezeiten von Transportfahrzeug 1 in [h]

Auftrag: 1	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0759746332363244	Servicezeit am Silo: 0,0652432406633063
Auftrag: 6	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0759746332363244	Servicezeit am Silo: 0,0652432406633063
Auftrag: 11	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0759746332363244	Servicezeit am Silo: 0,0652432406633063
Auftrag: 20	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0759746332363244	Servicezeit am Silo: 0,0652432406633063
Auftrag: 22	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0759746332363244	Servicezeit am Silo: 0,0652432406633063
Auftrag: 27	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0759746332363244	Servicezeit am Silo: 0,0652432406633063

## Servicezeiten von Transportfahrzeug 2 in [h]

Auftrag: 3	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,083071076395909	Servicezeit am Silo: 0,0519135475583065
Auftrag: 8	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,083071076395909	Servicezeit am Silo: 0,0519135475583065
Auftrag: 13	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,083071076395909	Servicezeit am Silo: 0,0519135475583065
Auftrag: 17	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,083071076395909	Servicezeit am Silo: 0,0519135475583065
Auftrag: 24	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,083071076395909	Servicezeit am Silo: 0,0519135475583065
Auftrag: 29	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,083071076395909	Servicezeit am Silo: 0,0519135475583065

## Servicezeiten von Transportfahrzeug 3 in [h]

Auftrag: 2	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0834738257239218	Servicezeit am Silo: 0,0486916955357097
Auftrag: 7	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0834738257239218	Servicezeit am Silo: 0,0486916955357097
Auftrag: 12	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0834738257239218	Servicezeit am Silo: 0,0486916955357097
Auftrag: 16	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0834738257239218	Servicezeit am Silo: 0,0486916955357097
Auftrag: 21	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0834738257239218	Servicezeit am Si: 0,0486916955357097
Auftrag: 23	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0834738257239218	Servicezeit am Silo: 0,0486916955357097
Auftrag: 28	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0834738257239218	Servicezeit am Silo: 0,0486916955357097

## Servicezeiten von Transportfahrzeug 4 in [h]

Auftrag: 4	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0968692683736257	Servicezeit am Silo: 0,0702630159812429
Auftrag: 9	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0968692683736257	Servicezeit am Silo: 0,0702630159812429
Auftrag: 14	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0968692683736257	Servicezeit am Silo: 0,0702630159812429
Auftrag: 18	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0968692683736257	Servicezeit am Silo: 0,0702630159812429
Auftrag: 25	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0968692683736257	Servicezeit am Silo: 0,0702630159812429
Auftrag: 30	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0558501109480858	Servicezeit am Silo: 0,0405102400279535

## Servicezeiten von Transportfahrzeug 5 in [h]

Auftrag: 5	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,104924254933881	Servicezeit am Silo: 0,0628685552008695
Auftrag: 10	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,104924254933881	Servicezeit am Silo: 0,0628685552008695
Auftrag: 15	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,104924254933881	Servicezeit am Silo: 0,0628685552008695
Auftrag: 19	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,104924254933881	Servicezeit am Silo: 0,0628685552008695
Auftrag: 26	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,104924254933881	Servicezeit am Silo: 0,0628685552008695

Tabelle 92: Wartezeiten der Transportfahrzeuge am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 1)

## Wartezeiten von Transportfahrzeug 1 in [h]

Auftrag: 1	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 6	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 11	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 20	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,331770248175687	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 22	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 27	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0

## Wartezeiten von Transportfahrzeug 2 in [h]

Auftrag: 3	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 8	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,017458754113818	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 13	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 17	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 24	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,0567939820402259	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 29	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0

## Wartezeiten von Transportfahrzeug 3 in [h]

Auftrag: 2	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 7	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,00773813127051071	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 12	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,0296321889305595	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 16	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 21	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 23	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 28	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0

## Wartezeiten von Transportfahrzeug 4 in [h]

Auftrag: 4	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 9	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 14	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 18	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 25	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,0363229384089259	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 30	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0

## Wartezeiten von Transportfahrzeug 5 in [h]

Auftrag: 5	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 10	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 15	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 19	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 26	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0

Tabelle 93: Wartezeiten des Feldhäckslers (Berechnung 1)

Wartezeiten des Feldhäckslers in [h] bezüglich des optimalen Serviceauftrags

Auftrag: 1	Wartezeit: 0
Auftrag: 6	Wartezeit: 0
Auftrag: 11	Wartezeit: 0,0210192859621685
Auftrag: 20	Wartezeit: 0,0271014270582093
Auftrag: 22	Wartezeit: 0,415600969915694
Auftrag: 27	Wartezeit: 0,525333686783782
Auftrag: 3	Wartezeit: 0
Auftrag: 8	Wartezeit: 0
Auftrag: 13	Wartezeit: 0,0347787365683843
Auftrag: 17	Wartezeit: 0,112773935679506
Auftrag: 24	Wartezeit: 0,0762121661859112
Auftrag: 29	Wartezeit: 0,224506354643175
Auftrag: 2	Wartezeit: 0
Auftrag: 7	Wartezeit: 0
Auftrag: 12	Wartezeit: 0,0210192859621685
Auftrag: 16	Wartezeit: 0,0974663258973294
Auftrag: 21	Wartezeit: 0,132248787921821
Auftrag: 23	Wartezeit: 0,561998750688669
Auftrag: 28	Wartezeit: 0,564123791083961
Auftrag: 4	Wartezeit: 0
Auftrag: 9	Wartezeit: 0,015106796983865
Auftrag: 14	Wartezeit: 0,0445442680907888
Auftrag: 18	Wartezeit: 0,13202568199209
Auftrag: 25	Wartezeit: 0,0762121661859112
Auftrag: 30	Wartezeit: 0,251727320091
Auftrag: 5	Wartezeit: 0
Auftrag: 10	Wartezeit: 0,0194454135263946
Auftrag: 15	Wartezeit: 0,0831494182444033
Auftrag: 19	Wartezeit: 0,208223421158145
Auftrag: 26	Wartezeit: 0,19366032526133

Tabelle 94: Feldfahrzeiten vom Schlagrand zum Feldhäcksler und vice versa (Berechnung 2)

Feldfahrzeit zu Auftrag 1 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,028852612314041
Fahrt zum Feldhäcksler: 0		
Feldfahrzeit zu Auftrag 2 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,00840709375055989
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,028852612314041		
Feldfahrzeit zu Auftrag 3 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,026337752584053
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,00840709375055989		
Feldfahrzeit zu Auftrag 4 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,00507465476625494
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,026337752584053		
Feldfahrzeit zu Auftrag 5 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0323439066035182
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,00507465476625494		
Feldfahrzeit zu Auftrag 6 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0116528759237384
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0323439066035182		
Feldfahrzeit zu Auftrag 7 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0251979992449836
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0116528759237384		
Feldfahrzeit zu Auftrag 8 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0167355382542865
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0251979992449836		
Feldfahrzeit zu Auftrag 9 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0297895512692625
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0167355382542865		
Feldfahrzeit zu Auftrag 10 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0132951134833302
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0297895512692625		
Feldfahrzeit zu Auftrag 11 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0244725165038044
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0132951134833302		
Feldfahrzeit zu Auftrag 12 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0230088234424249
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0244725165038044		
Feldfahrzeit zu Auftrag 13 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,020648967213230
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0230088234424249		
Feldfahrzeit zu Auftrag 14 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0209830006666549
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0206489672132302		
Feldfahrzeit zu Auftrag 15 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0253505783762117
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0209830006666549		
Feldfahrzeit zu Auftrag 16 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0288678380326733
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0253505783762117		
Feldfahrzeit zu Auftrag 17 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,016895981457091
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0288678380326733		
Feldfahrzeit zu Auftrag 18 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0352571165717565
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,016895981457091		
Feldfahrzeit zu Auftrag 19 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0201829906248862
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0352571165717565		
Feldfahrzeit zu Auftrag 20 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0331233080093352
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0201829906248862		
Feldfahrzeit zu Auftrag 21 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0135572662988418
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0331233080093352		
Feldfahrzeit zu Auftrag 22 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0270051782198098
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0135572662988418		
Feldfahrzeit zu Auftrag 23 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0255676301089392
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0270051782198098		
Feldfahrzeit zu Auftrag 24 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0131631193527937
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0255676301089392		
Feldfahrzeit zu Auftrag 25 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0213579441864238
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0131631193527937		
Feldfahrzeit zu Auftrag 26 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0275630030737152
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0213579441864238		
Feldfahrzeit zu Auftrag 27 in [h]		Fahrt zum Schlagrand: 0,0195850574849774
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0275630030737152		

Tabelle 95: Früheste und späteste optimale Ankunftszeiten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 2)

## Optimale Ankunftszeiten am Schlag und Silo in [h]

Auftrag: 1	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 17,99861 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,00361
Auftrag: 1	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,2659538210623 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,2709538210623
Auftrag: 2	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,0832679087483 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,0882679087483
Auftrag: 2	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,3379767980762 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,3429767980762
Auftrag: 3	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,1758197043256 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,1808197043256
Auftrag: 3	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,4430404452295 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,4480404452295
Auftrag: 4	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,2727211926455 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,2777211926455
Auftrag: 4	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,553034903745 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,558034903745
Auftrag: 5	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,3887935489787 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,3937935489787
Auftrag: 5	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,666484089467 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,671484089467
Auftrag: 6	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,4883531828635 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,4933531828635
Auftrag: 6	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,7384972675355 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,7434972675355
Auftrag: 7	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,5730110916118 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,5780110916118
Auftrag: 7	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,8445108864341 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,8495108864341
Auftrag: 8	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,6655628871891 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,6705628871891
Auftrag: 8	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,9231814137633 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,9281814137633
Auftrag: 9	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,762464375509 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,767464375509
Auftrag: 9	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,0674929831115 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,0724929831115
Auftrag: 10	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,8785367318422 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,8835367318422
Auftrag: 10	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,1371784792103 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,1421784792103
Auftrag: 11	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,978096365727 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,983096365727
Auftrag: 11	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,2410600909791 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,2460600909791
Auftrag: 12	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,0627542744753 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,0677542744753
Auftrag: 12	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,332064893495 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,337064893495
Auftrag: 13	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,1553060700526 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,1603060700526
Auftrag: 13	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,4168380255857 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,4218380255857
Auftrag: 14	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,2522075583725 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,2572075583725
Auftrag: 14	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,5484296153724 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,5534296153724
Auftrag: 15	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,3682799147057 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,3732799147057
Auftrag: 15	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,6389771269667 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,6439771269667
Auftrag: 16	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,4678395485905

## Optimale Ankunftszeiten am Schlag und Silo in [h]

	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,4728395485905
Auftrag: 16	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,7351985953715
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,7401985953714
Auftrag: 17	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,5524974573388
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,5574974573388
Auftrag: 17	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,8156952343732
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,8206952343732
Auftrag: 18	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,6450492529161
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,6500492529161
Auftrag: 18	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,9211893578077
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,9261893578077
Auftrag: 19	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,741950741236
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,746950741236
Auftrag: 19	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,0373727881941
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,0423727881941
Auftrag: 20	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,8580230975692
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,8630230975692
Auftrag: 20	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,1364930394633
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,1414930394633
Auftrag: 21	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,957582731454
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,962582731454
Auftrag: 21	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,2096312065011
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,2146312065011
Auftrag: 22	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,0422406402023
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,0472406402023
Auftrag: 22	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,3155476139994
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,3205476139994
Auftrag: 23	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,1347924357796
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,1397924357796
Auftrag: 23	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,4012430542084
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,4062430542084
Auftrag: 24	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,2316939240995
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,2366939240995
Auftrag: 24	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,4911588390296
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,4961588390296
Auftrag: 25	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,3242457196768
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,3292457196768
Auftrag: 25	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,5864866521831
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,5914866521831
Auftrag: 26	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,4211472079967
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,4261472079967
Auftrag: 26	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,7239492674037
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,7289492674037
Auftrag: 27	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,4859464124654
	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,4909464124654
Auftrag: 27	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,7161176744191
	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,7211176744191

Tabelle 96: Abfahrtszeiten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 2)

## Abfahrtszeiten von Transportfahrzeug 1 in [h]

Auftrag: 1	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,0832679087483	Abfahrtszeit am Silo: 18,338653827357
Auftrag: 6	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,5730110916118	Abfahrtszeit am Silo: 18,8111972738302
Auftrag: 11	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,0627542744753	Abfahrtszeit am Silo: 19,3137600972738
Auftrag: 16	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,5704245281521	Abfahrtszeit am Silo: 19,8258256724795
Auftrag: 21	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,1018234513983	Abfahrtszeit am Silo: 20,3419140239918

## Abfahrtszeiten von Transportfahrzeug 2 in [h]

Auftrag: 2	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,1758197043256	Abfahrtszeit am Silo: 18,3958151246005
Auftrag: 7	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,6655628871891	Abfahrtszeit am Silo: 18,9023492129584
Auftrag: 12	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,1553060700526	Abfahrtszeit am Silo: 19,3899032200193
Auftrag: 17	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,6629763237295	Abfahrtszeit am Silo: 19,8914606317108
Auftrag: 22	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,1943752469756	Abfahrtszeit am Silo: 20,4329687517197
Auftrag: 24	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,754153375572	Abfahrtszeit am Silo: 20,9789048214491

## Abfahrtszeiten von Transportfahrzeug 3 in [h]

Auftrag: 3	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,2727211926455	Abfahrtszeit am Silo: 18,4995647236522
Auftrag: 8	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,762464375509	Abfahrtszeit am Silo: 18,979705692186
Auftrag: 13	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,2522075583725	Abfahrtszeit am Silo: 19,4733623040084
Auftrag: 18	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,7598778120493	Abfahrtszeit am Silo: 19,9956407070438
Auftrag: 23	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,2912767352955	Abfahrtszeit am Silo: 20,5173501438271
Auftrag: 25	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,8510548638918	Abfahrtszeit am Silo: 21,072918586501

## Abfahrtszeiten von Transportfahrzeug 4 in [h]

Auftrag: 5	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,4883531828635	Abfahrtszeit am Silo: 18,7386985313037
Auftrag: 10	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,978096365727	Abfahrtszeit am Silo: 19,209392921047
Auftrag: 15	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,4857666194039	Abfahrtszeit am Silo: 19,7291186396168
Auftrag: 20	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,01716554265	Abfahrtszeit am Silo: 20,268290292496
Auftrag: 27	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,6616015799947	Abfahrtszeit am Silo: 20,8739749980002

## Abfahrtszeiten von Transportfahrzeug 5 in [h]

Auftrag: 4	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,3887935489787	Abfahrtszeit am Silo: 18,6225831826061
Auftrag: 9	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,8785367318422	Abfahrtszeit am Silo: 19,1370412619726
Auftrag: 14	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,3862069855191	Abfahrtszeit am Silo: 19,6359049650468
Auftrag: 19	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,9176059087652	Abfahrtszeit am Silo: 20,1665038782512
Auftrag: 26	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,5968023755259	Abfahrtszeit am Silo: 20,8530803574607

Tabelle 97: Ankunftszeiten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 2)

## Ankunftszeiten von Transportfahrzeug 1 in [h]

Auftrag: 1	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 17,3684028	Ankunftszeit am Silo: 18,2659538210623
Auftrag: 6	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 18,4794005339605	Ankunftszeit am Silo: 18,7384972675355
Auftrag: 11	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 18,9328951873135	Ankunftszeit am Silo: 19,2410600909791
Auftrag: 16	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,4654405464633	Ankunftszeit am Silo: 19,7531256661848
Auftrag: 21	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,0090075208714	Ankunftszeit am Silo: 20,2692140176971

## Ankunftszeiten von Transportfahrzeug 2 in [h]

Auftrag: 2	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 17,407241512314	Ankunftszeit am Silo: 18,3379767980762
Auftrag: 7	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 18,5258569005242	Ankunftszeit am Silo: 18,8445108864341
Auftrag: 12	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,0452106294622	Ankunftszeit am Silo: 19,332064893495
Auftrag: 17	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,5550870288653	Ankunftszeit am Silo: 19,8336223051866
Auftrag: 22	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,0650625383923	Ankunftszeit am Silo: 20,3751304251954
Auftrag: 24	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,6616015799947	Ankunftszeit am Silo: 20,9210664949248

## Ankunftszeiten von Transportfahrzeug 3 in [h]

Auftrag: 3	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 17,3846570937506	Ankunftszeit am Silo: 18,4430404452295
Auftrag: 8	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 18,6410127228972	Ankunftszeit am Silo: 18,9231814137633
Auftrag: 13	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,1189645156284	Ankunftszeit am Silo: 19,4168380255857
Auftrag: 18	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,62443353562789	Ankunftszeit am Silo: 19,9391164286211
Auftrag: 23	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,1805516256462	Ankunftszeit am Silo: 20,4608258654044
Auftrag: 25	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,754153375572	Ankunftszeit am Silo: 21,0163943080783

## Ankunftszeiten von Transportfahrzeug 4 in [h]

Auftrag: 5	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 17,3604079847663	Ankunftszeit am Silo: 18,666484089467
Auftrag: 10	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 18,863821412573	Ankunftszeit am Silo: 19,1371784792103
Auftrag: 15	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,343636322527	Ankunftszeit am Silo: 19,6569041977801
Auftrag: 20	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,8862907006243	Ankunftszeit am Silo: 20,1960758506593
Auftrag: 27	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,4424597774343	Ankunftszeit am Silo: 20,8269736374796

## Ankunftszeiten von Transportfahrzeug 5 in [h]

Auftrag: 4	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 17,3987821525841	Ankunftszeit am Silo: 18,553034903745
Auftrag: 9	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 18,7517631208604	Ankunftszeit am Silo: 19,0674929831115
Auftrag: 14	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,2701346291858	Ankunftszeit am Silo: 19,5663566861858
Auftrag: 19	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,801533552432	Ankunftszeit am Silo: 20,0969555993901
Auftrag: 26	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,3419619628203	Ankunftszeit am Silo: 20,7835320785996

Tabelle 98: Kapazitäten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 2)

Transportfahrzeug 1, Kapazität in [t]: 10,51

Auftrag: 1	Beladung am Feldhäcksler: 10,51	Entladung am Silo: 10,51
Auftrag: 6	Beladung am Feldhäcksler: 10,51	Entladung am Silo: 10,51
Auftrag: 11	Beladung am Feldhäcksler: 10,51	Entladung am Silo: 10,51
Auftrag: 16	Beladung am Feldhäcksler: 10,51	Entladung am Silo: 10,51
Auftrag: 21	Beladung am Feldhäcksler: 10,51	Entladung am Silo: 10,51

Transportfahrzeug 2, Kapazität in [t]: 11,49

Auftrag: 2	Beladung am Feldhäcksler: 11,49	Entladung am Silo: 11,49
Auftrag: 7	Beladung am Feldhäcksler: 11,49	Entladung am Silo: 11,49
Auftrag: 12	Beladung am Feldhäcksler: 11,49	Entladung am Silo: 11,49
Auftrag: 17	Beladung am Feldhäcksler: 11,49	Entladung am Silo: 11,49
Auftrag: 22	Beladung am Feldhäcksler: 11,49	Entladung am Silo: 11,49
Auftrag: 24	Beladung am Feldhäcksler: 11,49	Entladung am Silo: 11,49

Transportfahrzeug 3, Kapazität in [t]: 12,03

Auftrag: 3	Beladung am Feldhäcksler: 12,03	Entladung am Silo: 12,03
Auftrag: 8	Beladung am Feldhäcksler: 12,03	Entladung am Silo: 12,03
Auftrag: 13	Beladung am Feldhäcksler: 12,03	Entladung am Silo: 12,03
Auftrag: 18	Beladung am Feldhäcksler: 12,03	Entladung am Silo: 12,03
Auftrag: 23	Beladung am Feldhäcksler: 12,03	Entladung am Silo: 12,03
Auftrag: 25	Beladung am Feldhäcksler: 12,03	Entladung am Silo: 12,03

Transportfahrzeug 4, Kapazität in [t]: 12,36

Auftrag: 5	Beladung am Feldhäcksler: 12,36	Entladung am Silo: 12,36
Auftrag: 10	Beladung am Feldhäcksler: 12,36	Entladung am Silo: 12,36
Auftrag: 15	Beladung am Feldhäcksler: 12,36	Entladung am Silo: 12,36
Auftrag: 20	Beladung am Feldhäcksler: 12,36	Entladung am Silo: 12,36
Auftrag: 27	Beladung am Feldhäcksler: 12,36	Entladung am Silo: 12,36

Transportfahrzeug 5, Kapazität in [t]: 14,41

Auftrag: 4	Beladung am Feldhäcksler: 14,41	Entladung am Silo: 14,41
Auftrag: 9	Beladung am Feldhäcksler: 14,41	Entladung am Silo: 14,41
Auftrag: 14	Beladung am Feldhäcksler: 14,41	Entladung am Silo: 14,41
Auftrag: 19	Beladung am Feldhäcksler: 14,41	Entladung am Silo: 14,41
Auftrag: 26	Beladung am Feldhäcksler: 14,41	Entladung am Silo: 14,41

Tabelle 99: Servicebeginnzeiten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 2)

## Servicebeginnzeiten von Transportfahrzeug 1 in [h]

Auftrag: 1	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 17,99861 Servicebeginnzeit am Silo: 18,2659538210623
Auftrag: 6	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,4883531828635 Servicebeginnzeit am Silo: 18,7384972675355
Auftrag: 11	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,978096365727 Servicebeginnzeit am Silo: 19,2410600909791
Auftrag: 16	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,4857666194039 Servicebeginnzeit am Silo: 19,7531256661848
Auftrag: 21	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,01716554265 Servicebeginnzeit am Silo: 20,2692140176971

## Servicebeginnzeiten von Transportfahrzeug 2 in [h]

Auftrag: 2	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,0832679087483 Servicebeginnzeit am Silo: 18,3379767980762
Auftrag: 7	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,5730110916118 Servicebeginnzeit am Silo: 18,8445108864341
Auftrag: 12	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,0627542744753 Servicebeginnzeit am Silo: 19,332064893495
Auftrag: 17	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,5704245281521 Servicebeginnzeit am Silo: 19,8336223051866
Auftrag: 22	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,1018234513983 Servicebeginnzeit am Silo: 20,3751304251954
Auftrag: 24	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,6616015799947 Servicebeginnzeit am Silo: 20,9210664949248

## Servicebeginnzeiten von Transportfahrzeug 3 in [h]

Auftrag: 3	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,1758197043256 Servicebeginnzeit am Silo: 18,4430404452295
Auftrag: 8	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,6655628871891 Servicebeginnzeit am Silo: 18,9231814137633
Auftrag: 13	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,1553060700526 Servicebeginnzeit am Silo: 19,4168380255857
Auftrag: 18	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,6629763237295 Servicebeginnzeit am Silo: 19,9391164286211
Auftrag: 23	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,1943752469756 Servicebeginnzeit am Silo: 20,4608258654044
Auftrag: 25	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,754153375572 Servicebeginnzeit am Silo: 21,0163943080783

## Servicebeginnzeiten von Transportfahrzeug 4 in [h]

Auftrag: 5	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,3887935489787 Servicebeginnzeit am Silo: 18,666484089467
Auftrag: 10	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,8785367318422 Servicebeginnzeit am Silo: 19,1371784792103
Auftrag: 15	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,3862069855191 Servicebeginnzeit am Silo: 19,6569041977801
Auftrag: 20	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,9176059087652 Servicebeginnzeit am Silo: 20,1960758506593
Auftrag: 27	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,5968023755259 Servicebeginnzeit am Silo: 20,8269736374796

## Servicebeginnzeiten von Transportfahrzeug 5 in [h]

Auftrag: 4	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,2727211926455
------------	---

Auftrag: 9      Servicebeginnzeit am Silo: 18,553034903745  
                  Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,762464375509  
                  Servicebeginnzeit am Silo: 19,0674929831115  
Auftrag: 14      Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,2701346291858  
                  Servicebeginnzeit am Silo: 19,5663566861858  
Auftrag: 19      Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,801533552432  
                  Servicebeginnzeit am Silo: 20,0969555993901  
Auftrag: 26      Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,4807300191927  
                  Servicebeginnzeit am Silo: 20,7835320785996

Tabelle 100: Servicezeiten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 2)

## Servicezeiten von Transportfahrzeug 1 in [h]

Auftrag: 1	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0846579087482793	Servicezeit am Silo: 0,0727000062946723
Auftrag: 6	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0846579087482793	Servicezeit am Silo: 0,0727000062946723
Auftrag: 11	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0846579087482793	Servicezeit am Silo: 0,0727000062946723
Auftrag: 16	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0846579087482793	Servicezeit am Silo: 0,0727000062946723
Auftrag: 21	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0846579087482793	Servicezeit am Silo: 0,0727000062946723

## Servicezeiten von Transportfahrzeug 2 in [h]

Auftrag: 2	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0925517955773291	Servicezeit am Silo: 0,057838326524284
Auftrag: 7	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0925517955773291	Servicezeit am Silo: 0,057838326524284
Auftrag: 12	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0925517955773291	Servicezeit am Silo: 0,057838326524284
Auftrag: 17	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0925517955773291	Servicezeit am Silo: 0,057838326524284
Auftrag: 22	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0925517955773291	Servicezeit am Silo: 0,057838326524284
Auftrag: 24	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0925517955773291	Servicezeit am Silo: 0,057838326524284

## Servicezeiten von Transportfahrzeug 3 in [h]

Auftrag: 3	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0969014883198667	Servicezeit am Silo: 0,0565242784227142
Auftrag: 8	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0969014883198667	Servicezeit am Silo: 0,0565242784227142
Auftrag: 13	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0969014883198667	Servicezeit am Silo: 0,0565242784227142
Auftrag: 18	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0969014883198667	Servicezeit am Silo: 0,0565242784227142
Auftrag: 23	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0969014883198667	Servicezeit am Silo: 0,0565242784227142
Auftrag: 25	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0969014883198667	Servicezeit am Silo: 0,0565242784227142

## Servicezeiten von Transportfahrzeug 4 in [h]

Auftrag: 5	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0995596338847509	Servicezeit am Silo: 0,0722144418367007
Auftrag: 10	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0995596338847509	Servicezeit am Silo: 0,0722144418367007
Auftrag: 15	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0995596338847509	Servicezeit am Silo: 0,0722144418367007
Auftrag: 20	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0995596338847509	Servicezeit am Silo: 0,0722144418367007
Auftrag: 27	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,0647992044687271	Servicezeit am Silo: 0,0470013605205258

## Servicezeiten von Transportfahrzeug 5 in [h]

Auftrag: 4	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,116072356333273	Servicezeit am Silo: 0,0695482788610878
Auftrag: 9	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,116072356333273	Servicezeit am Silo: 0,0695482788610878
Auftrag: 14	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,116072356333273	Servicezeit am Silo: 0,0695482788610878
Auftrag: 19	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,116072356333273	Servicezeit am Silo: 0,0695482788610878
Auftrag: 26	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,116072356333273	Servicezeit am Silo: 0,0695482788610878

Tabelle 101: Wartezeiten der Transportfahrzeuge am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 2)

## Wartezeiten von Transportfahrzeug 1 in [h]

Auftrag: 1	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 6	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,00895264890298719	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 11	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,0452011784134783	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 16	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,0203260729405308	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 21	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,00815802177854152	Wartezeit am Silo: 0

## Wartezeiten von Transportfahrzeug 2 in [h]

Auftrag: 2	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 7	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,0471541910875857	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 12	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,0175436450130988	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 17	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,0153374992867867	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 22	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,0367609130059527	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 24	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0

## Wartezeiten von Transportfahrzeug 3 in [h]

Auftrag: 3	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 8	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,0245501642918811	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 13	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,0363415544242081	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 18	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,0385409674506008	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 23	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,0138236213293546	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 25	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0

## Wartezeiten von Transportfahrzeug 4 in [h]

Auftrag: 5	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 10	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,0147153192692677	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 15	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,0425706629920626	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 20	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,0313152081409491	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 27	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,154342598091645	Wartezeit am Silo: 0

## Wartezeiten von Transportfahrzeug 5 in [h]

Auftrag: 4	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 9	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,0107012546485983	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 14	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 19	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 26	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,138768056372392	Wartezeit am Silo: 0

Tabelle 102: Wartezeiten des Feldhäckslers (Berechnung 2)

Wartezeiten des Feldhäckslers in [h] bezüglich des optimalen Serviceauftrags

Auftrag: 1	Wartezeit: 0
Auftrag: 6	Wartezeit: 0
Auftrag: 11	Wartezeit: 0
Auftrag: 16	Wartezeit: 0,0129270708133582
Auftrag: 21	Wartezeit: 0,0545828111959885
Auftrag: 2	Wartezeit: 0
Auftrag: 7	Wartezeit: 0
Auftrag: 12	Wartezeit: 0
Auftrag: 17	Wartezeit: 0,0129270708133582
Auftrag: 22	Wartezeit: 0,0545828111959885
Auftrag: 24	Wartezeit: 0,424907655895183
Auftrag: 3	Wartezeit: 0
Auftrag: 8	Wartezeit: 0
Auftrag: 13	Wartezeit: 0
Auftrag: 18	Wartezeit: 0,0129270708133582
Auftrag: 23	Wartezeit: 0,0545828111959885
Auftrag: 25	Wartezeit: 0,424907655895183
Auftrag: 5	Wartezeit: 0
Auftrag: 10	Wartezeit: 0
Auftrag: 15	Wartezeit: 0,0129270708133582
Auftrag: 20	Wartezeit: 0,0545828111959885
Auftrag: 27	Wartezeit: 0,105855963060534
Auftrag: 4	Wartezeit: 0
Auftrag: 9	Wartezeit: 0
Auftrag: 14	Wartezeit: 0,0129270708133582
Auftrag: 19	Wartezeit: 0,0545828111959885
Auftrag: 26	Wartezeit: 0,0545828111959885

Tabelle 103: Feldfahrzeiten vom Schlagrand zum Feldhäcksler und vice versa (Berechnung 3)

Feldfahrzeit zu Auftrag 1 in [h]		
Fahrt zum Feldhäcksler: 0		Fahrt zum Schlagrand: 0,0204620076369361
Feldfahrzeit zu Auftrag 2 in [h]		
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0204620076369361		Fahrt zum Schlagrand: 0,0213373959271481
Feldfahrzeit zu Auftrag 3 in [h]		
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0213373959271481		Fahrt zum Schlagrand: 0,0061017550525381
Feldfahrzeit zu Auftrag 4 in [h]		
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0061017550525381		Fahrt zum Schlagrand: 0,020761633725776
Feldfahrzeit zu Auftrag 5 in [h]		
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,020761633725776		Fahrt zum Schlagrand: 0,0324417591587702
Feldfahrzeit zu Auftrag 6 in [h]		
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0324417591587702		Fahrt zum Schlagrand: 0,00513914439846641
Feldfahrzeit zu Auftrag 7 in [h]		
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,00513914439846641		Fahrt zum Schlagrand: 0,0231877109775313
Feldfahrzeit zu Auftrag 8 in [h]		
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0231877109775313		Fahrt zum Schlagrand: 0,0290944677920787
Feldfahrzeit zu Auftrag 9 in [h]		
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0290944677920787		Fahrt zum Schlagrand: 0,0154323789171078
Feldfahrzeit zu Auftrag 10 in [h]		
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0154323789171078		Fahrt zum Schlagrand: 0,0177395260783923
Feldfahrzeit zu Auftrag 11 in [h]		
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0177395260783923		Fahrt zum Schlagrand: 0,0347566546821734
Feldfahrzeit zu Auftrag 12 in [h]		
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0347566546821734		Fahrt zum Schlagrand: 0,0150039546139378
Feldfahrzeit zu Auftrag 13 in [h]		
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0150039546139378		Fahrt zum Schlagrand: 0,026742995777567
Feldfahrzeit zu Auftrag 14 in [h]		
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,026742995777567		Fahrt zum Schlagrand: 0,042751175874732
Feldfahrzeit zu Auftrag 15 in [h]		
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,042751175874732		Fahrt zum Schlagrand: 0,022449792461662
Feldfahrzeit zu Auftrag 16 in [h]		
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,022449792461662		Fahrt zum Schlagrand: 0,0104584443186156
Feldfahrzeit zu Auftrag 17 in [h]		
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0104584443186156		Fahrt zum Schlagrand: 0,0151632620155554
Feldfahrzeit zu Auftrag 18 in [h]		
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0151632620155554		Fahrt zum Schlagrand: 0,0146709140939235
Feldfahrzeit zu Auftrag 19 in [h]		
Fahrt zum Feldhäcksler: 0,0146709140939235		Fahrt zum Schlagrand: 0,0195850575031137

Tabelle 104: Früheste und späteste optimale Ankunftszeiten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 3)

## Optimale Ankunftszeiten am Schlag und Silo in [h]

Auftrag: 1	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 17,99861 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,00361
Auftrag: 1	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,3043379719038 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,3093379719038
Auftrag: 2	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,1398944642669 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,1448944642669
Auftrag: 2	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,4329901634361 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,4379901634361
Auftrag: 3	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,257819467509 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,262819467509
Auftrag: 3	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,5455844091384 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,5505844091384
Auftrag: 4	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,3857326540858 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,3907326540858
Auftrag: 4	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,7257941206295 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,7307941206295
Auftrag: 5	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,5458657869037 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,5508657869037
Auftrag: 5	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,8635735103294 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,8685735103294
Auftrag: 6	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,6871502511706 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,6921502511706
Auftrag: 6	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,9640476988112 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 18,9690476988112
Auftrag: 7	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,8050752544127 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,8100752544127
Auftrag: 7	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,117589825894 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,122589825894
Auftrag: 8	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,9486151149165 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 18,9536151149165
Auftrag: 8	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,2593727692854 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,2643727692854
Auftrag: 9	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,0765283014933 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,0815283014933
Auftrag: 9	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,4112605132283 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,4162605132283
Auftrag: 10	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,2366614343112 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,2416614343112
Auftrag: 10	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,5396669246564 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,5446669246564
Auftrag: 11	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,3779458985781 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,3829458985781
Auftrag: 11	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,6844608565024 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,6894608565024
Auftrag: 12	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,4958709018202 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,5008709018202
Auftrag: 12	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,8002017169379 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,8052017169379
Auftrag: 13	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,6394107623239 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,6444107623239
Auftrag: 13	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,9478169446783 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 19,9528169446783
Auftrag: 14	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,7673239489008 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,7723239489008
Auftrag: 14	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,1293749575934 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,1343749575934
Auftrag: 15	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,9274570817186 Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 19,9324570817186
Auftrag: 15	Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,2351728384472 Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,2401728384472
Auftrag: 16	Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,0687415459855

Optimale Ankunftszeiten am Schlag und Silo in [h]

Auftrag: 16	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,0737415459855 Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,3509582935463
Auftrag: 17	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,3559582935463 Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,1866665492276
Auftrag: 17	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,1916665492276 Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,4911566717469
Auftrag: 18	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,4961566717469 Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,3302064097314
Auftrag: 18	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,3352064097314 Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,6265405104022
Auftrag: 19	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,6315405104022 Früheste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,4741055822759
Auftrag: 19	Späteste optimale Ankunftszeit am Schlag: 20,4791055822759 Früheste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,7967565123235
Auftrag: 19	Späteste optimale Ankunftszeit am Silo: 20,8017565123235

Tabelle 105: Abfahrtszeiten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 3)

## Abfahrtszeiten von Transportfahrzeug 1 in [h]

Auftrag: 2	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,257819467509	Abfahrtszeit am Silo: 18,534258297799
Auftrag: 6	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,8050752544127	Abfahrtszeit am Silo: 19,0653158331741
Auftrag: 11	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,4958709018202	Abfahrtszeit am Silo: 19,7857289908652
Auftrag: 16	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,1866665492276	Abfahrtszeit am Silo: 20,4522264279092

## Abfahrtszeiten von Transportfahrzeug 2 in [h]

Auftrag: 3	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,3857326540858	Abfahrtszeit am Silo: 18,6255211041084
Auftrag: 8	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,0765283014933	Abfahrtszeit am Silo: 19,3393094642554
Auftrag: 13	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,7673239489008	Abfahrtszeit am Silo: 20,0277536396484
Auftrag: 18	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,4581195963082	Abfahrtszeit am Silo: 20,7064772053722

## Abfahrtszeiten von Transportfahrzeug 3 in [h]

Auftrag: 1	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,1398944642669	Abfahrtszeit am Silo: 18,3867515914827
Auftrag: 5	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,6871502511706	Abfahrtszeit am Silo: 18,9459871299083
Auftrag: 10	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,3779458985781	Abfahrtszeit am Silo: 19,6220805442354
Auftrag: 15	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,0687415459855	Abfahrtszeit am Silo: 20,3175864580261

## Abfahrtszeiten von Transportfahrzeug 4 in [h]

Auftrag: 7	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,9486151149165	Abfahrtszeit am Silo: 19,2217048221343
Auftrag: 12	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,6394107623239	Abfahrtszeit am Silo: 19,9043167131782
Auftrag: 17	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,3302064097314	Abfahrtszeit am Silo: 20,5952716679872

## Abfahrtszeiten von Transportfahrzeug 5 in [h]

Auftrag: 4	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 18,5458657869037	Abfahrtszeit am Silo: 18,8217427523962
Auftrag: 9	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,2366614343112	Abfahrtszeit am Silo: 19,507209144995
Auftrag: 14	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 19,9274570817186	Abfahrtszeit am Silo: 20,2253235893601
Auftrag: 19	Abfahrtszeit am Feldhäcksler: 20,6180047548203	Abfahrtszeit am Silo: 20,8829780709255

Tabelle 106: Ankunftszeiten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 3)

## Ankunftszeiten von Transportfahrzeug 1 in [h]

Auftrag: 2	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 17,3888648076369	Ankunftszeit am Silo: 18,4329901634361
Auftrag: 6	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 18,6751028569578	Ankunftszeit am Silo: 18,9640476988112
Auftrag: 11	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,1914581592525	Ankunftszeit am Silo: 19,6844608565024
Auftrag: 16	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,9165815833269	Ankunftszeit am Silo: 20,3509582935463

## Ankunftszeiten von Transportfahrzeug 2 in [h]

Auftrag: 3	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 17,3997262959271	Ankunftszeit am Silo: 18,5455844091384
Auftrag: 8	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 18,7670977150859	Ankunftszeit am Silo: 19,2593727692854
Auftrag: 13	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,4727023188694	Ankunftszeit am Silo: 19,9478169446783
Auftrag: 18	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,1613058016639	Ankunftszeit am Silo: 20,6265405104022

## Ankunftszeiten von Transportfahrzeug 3 in [h]

Auftrag: 1	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 17,37625	Ankunftszeit am Silo: 18,3043379719038
Auftrag: 5	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 18,5237632252085	Ankunftszeit am Silo: 18,8635735103294
Auftrag: 10	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,0776695088254	Ankunftszeit am Silo: 19,5396669246564
Auftrag: 15	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,7810817201101	Ankunftszeit am Silo: 20,2351728384472

## Ankunftszeiten von Transportfahrzeug 4 in [h]

Auftrag: 7	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 17,3604724743985	Ankunftszeit am Silo: 19,117589825894
Auftrag: 12	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,3517948068165	Ankunftszeit am Silo: 19,8002017169379
Auftrag: 17	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,0101084874968	Ankunftszeit am Silo: 20,4911566717469

## Ankunftszeiten von Transportfahrzeug 5 in [h]

Auftrag: 4	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 17,3785461550525	Ankunftszeit am Silo: 18,7257941206295
Auftrag: 9	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 18,9632816201883	Ankunftszeit am Silo: 19,4112605132283
Auftrag: 14	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 19,6463965407726	Ankunftszeit am Silo: 20,1293749575934
Auftrag: 19	Ankunftszeit am Feldhäcksler: 20,352438903454	Ankunftszeit am Silo: 20,7967565123235

Tabelle 107: Kapazitäten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 3)

Transportfahrzeug 1, Kapazität in [t]: 14,64

Auftrag: 2	Beladung am Feldhäcksler: 14,64	Entladung am Silo: 14,64
Auftrag: 6	Beladung am Feldhäcksler: 14,64	Entladung am Silo: 14,64
Auftrag: 11	Beladung am Feldhäcksler: 14,64	Entladung am Silo: 14,64
Auftrag: 16	Beladung am Feldhäcksler: 14,64	Entladung am Silo: 14,64

Transportfahrzeug 2, Kapazität in [t]: 15,88

Auftrag: 3	Beladung am Feldhäcksler: 15,88	Entladung am Silo: 15,88
Auftrag: 8	Beladung am Feldhäcksler: 15,88	Entladung am Silo: 15,88
Auftrag: 13	Beladung am Feldhäcksler: 15,88	Entladung am Silo: 15,88
Auftrag: 18	Beladung am Feldhäcksler: 15,88	Entladung am Silo: 15,88

Transportfahrzeug 3, Kapazität in [t]: 17,54

Auftrag: 1	Beladung am Feldhäcksler: 17,54	Entladung am Silo: 17,54
Auftrag: 5	Beladung am Feldhäcksler: 17,54	Entladung am Silo: 17,54
Auftrag: 10	Beladung am Feldhäcksler: 17,54	Entladung am Silo: 17,54
Auftrag: 15	Beladung am Feldhäcksler: 17,54	Entladung am Silo: 17,54

Transportfahrzeug 4, Kapazität in [t]: 17,82

Auftrag: 7	Beladung am Feldhäcksler: 17,82	Entladung am Silo: 17,82
Auftrag: 12	Beladung am Feldhäcksler: 17,82	Entladung am Silo: 17,82
Auftrag: 17	Beladung am Feldhäcksler: 17,82	Entladung am Silo: 17,82

Transportfahrzeug 5, Kapazität in [t]: 19,88

Auftrag: 4	Beladung am Feldhäcksler: 19,88	Entladung am Silo: 19,88
Auftrag: 9	Beladung am Feldhäcksler: 19,88	Entladung am Silo: 19,88
Auftrag: 14	Beladung am Feldhäcksler: 19,88	Entladung am Silo: 19,88
Auftrag: 19	Beladung am Feldhäcksler: 19,88	Entladung am Silo: 19,88

Tabelle 108: Servicebeginnzeiten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 3)

## Servicebeginnzeiten von Transportfahrzeug 1 in [h]

Auftrag: 2	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,1398944642669 Servicebeginnzeit am Silo: 18,4329901634361
Auftrag: 6	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,6871502511706 Servicebeginnzeit am Silo: 18,9640476988112
Auftrag: 11	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,3779458985781 Servicebeginnzeit am Silo: 19,6844608565024
Auftrag: 16	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,0687415459855 Servicebeginnzeit am Silo: 20,3509582935463

## Servicebeginnzeiten von Transportfahrzeug 2 in [h]

Auftrag: 3	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,257819467509 Servicebeginnzeit am Silo: 18,5455844091384
Auftrag: 8	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,9486151149165 Servicebeginnzeit am Silo: 19,2593727692854
Auftrag: 13	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,6394107623239 Servicebeginnzeit am Silo: 19,9478169446783
Auftrag: 18	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,3302064097314 Servicebeginnzeit am Silo: 20,6265405104022

## Servicebeginnzeiten von Transportfahrzeug 3 in [h]

Auftrag: 1	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 17,99861 Servicebeginnzeit am Silo: 18,3043379719038
Auftrag: 5	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,5458657869037 Servicebeginnzeit am Silo: 18,8635735103294
Auftrag: 10	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,2366614343112 Servicebeginnzeit am Silo: 19,5396669246564
Auftrag: 15	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,9274570817186 Servicebeginnzeit am Silo: 20,2351728384472

## Servicebeginnzeiten von Transportfahrzeug 4 in [h]

Auftrag: 7	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,8050752544127 Servicebeginnzeit am Silo: 19,117589825894
Auftrag: 12	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,4958709018202 Servicebeginnzeit am Silo: 19,8002017169379
Auftrag: 17	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,1866665492276 Servicebeginnzeit am Silo: 20,4911566717469

## Servicebeginnzeiten von Transportfahrzeug 5 in [h]

Auftrag: 4	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 18,3857326540858 Servicebeginnzeit am Silo: 18,7257941206295
Auftrag: 9	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,0765283014933 Servicebeginnzeit am Silo: 19,4112605132283
Auftrag: 14	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 19,7673239489008 Servicebeginnzeit am Silo: 20,1293749575934
Auftrag: 19	Servicebeginnzeit am Feldhäcksler: 20,4741055822759 Servicebeginnzeit am Silo: 20,7967565123235

Tabelle 109: Servicezeiten am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 3)

## Servicezeiten von Transportfahrzeug 1 in [h]

Auftrag: 2	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,117925003242132	Servicezeit am Silo: 0,101268134362893
Auftrag: 6	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,117925003242132	Servicezeit am Silo: 0,101268134362893
Auftrag: 11	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,117925003242132	Servicezeit am Silo: 0,101268134362893
Auftrag: 16	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,117925003242132	Servicezeit am Silo: 0,101268134362893

## Servicezeiten von Transportfahrzeug 2 in [h]

Auftrag: 3	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,127913186576848	Servicezeit am Silo: 0,0799366949700288
Auftrag: 8	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,127913186576848	Servicezeit am Silo: 0,0799366949700288
Auftrag: 13	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,127913186576848	Servicezeit am Silo: 0,0799366949700288
Auftrag: 18	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,127913186576848	Servicezeit am Silo: 0,0799366949700288

## Servicezeiten von Transportfahrzeug 3 in [h]

Auftrag: 1	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,141284464266871	Servicezeit am Silo: 0,08241361957892
Auftrag: 5	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,141284464266871	Servicezeit am Silo: 0,08241361957892
Auftrag: 10	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,141284464266871	Servicezeit am Silo: 0,08241361957892
Auftrag: 15	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,141284464266871	Servicezeit am Silo: 0,08241361957892

## Servicezeiten von Transportfahrzeug 4 in [h]

Auftrag: 7	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,143539860503743	Servicezeit am Silo: 0,104114996240292
Auftrag: 12	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,143539860503743	Servicezeit am Silo: 0,104114996240292
Auftrag: 17	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,143539860503743	Servicezeit am Silo: 0,104114996240292

## Servicezeiten von Transportfahrzeug 5 in [h]

Auftrag: 4	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,160133132817868	Servicezeit am Silo: 0,0959486317667193
Auftrag: 9	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,160133132817868	Servicezeit am Silo: 0,0959486317667193
Auftrag: 14	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,160133132817868	Servicezeit am Silo: 0,0959486317667193
Auftrag: 19	Servicezeit am Feldhäcksler: 0,143899172544479	Servicezeit am Silo: 0,0862215586020256

Tabelle 110: Wartezeiten der Transportfahrzeuge am Schlag (Feldhäcksler) und Silo (Berechnung 3)

## Wartezeiten von Transportfahrzeug 1 in [h]

Auftrag: 2	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 6	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,0120473942127788	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 11	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,186487739325582	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 16	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,152159962658605	Wartezeit am Silo: 0

## Wartezeiten von Transportfahrzeug 2 in [h]

Auftrag: 3	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 8	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,181517399830515	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 13	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,166708443454567	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 18	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,168900608067464	Wartezeit am Silo: 0

## Wartezeiten von Transportfahrzeug 3 in [h]

Auftrag: 1	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 5	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,0221025616952168	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 10	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,158991925485793	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 15	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,146375361608548	Wartezeit am Silo: 0

## Wartezeiten von Transportfahrzeug 4 in [h]

Auftrag: 7	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 12	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,144076095003726	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 17	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,176558061730876	Wartezeit am Silo: 0

## Wartezeiten von Transportfahrzeug 5 in [h]

Auftrag: 4	Wartezeit am Feldhäcksler: 0	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 9	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,113246681305018	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 14	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,120927408128196	Wartezeit am Silo: 0
Auftrag: 19	Wartezeit am Feldhäcksler: 0,12166667882185	Wartezeit am Silo: 0

Tabelle 111: Wartezeiten des Feldhäckslers (Berechnung 3)

Wartezeiten des Feldhäckslers in [h] bezüglich des optimalen Serviceauftrags

Auftrag: 2	Wartezeit: 0
Auftrag: 6	Wartezeit: 0
Auftrag: 11	Wartezeit: 0
Auftrag: 16	Wartezeit: 0
Auftrag: 3	Wartezeit: 0
Auftrag: 8	Wartezeit: 0
Auftrag: 13	Wartezeit: 0
Auftrag: 18	Wartezeit: 0
Auftrag: 1	Wartezeit: 0
Auftrag: 5	Wartezeit: 0
Auftrag: 10	Wartezeit: 0
Auftrag: 15	Wartezeit: 0
Auftrag: 7	Wartezeit: 0
Auftrag: 12	Wartezeit: 0
Auftrag: 17	Wartezeit: 0
Auftrag: 4	Wartezeit: 0
Auftrag: 9	Wartezeit: 0
Auftrag: 14	Wartezeit: 0
Auftrag: 19	Wartezeit: 0