



Veröffentlichungen der DGK

Ausschuss Geodäsie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

---

Reihe C

Dissertationen

Heft Nr. 800

**Ilka von GösseIn**

**Simulationsbasierte Effizienzoptimierung von Messprozessen  
am Beispiel der tachymetrischen Netzmessung**

**München 2017**

**Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften**

**ISSN 0065-5325**

**ISBN 978-3-7696-5212-3**

---

Diese Arbeit ist gleichzeitig veröffentlicht in:  
Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Universität Hannover  
ISSN 0174-1454, Nr. 333, Hannover 2017





Veröffentlichungen der DGK

Ausschuss Geodäsie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

---

Reihe C

Dissertationen

Heft Nr. 800

## Simulationsbasierte Effizienzoptimierung von Messprozessen am Beispiel der tachymetrischen Netzmessung

Von der Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie  
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover  
zur Erlangung des Grades  
Doktor-Ingenieurin (Dr.-Ing.)  
genehmigte Dissertation

Vorgelegt von

Dipl.-Ing. Ilka von Gösseln (geb. Rehr)

Geboren am 14.06.1980 in Winsen (Luhe)

München 2017

Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

---

ISSN 0065-5325

ISBN 978-3-7696-5212-3

Diese Arbeit ist gleichzeitig veröffentlicht in:  
Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Universität Hannover  
ISSN 0174-1454, Nr. 333, Hannover 2017

## Adresse der DGK:



### Ausschuss Geodäsie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften (DGK)

Alfons-Goppel-Straße 11 • D – 80 539 München  
Telefon +49 – 331 – 288 1685 • Telefax +49 – 331 – 288 1759  
E-Mail [post@dgk.badw.de](mailto:post@dgk.badw.de) • <http://www.dgk.badw.de>

#### Prüfungskommission:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Steffen Schön

Referent: Prof. Dr.-Ing. Ingo Neumann

Korreferenten: Prof. Dr.-Ing. habil. Hansjörg Kutterer  
Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schwieger  
Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Müller

Tag der mündlichen Prüfung: 24.03.2017

---

© 2017 Bayerische Akademie der Wissenschaften, München

Alle Rechte vorbehalten. Ohne Genehmigung der Herausgeber ist es auch nicht gestattet,  
die Veröffentlichung oder Teile daraus auf photomechanischem Wege (Photokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen

## Kurzfassung

Die drei Hauptkomponenten zur Beurteilung eines Messprozesses sind die Genauigkeit, die Zuverlässigkeit und die Wirtschaftlichkeit. Zur Beurteilung und Verbesserung der Messgenauigkeit und Zuverlässigkeit gibt es diverse Veröffentlichungen. Die Steigerung der Wirtschaftlichkeit wurde bisher hauptsächlich durch das Weglassen von Beobachtungen zu Lasten der Genauigkeit und Zuverlässigkeit realisiert. In dieser Arbeit wird der Fokus auf die Anordnung der Messungen und die dabei auszuführenden Tätigkeiten zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit gelegt. Der Beobachtungsplan wird dabei nicht verändert.

Grundlage für die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit ist die Bestimmung der Dauer und der Kosten der Messung. Die Dauer einer Messung wird in der Planungsphase vorwiegend mithilfe von Formeln berechnet, die als Variablen die Anzahl der Stand- und Zielpunkte haben. Diese Art der Modellierung ist recht starr und berücksichtigt nicht, dass Tätigkeiten zeitgleich durchgeführt werden können. Während einer tachymetrischen Netzmessung werden die Satzmessung und der Aufbau der Zielpunkte für den nächsten Standpunkt von verschiedenen Personen zur gleichen Zeit durchgeführt. Da dies in den bisher veröffentlichten Ansätzen nicht modelliert wird, kann die Gesamtzeit der Netzmessung nicht realistisch abgeschätzt werden.

In dieser Arbeit wird ein Ansatz vorgestellt, in dem die Messprozesse durch ein Prozessmodell abgebildet werden. Darin können die Tätigkeitsdauern und die Abhängigkeiten zwischen den Tätigkeiten berücksichtigt werden. Über eine computergestützte Simulation der Messung ist eine realistischere Abschätzung der Messdauer möglich. Dadurch lassen sich Messprozesse im Vorfeld der Messung besser planen. Neben der Abschätzung der Dauer und den daraus resultierenden Kosten wird zusätzlich ein Ablaufplan der Messung zur Verfügung gestellt. Dies ist besonders hilfreich, wenn neues Personal für komplexe Messungen eingesetzt wird. Aber auch für erfahrene Ingenieure ist der Ablaufplan eine Unterstützung zur Durchführung der Messung, da Messgehilfen leichter angeleitet werden können, welche Arbeiten als nächstes durchgeführt werden sollen.

Auf Grundlage der Simulation der Messdauer können verschiedene Varianten für die Durchführung einer Messung getestet und die beste Variante gesucht werden. Hierbei können bei einer tachymetrischen Netzmessung beispielsweise die Reihenfolge der Standpunkte, die Aufbaureihenfolge der Zielpunkte und die Anzahl der beteiligten Personen variieren. Für jede Variante können mithilfe des Prozessmodells die Dauer und die Kosten simuliert werden und als Bewertungskriterium für die Effizienz der Lösung (Güte) verwendet werden. Um eine möglichst gute Variante aller Kombinationsmöglichkeiten herauszufinden, wird aufgrund der hohen Komplexität des Problems ein heuristisches Optimierungsverfahren verwendet.

Am Beispiel der tachymetrischen Netzmessung, der komplexesten aller geodätischen Messungen, wird das entwickelte Verfahren zur Modellierung, Simulation und Optimierung von Messabläufen erläutert und evaluiert. Das Ziel der Optimierung ist eine effiziente Anordnung der Tätigkeiten, so dass die Kosten oder die Dauer der Messung minimal sind. Hierfür wird ein Beobachtungsnetz bestehend aus Messpunkten und Beobachtungen sowie ein Wegenetz als Grundlage verwendet. Mit einem Laufzeitmodell, welches für die Modellierung der Tätigkeitsdauern aufgestellt wurde, und dem zugrundeliegenden Prozessmodell der tachymetrischen Netzmessung wird eine Optimierung der Abläufe durchgeführt.

Die Ergebnisse der simulationsbasierten Optimierung der tachymetrischen Netzmessung zeigen, dass das entwickelte Verfahren gut geeignet ist, um die Anordnung der Tätigkeiten effizient zu gestalten. Es zeigt sich, dass nicht unbedingt die kürzeste Entfernung zwischen den Standpunkten die beste Wahl ist, welche sonst vielleicht intuitiv gewählt werden würde. Für größere Netze mit einer nicht-linienhaften Anordnung der Messpunkte ist eine Optimierung im Vorfeld der Messung sinnvoll und spart im Feld Zeit ein.

Teile der Arbeit entstanden im Rahmen des DFG-Projektes KU 1250/10-1/2 *Effizienzoptimierung und Qualitätssicherung ingenieurgeodätischer Prozesse im Bauwesen* (EQUIP).

**Stichworte:** Effizienzoptimierung, simulationsbasierte Optimierung, Ingenieurgeodäsie, tachymetrische Netzmessung, Prozessmodellierung, Prozessoptimierung, Petri-Netze, genetische Algorithmen

## Abstract

The three main components for the assessment of a measuring process are accuracy, reliability and cost-effectiveness. Various publications are available for the assessment and improvement of measurement accuracy and reliability. So far, the increase in efficiency has been mainly achieved by omission of observations at the expense of accuracy and reliability. The focus of this thesis is on the arrangement of the measurements and the activities to be carried out in order to increase the efficiency. The observation plan is not changed.

The basis for the assessment of profitability is the determination of the duration and the cost of the measurements. In the planning phase the duration of a measurement is mainly calculated using formulas that consider the number of standpoints and targetpoints as variables. This type of modeling is quite rigid and does not take into account that activities can be carried out simultaneously. During a tachymetric network measurement the set measurement and the set up of the target points for the next position are carried out by different persons at the same time. Since this has not been modeled in the approaches published so far, the overall time of the network measurement cannot be estimated realistically.

This thesis presents an approach in which the measurement processes are represented by a process model. The activity durations and the dependencies between the activities can be considered. Using a computer-based simulation of the measurement, a more realistic estimation of the measurement duration is possible. As a result, measurement processes can be better planned in the run-up to the measurement. In addition to estimating the duration and the resulting costs, a time schedule of the measurements is also made available. This is especially helpful when new staff members are used for complex measurements. But even for experienced engineers, the time schedule supports for carrying out the measurement, in order to guide the measurement assistants more easily.

Based on the simulation of the measurement duration, different variants for the arrangements of the measurement activities can be tested and the best variant can be searched. In the case of a tachymetric network measurement, the order of the standpoints, the setup order of the target points, and the number of involved persons may vary. For each variant, the duration and costs can be simulated using the process model. They can be used as evaluation criteria for the efficiency of the solution. In order to find the best variant of all possibilities, a heuristic optimization method is used because of the high complexity of the task.

Using the example of a tachymetric network, which is the most complex of all geodetic measurements, the developed method for modeling, simulation and optimization of measurement tasks is explained and evaluated. The goal of the optimization is an efficient arrangement of the activities to reduce the cost or duration of the measurements. An observation network consisting of measuring points and observations and a route network are used for this purpose. A run-time model, which includes the activity durations and the developed process model of the tachymetric network measurement, is used to optimize the arrangement of the activities.

The results of the simulation-based optimization of the tachymetric network measurements show that the developed method is well suited for the efficiency optimization of the activities. It turns out that the intuitively chosen shortest distance between the standpoints is not necessarily the best choice. For larger networks with a non-linear arrangement of the measuring points, an optimization in the run-up to the measurements makes sense and saves time.

Parts of the work were developed within the DFG-project KU 1250/10-1/2 *Effizienzoptimierung und Qualitätssicherung ingenieurgeodätischer Prozesse im Bauwesen* (EQuIP).

**Keywords:** Efficiency optimization, simulation-based optimization, engineering geodesy, tachymetric network, process modeling, process optimization, Petri nets, genetic algorithms

# Abkürzungsverzeichnis

<b>AG</b>	Automatisierungsgrad
<b>AP</b>	Anschlusspunkt
<b>ATR</b>	Automatic Target Recognition
<b>B/E-Netz</b>	Bedingungs/Ereignis-Netz
<b>BF</b>	Brute-Force
<b>CP-Netz</b>	farbiges (colored) Petri-Netz
<b>CX</b>	Cycle Crossover
<b>DFG</b>	Deutsche Forschungsgemeinschaft
<b>DPT</b>	Datumspunkt
<b>EPK</b>	Ereignis-gesteuerte Prozessketten
<b>EQuiP</b>	Effizienzoptimierung und Qualitätssicherung ingenieurgeodätischer Prozesse im Bauwesen
<b>FPA</b>	Festpunkt
<b>FPS</b>	Festpunkt, stochastisch
<b>GA</b>	Genetische Algorithmen
<b>GIH</b>	Geodätisches Institut Hannover
<b>GNSS</b>	Global Navigation Satellite System
<b>GPS</b>	Global Positioning System
<b>GUI</b>	Graphical User Interface
<b>IG</b>	Integrationsgrad
<b>LS</b>	Lotstab
<b>Lsg.</b>	Lösung
<b>LU</b>	Lotstab, unterirdisch
<b>LUIS</b>	Leibniz Universität IT-Services
<b>Min.</b>	Minuten
<b>mTSP</b>	Multiple Traveling Salesman Problem
<b>np</b>	für nichtdeterministisch polynomielle Zeit
<b>NPT</b>	Neupunkt
<b>NV</b>	Normalverteilung
<b>OX</b>	Ordered Crossover
<b>PMX</b>	Partially Matched Crossover
<b>Pnr</b>	Punktnummer
<b>SA</b>	Simulated Annealing
<b>Sek.</b>	Sekunden
<b>SimPle-Net</b>	Simulation und Planung effizienter Netzmessungen
<b>SP</b>	Standpunkt
<b>ST</b>	Stativ
<b>Std.</b>	Stunden
<b>S/T-Netz</b>	Stellen/Transitions-Netz
<b>STU</b>	Stativ, unterirdisch
<b>TSP</b>	Traveling Salesman Problem
<b>UML</b>	Unified Modeling Language
<b>XML</b>	Extensible Markup Language
<b>ZW</b>	Zwangszentrierung



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>9</b>
1.1	Motivation und Zielsetzung . . . . .	9
1.2	Ansätze zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit von geodätischen Prozessen . . . . .	9
1.3	Ansätze zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit von Prozessen in anderen Fachdisziplinen	11
1.4	Eigene Beiträge zur Beantwortung der Fragestellung . . . . .	12
1.5	Aufbau der Arbeit . . . . .	12
<b>2</b>	<b>Prozessmodellierung und -simulation</b>	<b>15</b>
2.1	Definition wichtiger Begriffe . . . . .	15
2.1.1	Prozess . . . . .	15
2.1.2	Messprozess . . . . .	15
2.1.3	Modell . . . . .	16
2.1.4	Simulation . . . . .	17
2.2	Wahl des Modellierungsverfahrens zur Simulation von Messprozessen . . . . .	17
2.2.1	Modellierungsverfahren in der Prozessmodellierung . . . . .	17
2.2.2	Anforderungen an das Verfahren zur Modellierung von Messprozessen . . . . .	17
2.2.3	Diskussion . . . . .	18
2.3	Petri-Netze . . . . .	18
2.3.1	Formaler Aufbau und Darstellung . . . . .	19
2.3.2	Schaltregeln . . . . .	19
2.3.3	Klassen . . . . .	21
2.3.4	Hierarchisierung und Modularisierung . . . . .	23
2.3.5	Modellierung zeitabhängiger Vorgänge . . . . .	24
2.3.6	Simulation . . . . .	25
2.4	Modellierung und Simulation von Messprozessen . . . . .	27
2.4.1	Petri-Netz-Modelle von Messprozessen . . . . .	27
2.4.2	Laufzeitmodell . . . . .	34
2.4.3	Kostenmodell . . . . .	40
2.4.4	Beispielhafte Simulation eines Messprozesses . . . . .	42
<b>3</b>	<b>Prozessoptimierung</b>	<b>47</b>
3.1	Definition wichtiger Begriffe . . . . .	47
3.1.1	Effizienz . . . . .	47
3.1.2	Optimierung . . . . .	47
3.1.3	Prozessoptimierung . . . . .	48
3.1.4	Simulationsbasierte Optimierung . . . . .	48
3.2	Effizienzoptimierung von Messprozessen . . . . .	48
3.2.1	Ziele der Effizienzoptimierung . . . . .	48
3.2.2	Neben- und Randbedingungen der Effizienzoptimierung . . . . .	49
3.3	Wahl des Optimierungsverfahrens für die simulationsbasierte Effizienzoptimierung .	50
3.3.1	Relevante Optimierungsprobleme . . . . .	50
3.3.2	Ansätze zur Lösung kombinatorischer Optimierungsprobleme . . . . .	52
3.3.3	Diskussion . . . . .	53

3.4	Genetische Algorithmen . . . . .	54
3.4.1	Formaler Aufbau . . . . .	54
3.4.2	Funktionsweise . . . . .	55
3.4.3	Operatoren . . . . .	55
3.4.4	Anwendung . . . . .	58
3.4.5	Bewertung der Effektivität . . . . .	59
3.5	Effizienzoptimierung von Messprozessen . . . . .	60
3.5.1	Zusammenhänge . . . . .	60
3.5.2	Beispiel: Tachymetrische Aufnahme . . . . .	60
<b>4</b>	<b>Simulation und Planung einer effizienten Netzmessung</b>	<b>67</b>
4.1	Problemstellung . . . . .	67
4.2	Entwicklung von SimPle-Net . . . . .	68
4.3	Modellierung und Simulation der Netzmessung . . . . .	68
4.3.1	Petri-Netz der Netzmessung . . . . .	68
4.3.2	Simulation der Netzmessung . . . . .	71
4.4	Optimierung der Netzmessung . . . . .	72
4.4.1	Input-Objekte . . . . .	72
4.4.2	Optimierung der Standpunktreihenfolge . . . . .	76
4.4.3	Optimierung der Punktaufteilung und -reihenfolge . . . . .	76
4.5	Dokumentation der Ergebnisse . . . . .	78
4.6	Anwendung und Evaluation des entwickelten Verfahrens . . . . .	80
4.6.1	Beispielnetze . . . . .	80
4.6.2	Parameterstudien . . . . .	81
4.6.3	Empfehlung zur Einstellung der Stellgrößen . . . . .	88
4.6.4	Bewertung der erzielten Ergebnisse . . . . .	90
4.6.5	Praktikabilität . . . . .	93
4.6.6	Zusammenfassung des Verfahrens . . . . .	93
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>95</b>
5.1	Zusammenfassung . . . . .	95
5.2	Ausblick . . . . .	96
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>99</b>
A.1	GUI des entwickelten Programms SimPle-Net . . . . .	99
A.2	XML-Schemata . . . . .	102
A.3	Dokumentation der Netzoptimierung . . . . .	104
A.4	Koordinaten und Wegenetze der Beispiele . . . . .	106
A.4.1	Beispiel Wilhelm Busch Museum . . . . .	106
A.4.2	Beispiel Prinzengarten . . . . .	107
A.4.3	Beispiel Elbinsel . . . . .	108
A.5	Parameterstudien . . . . .	110
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>117</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>123</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>125</b>

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation und Zielsetzung

Im Vorfeld einer ingenieurgeodätischen Messung erfolgt in der Regel eine Planung der durchzuführenden Beobachtungen. Der Beobachtungsplan wird vor dem Hintergrund der Wirtschaftlichkeit so gestaltet, dass möglichst wenig Messungen, unter Einhaltung der geforderten Genauigkeit und Zuverlässigkeit, durchgeführt werden. Während eines Messprozesses reduziert sich durch die Verwendung moderner Messsysteme die eigentliche Messzeit im Vergleich zu den Aufbau-, Umbau- und Abbauaktivitäten des Messequipments immer weiter. Dadurch wird es immer wichtiger, die logistischen Prozesse vor, während und nach einer Messung möglichst wirtschaftlich zu gestalten. Dazu gehört eine Planung der Tätigkeiten, deren optimale Anordnung und eine anschauliche Dokumentation der Planungsergebnisse, die im Außendienst einfach verwendet werden kann. So lässt sich während des Messprozesses Zeit einsparen. Der Truppführer benötigt keine Zeit mehr für die Planung der nächsten Arbeitsschritte und deren Übermittlung an die Gehilfen. Alle, die an der Messung beteiligt sind, wissen Dank der detaillierten Planung zu jedem Zeitpunkt, was zu tun ist.

Eine umfangreiche Planung von Messprozessen schafft außerdem eine Transparenz gegenüber anderen Fachdisziplinen. Das ist wichtig, wenn die Messprozesse Teil eines großen Prozesses sind. Hierzu gehören beispielsweise Bau- oder Produktionsprozesse. Die Planer der Großprojekte können die Zeiten für die Durchführung der notwendigen Messungen besser eintakten und die Schnittstellen zu den anderen Prozessen werden dokumentiert. Hierfür ist es allerdings notwendig, ein gemeinsames Modell für die verschiedenen Prozesse zu schaffen.

Ein geeignetes Prozessmodell ist zudem für die Bewertung der Wirtschaftlichkeit notwendig, wenn sich die Prozesse nicht in einer überschaubaren Formel darstellen lassen. Die Modellierung des Prozesses dient dann als Grundlage zur Simulation der Messaufgabe. Um ein realistisches Simulationsergebnis zu erhalten, muss die Realität in ausreichendem Maße durch das Modell approximiert werden.

## 1.2 Ansätze zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit von geodätischen Prozessen

In der Geodäsie sind in Grafarend u. a. (1979) oder Stoliker und Anderson (1982) erste Ansätze zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit einer Messung zu finden, in den späten 1990ern wurde das Thema Kostenoptimierung dann verstärkt behandelt (Staudinger, 1999; Dare und Saleh, 2000; Saleh und Chelouah, 2004). In allen Ansätzen wurden Kostenfunktionen aufgestellt. Eine Modellierung im Sinne der Prozessmodellierung wurde nicht verfolgt.

Der Ansatz von Grafarend u. a. (1979) zur Berechnung der Kosten einer tachymetrischen Messung ist sehr allgemein gehalten. Es wird zwischen einem Beobachter, der die Messungen durchführt, und einem Target-Team, das für den Aufbau der Zielpunkte sorgt, unterschieden. Für jede beteiligte Person werden die Einrichte- und Messkosten sowie die Zielpunktkosten festgelegt. Am Ende werden alle Einzelkosten addiert. Es ist nicht ersichtlich, dass in diesem Ansatz Wartezeiten berücksichtigt werden. Wartezeiten entstehen zum Beispiel, wenn der Aufbau der Zielpunkte für den aktuellen Standpunkt noch nicht abgeschlossen ist und der Beobachter darauf wartet oder wenn das Target-Team auf die Beendigung einer Messung wartet. Das Modell berücksichtigt die Kosten für

die Wege, allerdings nur zwischen dem Standpunkt und den Zielpunkten. Es berücksichtigt nicht, dass auch Wege zwischen den einzelnen Zielpunkten möglich sind. Als Optimierungsverfahren wird das Verfahren der projizierten Gradienten angewendet (Grafarend u. a., 1979).

Stoliker und Anderson (1982) stellen zwei Anwendungsfälle zur Optimierung der Beobachtungslogistik in geodätischen Netzen vor. Für die optimale Route eines Hubschraubers zwischen verschiedenen Messpunkten lösen sie ein Traveling Salesman Problem (TSP) (s. Abschnitt 3.3.1, S. 50) mit dem Branch and Bound-Verfahren nach Eastman (Gillett, 1976). Als Eingangsgrößen dienen die Koordinaten der Stationen und die daraus berechnete Entfernungsmatrix zwischen den Stationen. Für die tachymetrische Netzmessung führen Stoliker und Anderson (1982) ein Beispiel mit vier Netzpunkten und sechs Beobachtungen ein, mit der Besonderheit, dass jeweils zwei Punkte gemeinsam auf einer Uferseite eines Flusses liegen, die über eine weit entfernte Brücke miteinander verbunden sind. Der Ansatz berücksichtigt die Wege zwischen den einzelnen Punkten. Außerdem wird berücksichtigt, dass ggf. Wartezeiten entstehen. In dem Ansatz werden jedoch nur die Wege als Grundlage für die Berechnung der Kosten verwendet. Die Aufbau- und Messzeiten werden nicht berücksichtigt. Außerdem wurde durch die beobachtungsweise Betrachtung (statt standpunktweise) kein reales Beispiel für heutige Netzmessungen erzeugt. Denn heute werden i.d.R. Richtungssätze auf den einzelnen Standpunkten gemessen. Dennoch ist dies einer der ersten Ansätze in der Geodäsie, in dem auf die Optimierung der Reihenfolge der Messungen eingegangen wird.

Für tachymetrische und GPS-Netzmessungen (GPS: Global Positioning System) hat Staudinger (1999) Kostenfunktionen aufgestellt, die die Kostendifferenzen verschiedener Netzvarianten abschätzt und mit deren Hilfe eine möglichst gute Netzkonfiguration (hinsichtlich der Kosten) ermittelt werden kann. Staudinger (1999) berücksichtigt, dass das Target-Team warten muss, bis die Messungen durchgeführt wurden. Im Gegenzug wird allerdings nicht betrachtet, wie lange das Beobachtungs-Team bzw. der Beobachter warten muss, bis alle Zielpunkte aufgebaut sind. Außerdem kann das Target-Team in vielen Fällen schon die Zielpunkte für den nächsten Standpunkt aufbauen bzw. nicht mehr benötigte Punkte abbauen, während die Beobachtungen auf dem aktuellen Standpunkt durchgeführt werden. Dieses nebenläufige Arbeiten wird in der Praxis umgesetzt, aber mit diesem Modellansatz nicht ausreichend beschrieben. In Staudingers Ansatz werden auch die Wege berücksichtigt, die zwischen den Messpunkten zurückgelegt werden. Sein Hauptaugenmerk liegt aber darauf, unterschiedliche Netzkonfigurationen zu testen und die kostengünstigste zu empfehlen. Eine Optimierung der Reihenfolge der Standpunkte und des Aufbaus der Punkte wurde nicht durchgeführt. Als Optimierungsverfahren setzt Staudinger (1999) das heuristische Optimierungsverfahren Simulated Annealing ein.

Dare und Saleh (2000) und Saleh und Chelouah (2004) haben ein Modell zur Bewertung der Kosten eines GPS-Netzes aufgestellt. Sie fassen das Problem als ein rein logistisches auf und berücksichtigen die Bewegungskosten zwischen zwei relevanten Punkten in Form einer Kostenmatrix. Die wirtschaftlichste Variante des Messprozesses ist diejenige mit den geringsten Bewegungskosten. Dare, Saleh und Chelouah haben verschiedene exakte Lösungsverfahren und heuristische Optimierungsverfahren des Operations Research für die Erstellung des Ablaufplans einer GPS-Messung getestet. Neben der reinen Routenplanung wird auch die Messzeit und das Besetzen mehrerer Punkte zur selben Zeit berücksichtigt. Es handelt sich dabei um eine Erweiterung des klassischen TSP auf ein Multisalesman Problem (Bellmore und Hong, 1974) mit mehreren gekoppelten TSP.

Die vier vorgestellten Ansätze zur Bewertung und Optimierung der Wirtschaftlichkeit von Messprozessen basieren auf mehr oder weniger komplexen Kostenfunktionen. Anhand der Kostenfunktionen werden verschiedene Varianten der Messung miteinander verglichen. Die Wartezeiten, die fast immer während einer Messung entstehen, werden in keinem der vier Ansätze ausreichend berücksichtigt. Das liegt vor allem daran, dass mit rein formelbasierten Kostenfunktionen keine direkte Überprüfung von Bedingungen bzw. Abhängigkeiten möglich war. Solche Bedingungen sind beispielsweise, dass alle benötigten Punkte für einen Standpunkt aufgebaut sind, bevor die Messung

startet. Für den Umbau oder Abbau von Punkten ist es zudem wichtig, dass die Punkte nicht mehr für eine laufende Messung benötigt werden. Die vorgestellten Ansätze konzentrieren sich hauptsächlich auf das Weglassen von Messungen bei Erreichen einer geforderten Qualität. Die Reihenfolge der Messungen wird bei den Ansätzen von Dare, Saleh und Chelouah im Zuge der Optimierung von GNSS-Messungen (GNSS: Global Navigation Satellite System), sowie von Stoliker und Anderson bei tachymetrischen Messungen verbessert. Der Ansatz von Stoliker und Anderson (1982) ist allerdings nur für sehr einfache Netze geeignet. Sie resümieren in ihrem Beitrag selbst, dass die Kostenfunktion für kompliziertere Netze sehr komplex und schwer aufstellbar ist.

Der Bereich der Prozessmodellierung zur detaillierten Beschreibung der Messabläufe, in der auch Abhängigkeiten zwischen einzelnen Tätigkeiten modelliert werden können, wurde im Bereich der Ingenieurgeodäsie bisher nicht behandelt. In dieser Arbeit wird gezeigt, dass mit einer Optimierung basierend auf einem umfangreichen Prozessmodell eine wirtschaftliche Anordnung der Tätigkeiten während eines Messprozesses möglich ist.

### 1.3 Ansätze zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit von Prozessen in anderen Fachdisziplinen

In anderen Fachdisziplinen, wie z. B. der Produktionslogistik, wird seit Längerem an der Optimierung der Abläufe zur Senkung der Kosten geforscht (Domschke u. a., 1997). In dem Sammelwerk von März u. a. (2011) werden Anwendungsfälle zur Optimierung der Wirtschaftlichkeit (Minimierung der Kosten) aus dem Bereich der Produktion und Logistik gezeigt. Eine Reduktion der Kosten kann durch eine bessere Auslastung der Maschinen, die Senkung des Bestands im System oder die Einhaltung von Lieferterminen erreicht werden (Weigert und Rose, 2011).

In März u. a. (2011) werden simulationsgestützte Optimierungsverfahren zur Lösung der Optimierungsaufgabe empfohlen, obwohl sie einen hohen Rechenaufwand erfordern. Aufgrund der Komplexität und der Schwierigkeit, eine mathematische Formel zur Optimierung der Kosten aufzustellen, ist die Kombination aus Simulation und Optimierung dennoch ein gute Option zur Lösungsfindung. Die Vorteile der Simulation, mit der eine praxisrelevante Komplexität abgebildet werden kann, werden mit den Vorteilen der Optimierung (Auffinden besserer Lösungen und Einblick in die Lösungsfindung) verknüpft (März und Krug, 2011).

Die Problemklassen, die von März und Krug (2011) in Tabelle 1.1 aufgestellt wurden, entsprechen den Problemklassen, die für die Optimierung von Messprozessen identifiziert werden können. Für eine tachymetrische Netzmessung und viele andere Messprozesse der Ingenieurgeodäsie, lassen sich die Beispiele in Tabelle 1.1 (unten) nennen.

**Tabelle 1.1:** *Problemklassen und beispielhafte Aufgaben aus der Produktionslogistik (nach März und Krug, 2011, S. 45), erweitert um Aufgaben aus der Ingenieurgeodäsie*

Problemklassen	Reihenfolgeproblem	Zuordnungsproblem	Parametervariation
Beispiele Produktionslogistik	Auftragsreihenfolge	Zuordnung von Mitarbeitern zu Schichtplänen	Losgrößen
	Rüstreihenfolge	Zuordnung von Aufträgen zu Betriebsmitteln	Planzeiten  Leistungsgrößen Pufferfläche
Beispiele Ingenieurgeodäsie	Standpunktreihenfolge Aufbaureihenfolge Abbaureihenfolge	Punktaufteilung	Truppgröße Messverfahren

Auch im Bauwesen gibt es Ansätze zur Lösung von Optimierungsaufgaben mit der simulationsgestützten Optimierung. Hofmann u. a. (2008) haben für die Optimierung von Materialflüssen innerhalb von Bauprozessen eine Kombination von Petri-Netzen als Simulationsverfahren und genetischen Algorithmen als Optimierungsverfahren vorgeschlagen und damit gute Ergebnisse erzielt. Diese Kombination bietet sich auch für die Optimierung der Abläufe einer tachymetrischen Netzmessung an.

## 1.4 Eigene Beiträge zur Beantwortung der Fragestellung

In dieser Arbeit wird ein Ansatz vorgestellt, der sich zum Ziel setzt, die Messprozesse möglichst realitätsnah zu bewerten und die wirtschaftlichste Durchführungsvariante zu finden. Dafür erfolgt erstmalig im Bereich der Ingenieurgeodäsie eine detaillierte Modellierung der Messprozesse. Auf Grundlage der aufgestellten Modelle wird eine Simulation der Abläufe durchgeführt. Die in den bisher veröffentlichten Ansätzen zur Wirtschaftlichkeitsbeurteilung verwendeten Kostenfunktionen werden durch diese Simulation ersetzt. Die Modellierung der Prozesse als Petri-Netze und die geeignete Wahl der Abstraktionsstufe verlangen eine intensive Analyse der einzelnen Messprozesse. Als besonders komplexer Messprozess erweist sich die tachymetrische Netzmessung. Die Modellierung dieses Messprozesses als Petri-Netz ist sehr aufwendig.

In einer simulationsbasierten Optimierung wird die beste Variante der Messdurchführung gesucht. Aufgrund der Komplexität der tachymetrischen Netzmessung, wird mit den genetischen Algorithmen ein heuristisches Optimierungsverfahren eingesetzt. Die Prozessdauern für die verschiedenen Varianten des Messprozesses werden mithilfe der Petri-Netz-Modelle simuliert. Anschließend werden die Kosten des Prozesses abgeleitet und miteinander verglichen.

Die Dokumentation der Planung beinhaltet ein Ablaufdiagramm für die einzelnen Messtage sowie eine Liste für jede beteiligte Person, auf der die Zeitpunkte und die Tätigkeiten aufgeführt sind. In einer Bachelorarbeit wurde ein erster Ansatz entwickelt, der die Planungsergebnisse in Kombination mit einem elektronischen Feldbuch auf einem androidbasierten Tablet bereitstellt (Leßmann, 2012).

Mit dem vorgestellten Ansatz ist es erstmalig möglich, den komplexen Gesamtprozess der tachymetrischen Netzmessung abzubilden, zu analysieren und zu optimieren. Die umfangreiche Dokumentation der Optimierungsergebnisse ermöglicht auch im Feld ein effizientes Arbeiten, da die sonst häufig durchzuführenden Absprachen zwischen Beobachter und Gehilfen nahezu entfallen.

## 1.5 Aufbau der Arbeit

In Kapitel 2 werden wichtige Begriffe aus der Prozessmodellierung und -simulation erläutert. Anschließend wird die Wahl des Modellierungsverfahrens für die Modellierung von Messprozessen diskutiert. Für das gewählte Modellierungsverfahren, die Petri-Netze, werden die Grundlagen beschrieben. Anschließend wird auf die Modellierung und Simulation von Messprozessen eingegangen. Für ausgewählte Messprozesse werden Petri-Netzmodelle erzeugt. Eine beispielhafte Simulation wird für die tachymetrische Aufnahme durchgeführt und erläutert.

In Kapitel 3 werden wichtige Begriffe der Prozessoptimierung sowie die Effizienzoptimierung von Messprozessen eingeführt. Anschließend wird die Wahl des Optimierungsverfahrens für die Effizienzoptimierung von Messprozessen diskutiert, indem die für diese Aufgabe relevanten Optimierungsprobleme dargestellt werden und mit der eigenen Fragestellung in Bezug gesetzt werden. Das gewählte Optimierungsverfahren, die genetischen Algorithmen, wird mit Bezug zur Problemstellung beschrieben. Anschließend wird der Ablauf einer Effizienzoptimierung mit der Brute-Force-Methode und den genetischen Algorithmen erläutert.

In Kapitel 4 wird anhand des Beispiels der tachymetrischen Netzmessung der Ablaufplan eines komplexen Messprozesses optimiert. Nach einer Beschreibung der Problemstellung wird das Petri-Netz der tachymetrischen Netzmessung detailliert beschrieben. Anschließend werden die Eingangswerte für die Simulation zusammengestellt und der Ablauf der Simulation wird erläutert. Im nächsten Schritt wird die Vorgehensweise bei der Optimierung mit genetischen Algorithmen erläutert. Zum Abschluss wird die entwickelte Methodik auf unterschiedlich komplexe Beispielnetze angewandt. Im Rahmen umfangreicher Parameterstudien werden Empfehlungen zur Wahl der Stellgrößen für die Optimierung mit genetischen Algorithmen abgeleitet. Des Weiteren wird die Plausibilität der erzielten Ergebnisse überprüft und kritisch diskutiert.

Kapitel 5 fasst die erzielten Ergebnisse zusammen und gibt einen Ausblick, wie die entwickelten Methodiken eingesetzt werden können und in welchen Bereichen noch Forschungsbedarf besteht.



## 2 Prozessmodellierung und -simulation

*In diesem Kapitel werden zu Beginn wichtige Begriffe der Prozessmodellierung und -simulation erläutert. Dann wird die Wahl des Modellierungsverfahrens für die Modellierung von Messprozessen diskutiert. Dafür werden gängige Verfahren der Prozessmodellierung für verschiedene Anwendungsbereiche kurz vorgestellt. Darauf aufbauend wird eine Anforderungsanalyse durchgeführt und diskutiert, welches der Verfahren sich besonders für die Modellierung und Simulation von Messprozessen eignet.*

*Das gewählte Modellierungsverfahren sind die Petri-Netze. Hierfür werden die Grundlagen beschrieben und es wird auf den formalen Aufbau und die verschiedenen Klassen der Petri-Netze eingegangen. Des Weiteren werden die Hierarchisierung und die Modellierung zeitabhängiger Vorgänge behandelt. Zur Erläuterung der Simulation wird ein einfaches Beispiel eingeführt. Schließlich wird auf die Modellierung und Simulation von Messprozessen eingegangen. Für ausgewählte Messprozesse werden Petri-Netzmodelle erzeugt. Das für die Simulation verwendete Laufzeit- und Kostenmodell wird zunächst ausführlich erläutert, bevor beispielhaft die Simulation einer tachymetrischen Aufnahme beschrieben wird.*

### 2.1 Definition wichtiger Begriffe

#### 2.1.1 Prozess

Ein Prozess ist nach DIN EN ISO 9000 (2000) ein „Satz von in Wechselbeziehungen oder Wechselwirkung stehenden Tätigkeiten, die Eingaben in Ergebnisse umwandeln“. Laut DIN IEC 60050-351 (2009) ist ein Prozess die „Gesamtheit von aufeinander einwirkenden Vorgängen in einem System, durch die Materie, Energie oder Information umgeformt, transportiert oder gespeichert wird“. Unter einem System wird dabei eine „abgegrenzte Anordnung von Komponenten, die miteinander in Wechselwirkung stehen“ (DIN IEC 60050-351, 2009) verstanden. Allgemein kann ein Prozess als Ablauf aller Tätigkeiten zur Erstellung eines Produktes oder einer Dienstleistung verstanden werden. Jeder Prozess benötigt Input-Objekte (z. B. Ressourcen oder Informationen), um gestartet zu werden. Input-Objekte werden dem Ablauf von außen zugefügt, wobei Output-Objekte durch den Prozess erzeugt werden (Oberweis, 1996). Die einzelnen Tätigkeiten eines Prozesses können sowohl sequentiell als auch nebenläufig durchgeführt werden (vgl. Abbildung 2.1). Prozesse werden als *nebenläufig* bezeichnet, wenn sie voneinander unabhängig sind. Sie können parallel, sequenziell oder verzahnt ablaufen. Als *parallele* Prozesse werden sie nur dann bezeichnet, wenn sie tatsächlich simultan ablaufen.

#### 2.1.2 Messprozess

Im Bereich der Ingenieurgeodäsie beinhaltet ein Messprozess alle notwendigen Arbeitsschritte, die zur Umsetzung einer bestimmten Teilaufgabe (z. B. Absteckung eines Gebäudegrundrisses oder Messung eines geodätischen Netzes) durchzuführen sind.

Alle Messprozesse besitzen Objekte und Aktivitäten (Tätigkeiten). Zu den Objekten gehören beispielsweise Ressourcen, wie Personal, Messinstrumente, Messzubehör oder Fahrzeuge. Außerdem fallen Informationen, wie die Koordinaten der Anschlusspunkte oder Koordinatenlisten abzusteckender Punkte, in die Kategorie der Objekte.

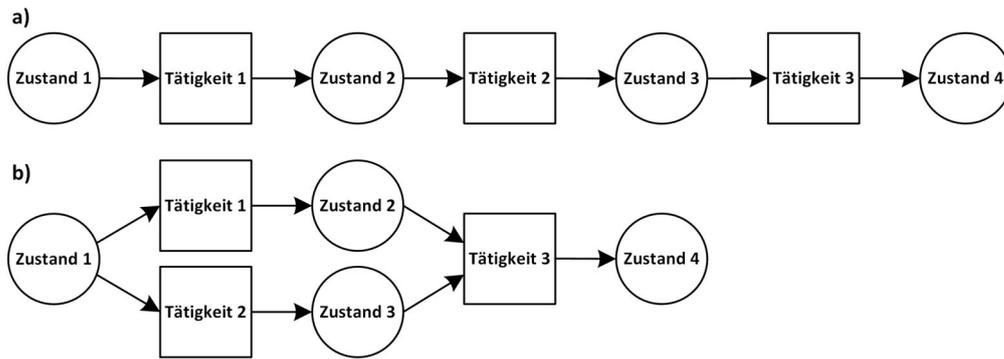


Abbildung 2.1: a) Sequenzieller Prozess b) Nebenläufiger Prozess

Die Tätigkeiten innerhalb eines Messprozesses haben zu einem gewissen Zeitpunkt einen Zustand. Oberweis (1996) hat folgende Zustände für Aktivitäten für betriebliche Abläufe definiert: „vor Ausführung“, „aktiv“, „wartend“, „gestört“, „abgebrochen“ und „regulär beendet“. Diese Zustände können auf die Messprozesse übertragen werden.

Zwischen den Tätigkeiten einer Messung existieren bestimmte Beziehungen. Es gibt zum Beispiel Tätigkeiten, die in einer bestimmten Reihenfolge durchgeführt werden müssen. Vor der Durchführung einer Tachymeter-Stationierung ist es beispielsweise erforderlich, dass die notwendige Anzahl von Anschlusspunkten aufgebaut wird. Außerdem gibt es Tätigkeiten, die sich gegenseitig ausschließen. Dies kann der Fall sein, wenn mehrere Tätigkeiten auf eine Ressource zugreifen, die aber nicht in ausreichender Anzahl zur Verfügung steht. Des Weiteren können Tätigkeiten voneinander unabhängig sein (nebenläufige Prozesse).

Bei der Planung eines Messprozesses gibt es drei Kriterien, die beurteilen, wie gut die Messung durchgeführt werden kann. Auf der Qualitätsebene sind das die *Genauigkeit* und die *Zuverlässigkeit* (siehe Niemeier, 2002, 251ff). In der Planungsphase wird überprüft, ob die geforderte Genauigkeit und Zuverlässigkeit erreicht werden kann. Mit vielen Messungen, einer guten Messkonfiguration und Messinstrumenten mit einer hohen Genauigkeit kann eine gute Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Messergebnisse erreicht werden. Viele Messungen stehen allerdings im Widerspruch zur *Wirtschaftlichkeit*. Das Ziel jeder Messung muss sein, nur die notwendigen Messungen unter Einhaltung der Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsanforderungen durchzuführen. Außerdem sollen diese Messungen so angeordnet werden, dass sie wirtschaftlich durchgeführt werden können.

### 2.1.3 Modell

In der Prozessmodellierung ist ein Modell „eine vereinfachte Nachbildung der Realität eines geplanten oder existierenden Systems mit seinen Prozessen“ (VDI 3633 Blatt 1, 1993). Das Modell beinhaltet alle bedeutenden Arbeitsabläufe, abstrahiert sie hinreichend genau und bildet damit eine wichtige Grundlage für die Simulation eines Prozesses (vgl. Abbildung 2.2). Mithilfe von Modellen können verschiedene Szenarien eines Prozesses durchgespielt (simuliert) werden.

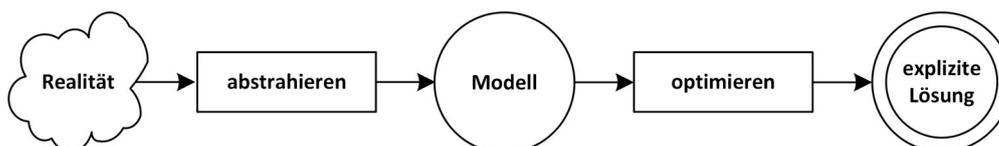


Abbildung 2.2: Optimierung eines Realproblems (nach Grafarend u. a., 1979, S. 438)

### 2.1.4 Simulation

Unter einer Simulation wird „das Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell“ verstanden, „um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind“ (VDI 3633 Blatt 1, 1993). Die Simulationsdurchführung ist häufig ein „systematisches Probieren“, wobei die systematische Variation der Eingangsparameter mithilfe von statistischer Experimentplanung oder unter Verwendung mathematischer Optimierungsverfahren teilweise automatisiert werden kann (VDI 3633 Blatt 1, 1993). Das Modell und die Simulation bilden damit die Basis für die Optimierung von Prozessen.

## 2.2 Wahl des Modellierungsverfahrens zur Simulation von Messprozessen

Im Folgenden werden die Anforderungen an das Verfahren zur Modellierung von Messprozessen diskutiert. Hierfür wurde zunächst in Nachbardisziplinen recherchiert, welche Modellierungsverfahren dort für welche Problemstellungen verwendet werden. Anschließend wurden die eigenen Anforderungen definiert und die Wahl des Modellierungsverfahrens erläutert.

### 2.2.1 Modellierungsverfahren in der Prozessmodellierung

Zur Bewertung und Verbesserung von Arbeitsabläufen sowie zur Maschinen-, Ressourcen- und Personaleinsatzplanung werden heutzutage häufig Modellierungen und Simulationen der Prozesse durchgeführt, die eine Bewertung der Abläufe zulassen. Es gibt aktuell kein Modellierungsverfahren, das sich in allen Bereichen der Prozessmodellierung durchgesetzt hat. Im Bereich der Geschäfts- und Produktionsprozessmodellierung kommen verschiedene Verfahren zum Einsatz. Dazu gehören unter vielen anderen die Petri-Netze (z. B. Oberweis, 1996; Zimmermann, 1997; Desel und Erwin, 2000; van der Aalst und Stahl, 2011), die Ereignis-gesteuerten Prozessketten *EPK* (z. B. Keller u. a., 1992; Scheer und Nüttgens, 2000; Staud, 2006) und die Unified Modeling Language *UML* (z. B. Oestereich u. a., 2003). Im Bereich des Bauwesens kommt bisher hauptsächlich die Netzplantechnik zur Ressourcenplanung und zur Analyse und Steuerung der Bauprozesse zum Einsatz (Schwarze, 2010). Es gibt erste Ansätze, in denen die Bauprozessmodellierung unter der Verwendung von Petri-Netzen durchgeführt wird (Berkhahn u. a., 2007).

### 2.2.2 Anforderungen an das Verfahren zur Modellierung von Messprozessen

Das Verfahren zur Modellierung von Messprozessen soll verschiedene Anforderungen erfüllen, um eine realitätsnahe Modellierung und Simulation der Messprozesse zu gewährleisten. Weitere Anforderungen ergeben sich aus der Interaktion von Messprozessen mit anderen Prozessen, wie z. B. Bauprozessen (Berkhahn u. a., 2010) oder Produktionsprozessen.

1. Das Modell soll Messprozesse in ausreichend detailliertem Maße abbilden können.
2. Das Modell soll die Möglichkeit zur einfachen Integration zusätzlicher Teilprozesse sowie eine einfache Handhabung wiederkehrender Prozesse bieten.
3. Das Modell soll in der Lage sein, zeitliche Aspekte zu berücksichtigen.
4. Das Modell soll die Möglichkeit bieten, sowohl sequentielle, als auch nebenläufige Prozesse zu modellieren, da es sich bei Messprozessen mit mehr als einer Person in aller Regel um nebenläufige Prozesse handelt.
5. Das Modell soll computergestützte Simulationen von Prozessen ermöglichen und es soll in der Lage sein, verschiedene Prozesszustände anzuzeigen und zu verarbeiten.
6. Das Modell soll eine grafische Notation besitzen.

7. Das Modell soll in der Lage sein, während der Simulation Bedingungen zu überprüfen oder Prozessteile zu synchronisieren. Falls die Bedingungen nicht erfüllt sind oder Vorarbeiten noch nicht geleistet wurden, sollte der nächste Arbeitsschritt nicht starten.

### 2.2.3 Diskussion

Für die Modellierung und Simulation von Messprozessen soll aus der Menge von Modellierungsverfahren eines ausgewählt werden, das alle gestellten Anforderungen erfüllt. Aufgrund der fünften Forderung, bezüglich einer computergestützten Simulation, kommt nur eine formale Modellierungssprache in Frage bzw. eine semi-formale Modellierungssprache, die sich formalisieren lässt.

Eine *formale Modellierungssprache* zeichnet sich durch ihre eindeutig festgelegte Symbolmenge, ihre eindeutige Syntax und ihre eindeutig festgelegte Semantik aus (Frank und van Laak, 2003). Die Syntax beschreibt die verfügbaren Symbolmengen und legt deren Aussehen und Anordnungsmöglichkeiten fest. In der Semantik wird die Bedeutung der Symbole festgelegt.

Eine *semi-formale Modellierungssprache* verfügt über eine eindeutig festgelegte Symbolmenge und einer in Teilen eindeutig festgelegten Syntax. Ihre Semantik wird dagegen nur rudimentär beschrieben (Frank und van Laak, 2003).

Petri-Netze sind eine formale Modellierungssprache, dessen formale Semantik auch von semi-formalen Modellierungssprachen wie den EPK (Ereignis-gesteuerte Prozessketten) oder UML (Unified Modeling Language) Aktivitätendiagrammen genutzt wird, um computergestützte Simulationen durchzuführen (van der Aalst und Stahl, 2011).

Die grafische Repräsentation der Petri-Netze ist im Gegensatz zu den EPK und der UML sehr einfach gehalten, wodurch sie für Petri-Netz-Einsteiger leicht erlernbar ist. Petri-Netze können sowohl einfache, als auch komplexe, miteinander verstrickte Prozesse abbilden. Allerdings sind die Modelle bei sehr komplexen Prozessen für Fachfremde schwer nachvollziehbar. Für die Modellierung von Messprozessen eignen sich die Petri-Netze aber dennoch, da die einzelnen Messprozesse überschaubar sind und sich die Arbeitsschritte häufig wiederholen. Die formale Struktur der Petri-Netze mit der strengen mathematischen Syntax ermöglicht eine computergestützte Simulation. Innerhalb der Simulation kann die Zeitkomponente sowohl deterministisch als auch stochastisch modelliert werden (Ramchandani, 1974; Ajmone Marsan u. a., 1994). Petri-Netze sind zudem in der Lage verschiedene Prozesszustände darzustellen.

Prinzipiell würden sich auch die EPK oder die UML für die Modellierung von Messprozessen eignen. Es gibt Ansätze, mit denen sich die semi-formalen EPK (van der Aalst, 1999) oder UML Aktivitätendiagramme (López-Grao u. a., 2004) in Petri-Netze transformieren lassen, um Simulationen durchzuführen und die Analysemethoden von Petri-Netzen zu nutzen. In diesem Fall werden direkt die Petri-Netze zur Modellierung und Simulation genutzt. Die Prozesse einer Messung lassen sich auch mit einfachen grafischen Mitteln anschaulich darstellen und nach der Modellierung ist dadurch keine Transformation in eine andere Modellierungssprache für die Durchführung der Simulation notwendig.

## 2.3 Petri-Netze

Ein Petri-Netz ist ein grafisches Modellierungsverfahren, das auf einer strengen mathematischen Syntax beruht. Es handelt sich um die Erweiterung eines bipartiten Graphen, wobei unterschiedliche Systemzustände angezeigt werden können. Aufgrund dessen sind Petri-Netze in der Lage computergestützte Simulationen des Prozessablaufs durchzuführen, mit denen sich die zeitlichen Abläufe und ggf. vorhandene Randbedingungen bestimmen lassen. Außerdem können Bedingungen überprüft werden, die zum Start einer Tätigkeit vorliegen müssen. Zusätzlich ermöglichen Petri-

Netze die Modellierung eines Prozesses in verschiedenen Abstraktionsebenen. Ein Prozess lässt sich dadurch relativ leicht und anschaulich grob modellieren. Hinterher können bei Bedarf die groben Strukturen durch eine detailliertere Modellierung verfeinert werden.

In den folgenden Unterabschnitten werden der Aufbau und die Funktionsweise von Petri-Netzen kurz dargestellt. Umfangreiche Einführungen in die Petri-Netz-Theorie sind in Reisig (1982, 2010), Abel (1990), Rosenstengel und Winand (1983, 1991), Baumgarten (1996) oder Reisig und Rozenberg (1998a,b) zu finden. Grundlegende Informationen zu zeitabhängigen Petri-Netzen können Ramchandani (1974) oder Ajmone Marsan u. a. (1994) entnommen werden.

### 2.3.1 Formaler Aufbau und Darstellung

Petri-Netze setzen sich aus vier Komponenten zusammen - den beiden Knotentypen *Stellen* und *Transitionen*, sowie *Marken* und *Kanten*. Stellen (engl. places) werden durch Kreise symbolisiert und modellieren passive Komponenten eines Prozesses. Jeder Stelle wird eine Kapazität zugeordnet, die angibt, wie viele Marken von der Stelle aufgenommen werden können. Wird keine Kapazität angegeben, kann die Stelle unendlich viele Marken aufnehmen. Marken (engl. Token) können Elemente der realen Welt oder die Erfüllung von Bedingungen symbolisieren (Reisig, 2010).

Die aktiven Komponenten eines Prozesses werden als Rechtecke dargestellt und als Transitionen bezeichnet. Ihre Ausführung heißt *schalten* (engl. firing). Das Schalten von Transitionen sorgt dafür, dass ein Markenfluss im Petri-Netz entsteht (Abel, 1990). Stellen und Transitionen werden durch gerichtete Kanten miteinander verbunden, die die Beziehung zwischen den beiden Knotentypen des Graphen darstellen. Dabei ist nur eine Verbindung unterschiedlicher Knotentypen erlaubt. Kanten kann ein Gewicht zugeordnet werden, das angibt, wie viele Marken bei einem Schaltvorgang über die Kante fließen. Wird kein Kantengewicht angegeben, ist es eins.

Die Markierungen, die die Stellen zu Beginn der Petri-Netz-Simulation erhalten, werden als Anfangsmarkierung bezeichnet. Im Laufe einer Simulation verändern sich die Markierungen der einzelnen Stellen ständig.

Mathematisch kann ein Petri-Netz somit als 6-Tupel  $N = (P, T, F, K, W, M_0)$  beschrieben werden (vgl. Abel, 1990; Reisig, 1982), in dem

- $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$  die Menge der Stellen,
- $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$  die Menge der Transitionen,
- $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$  die Menge der Kanten (Flussrelationen),
- $K : P \in \mathbb{N}^+$  die Kapazität jeder Stelle,
- $W : F \in \mathbb{N}^+$  das Gewicht jeder Kante und
- $M_0 : P \in \mathbb{N}$  die Anfangsmarkierung jeder Stelle

bezeichnen.

### 2.3.2 Schaltregeln

Zur Steuerung des Markenflusses gibt es in Petri-Netzen Schaltregeln für Transitionen. In der Prozesssimulation wird dadurch eine Überprüfung von Bedingungen ermöglicht. Bevor die Schaltregeln erläutert werden können, müssen die Begriffe *Vorbereich* und *Nachbereich* eines Knotens definiert werden (vgl. Abel, 1990).

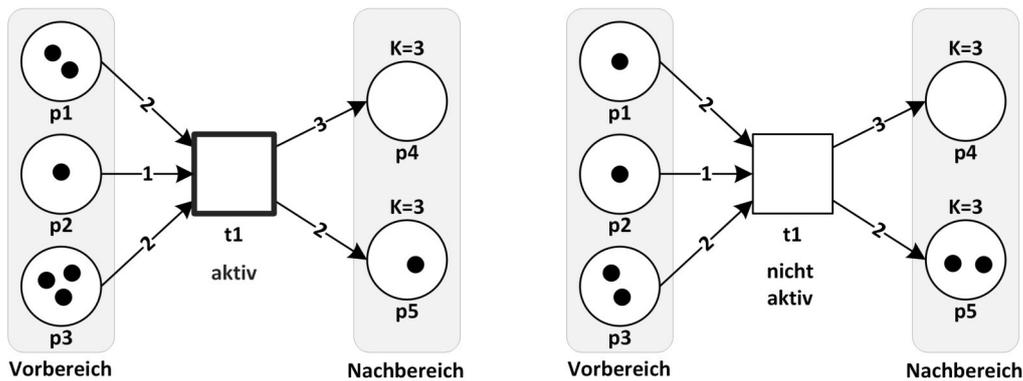
Die Menge aller Knoten  $\bullet x \in P \cup T$ , von denen Kanten zu dem Knoten  $x$  führen, heißen *Vorbereich* von  $x$ :

$$\bullet x = \{y \mid (y, x) \in F\} \tag{2.1}$$

Die Menge aller Knoten  $x \bullet \in P \cup T$ , von denen Kanten vom Knoten  $x$  abgehen, heißen *Nachbereich* von  $x$ :

$$x \bullet = \{y \mid (x, y) \in F\} \quad (2.2)$$

Damit eine Transition schalten kann, muss sie aktiv sein. Dafür müssen alle Stellen des Vorbereichs der Transition ausreichend Marken zur Verfügung stellen und alle Stellen ihres Nachbereichs ausreichend freie Kapazität besitzen. Das Kantengewicht einer Kante zwischen Stelle und Transition gibt an, wie viele Marken von der Stelle beim Schaltvorgang entfernt werden und somit zur Verfügung stehen müssen. Das Kantengewicht einer Kante zwischen Transition und Stelle legt entsprechend fest, wie viele Marken auf der Stelle erzeugt werden, wenn die Transition schaltet.



**Abbildung 2.3:** Vor- und Nachbereich einer Transition (links) aktiv und (rechts) nicht aktiv

Die Transition  $t_1$  in Abbildung 2.3 besitzt die drei Stellen  $\{p_1, p_2, p_3\}$  als Vorbereich und die beiden Stellen  $\{p_4, p_5\}$  als Nachbereich. Links ist ein Beispiel gezeigt, in dem die Transition  $t_1$  aktiv und damit schaltbereit ist. Alle Stellen des Vorbereichs tragen ausreichend Marken und die Kapazitäten der Stellen des Nachbereichs sind ausreichend groß, um weitere Marken dort abzulegen. Rechts ist ein Beispiel gezeigt, in dem  $t_1$  nicht aktiv ist. Zum einen reicht die Markierung von Stelle  $p_1$  mit einer Marke nicht aus, da das Kantengewicht  $W(p_1, t_1) = 2$  ist und nur eine Marke vorliegt. Außerdem reicht die Kapazität von Stelle  $K(p_5) = 3$  nicht aus, um noch zwei weitere Marken aufzunehmen. Bereits einer dieser Gründe ist ausreichend, um eine Aktivierung von  $t_1$  zu verhindern.

Eine Transition kann nur schalten, wenn sie aktiviert ist. Schaltet sie schließlich, werden genau so viele Marken von den Stellen des Vorbereichs entfernt, wie es die eingehenden Kantengewichte vorsehen. Nach Beendigung des Ereignisses werden genau so viele Marken im Nachbereich der Transition erzeugt, wie von den abgehenden Kantengewichten angegeben.

Innerhalb eines Netzes kann es vorkommen, dass mehrere Transitionen aktiv sind und schalten könnten. Besitzen die Transitionen keine gemeinsamen Stellen im Vor- und Nachbereich, sind sie unabhängig voneinander und werden als *nebenläufig* bezeichnet (vgl. Rosenstengel und Winand, 1991). Die Nebenläufigkeit bewirkt, dass sie zur gleichen Zeit schalten können. Haben Transitionen dagegen gemeinsame Stellen im Vor- oder Nachbereich, kann es zu einem *Konflikt* kommen.

## Konflikte

Es wird zwischen einem *Verzweigungskonflikt* und einem *Wettbewerbskonflikt* unterschieden (vgl. Rosenstengel und Winand, 1991). Ein *Verzweigungskonflikt* tritt auf, wenn zwei oder mehr Transitionen die Marken einer bestimmten Stelle ihres Vorbereichs zum Schalten benötigen, aber nicht genügend Marken für das Schalten aller Transitionen zur Verfügung stehen. Ein *Wettbewerbskonflikt* tritt dagegen auf, wenn mehrere Transitionen nach dem Schalten Marken auf einer Stelle im Nachbereich ablegen möchten, die aber nicht für alle Marken ausreichend Kapazität besitzt.

In Abbildung 2.4 ist je ein einfaches Beispiel für einen Verzweigungs- und einen Wettbewerbskonflikt in einem Stellen-Transitions-Netz dargestellt. Beim Verzweigungskonflikt wollen die beiden Transitionen  $t_1$  und  $t_2$  auf dieselbe Marke von Stelle  $p_2$  zugreifen. Beim rechts dargestellten Wettbewerbskonflikt wollen beide Transitionen  $t_1$  und  $t_2$  eine Marke auf der Stelle  $p_3$  ablegen. Die Stelle hat aber nur eine Kapazität von  $K = 1$  und kann deshalb nur eine Marke aufnehmen.

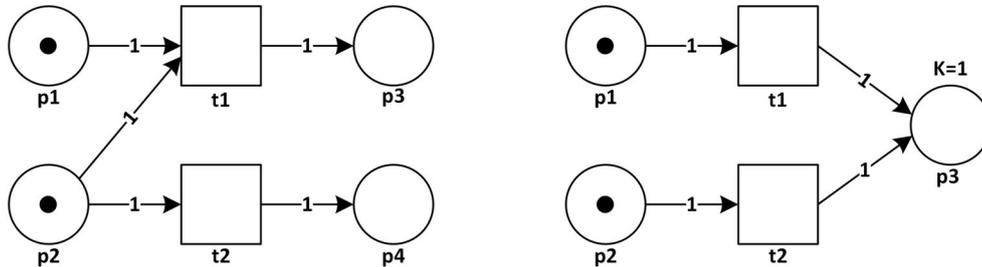


Abbildung 2.4: (links) Verzweigungskonflikt und (rechts) Wettbewerbskonflikt

### Konfliktlösung

Die Konflikte lassen sich auf vier Arten lösen (Rosenstengel und Winand, 1991; David und Alla, 2005):

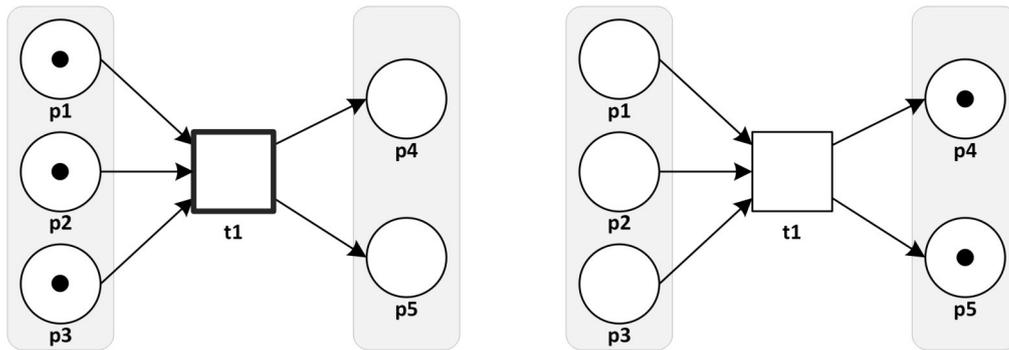
1. Aktives Eingreifen des Modell-Nutzers während der Simulation. Der Nutzer bestimmt, welche der aktiven Transitionen schalten soll.
2. Einführung von Prioritäten für die Transitionen.
3. Anpassung der Netzstruktur, zum Beispiel durch Einführung zusätzlicher Stellen.
4. Einführung von Entscheidungsregeln, zum Beispiel durch relative Wahrscheinlichkeiten.

### 2.3.3 Klassen

Petri-Netze können unterschiedlich komplex sein (vgl. Tabelle 2.1). Für viele Prozesse reicht die Modellierung im bisher beschriebenen Stellen/Transitions-Netz aus. Einige Prozesse, in denen komplexere Strukturen abgebildet werden müssen, verlangen jedoch nach einer erweiterten Modellform. Im Folgenden werden die Petri-Netz-Klassen in der Reihenfolge ihrer Komplexität vorgestellt. Als weitere Netzklasse können noch die Prädikat/Transitions-Netze genannt werden. Sie besitzen unterscheidbare Marken und Prädikate an Stellen und Transitionen. Da sie in dieser Arbeit nicht zur Modellierung von Messprozessen verwendet wurden, wird nicht genauer auf diese Netzklasse eingegangen.

Tabelle 2.1: Netzklassen (nach von Aspern, 2003)

Netzklasse	Marken	Platzkapazität	Kantengewicht
Bedingungs/Ereignis-Netze	Nicht unterscheidbar (anonym)	1	1
Stellen/Transitions-Netze	Nicht unterscheidbar (anonym)	$\geq 1$ begrenzt oder unendlich	$\geq 1$
Farbige Petri-Netze	Unterscheidbar mit und ohne interner Struktur	begrenzt oder unendlich	$\geq 1$



**Abbildung 2.5:** *Bedingungs/Ereignis-Netz: (links) vor dem Schaltvorgang und (rechts) nach dem Schaltvorgang*

### Bedingungs/Ereignis-Netze

Die einfachste und ursprüngliche Form der Petri-Netze sind die Bedingungs/Ereignis-Netze (B/E-Netze), in denen die Kapazitäten der Stellen und die Gewichte der Kanten eins sind. Stellen repräsentieren in diesen Netzen Bedingungen, Transitionen modellieren Ereignisse. Liegt eine Marke auf einer Stelle, liegt die Bedingung vor - liegt keine Marke auf der Stelle, liegt die Bedingung entsprechend nicht vor (vgl. Reisig, 1982). Sind alle Bedingungen des Vorbereichs einer Transition erfüllt und die Bedingungen im Nachbereich nicht erfüllt, ist die Transition aktiv und kann schalten. In Abbildung 2.5 (links) ist die Transition  $t_1$  aktiv, da Marken auf den Stellen  $p_1$ ,  $p_2$  und  $p_3$  liegen und die Stellen  $p_4$  und  $p_5$  frei sind. Durch das Schalten von  $t_1$  werden die Marken vom Vorbereich der Transition entfernt. Da das Kantengewicht in B/E-Netzen immer eins ist, wird am Ende des Schaltvorgangs je eine Marke auf den beiden Stellen  $p_4$  und  $p_5$  im Nachbereich der Transition  $t_1$  erzeugt (vgl. Abbildung 2.5 (rechts)).

### Stellen/Transitions-Netze

In Stellen/Transitions-Netzen (S/T-Netzen) werden durch Stellen die Zustände eines Prozesses oder Objektes modelliert. Transitionen modellieren (wie im B/E-Netz) die Ereignisse oder Aktivitäten. Stellen können in S/T-Netzen mehrere Marken aufnehmen und auch die Kantengewichte können Werte größer als eins annehmen (vgl. Reisig, 1982).

Abbildung 2.6 zeigt den Schaltvorgang innerhalb eines S/T-Netzes. Die Transition  $t_1$  ist aktiv (links), da alle Stellen ihres Vorbereichs über ausreichend Marken verfügen und alle Stellen des Nachbereichs ausreichend freie Plätze zur Verfügung stellen. Rechts wird das Netz nach dem Schalten gezeigt. Je zwei Marken wurden von den Stellen  $p_1$  und  $p_3$  entfernt, da die Kantengewichte  $W(p_1, t_1) = W(p_3, t_1) = 2$  sind. Von der Stelle  $p_2$  wurde eine Marke entfernt, da das Kantengewicht  $W(p_2, t_1) = 1$  ist. Durch den Schaltvorgang wurden drei Marken auf der Stelle  $p_4$  erzeugt, da  $W(t_1, p_4) = 3$ , sowie zwei Marken auf der Stelle  $p_5$ , da  $W(t_1, p_5) = 2$ .

### Farbige Petri-Netze

Eine Komplexitätsstufe höher sind die farbigen (colored) Petri-Netze (CP-Netze) einzuordnen. Sie basieren auf S/T-Netzen und werden durch die Einführung von verschiedenfarbigen Marken erweitert. Marken mit gemeinsamen Eigenschaften bzw. Attributen werden zu einem Markentyp mit der gleichen Farbe zusammengefasst. So könnte zum Beispiel das Messpersonal als ein Markentyp definiert werden und die Messpunkte als weiterer Markentyp. Die farbigen Marken können als eigenständige Objekte aufgefasst werden, die Informationen durch das Petri-Netz transportieren (Abel, 1990). Die Umsetzung solcher CP-Netze ist aufwändiger als die Modellierung in einem S/T-Netz. Für jede Kante muss festgelegt werden, wie viele Marken welcher Farbe beim Schaltvorgang über

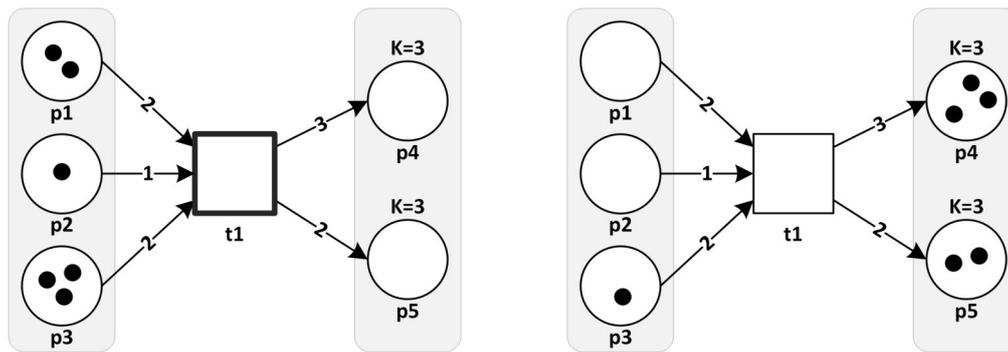


Abbildung 2.6: Stellen/Transitions-Netz: (links) vor dem Schaltvorgang und (rechts) nach dem Schaltvorgang

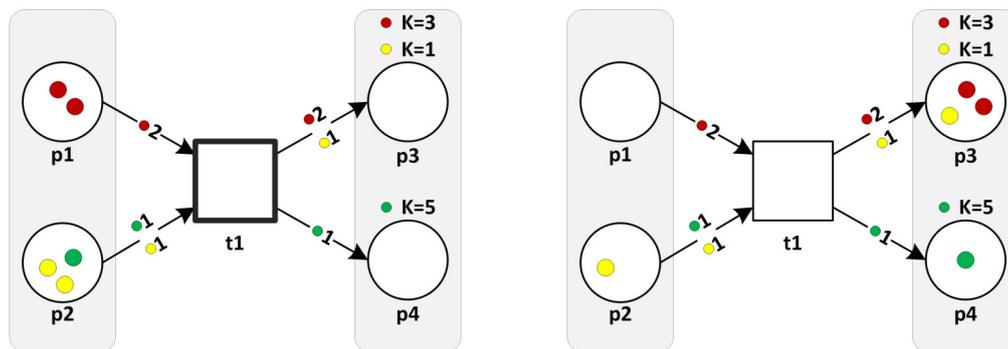


Abbildung 2.7: Farbiges Petri-Netz: (links) vor dem Schaltvorgang und (rechts) nach dem Schaltvorgang

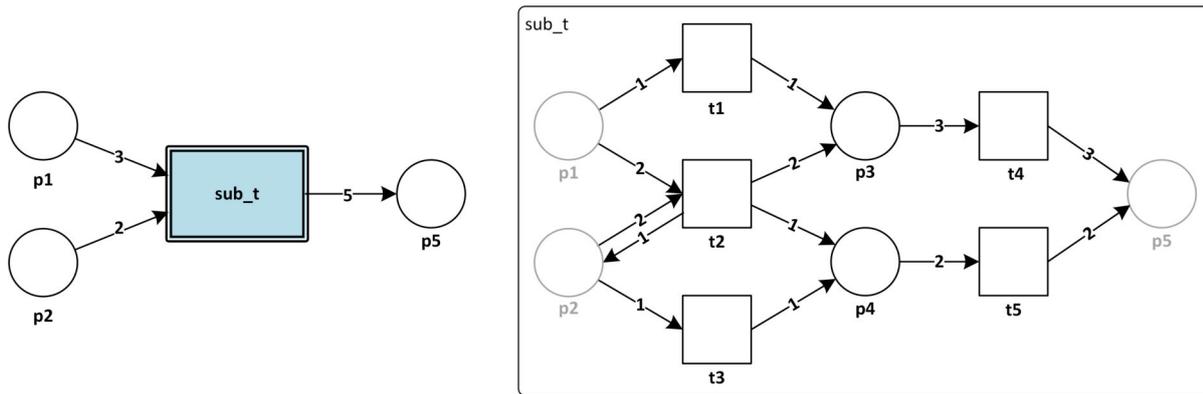
die Kante laufen (vgl. Abbildung 2.7). Außerdem muss für jede Stelle die Kapazität für jede Markenfarbe definiert werden. In vielen Fällen können dadurch allerdings Teilnetze eingespart werden, was wiederum zu einer besseren Übersichtlichkeit beiträgt. So ist insbesondere die Zusammenfassung mehrerer Stellen zu einer Stelle möglich, da in farbigen Petri-Netzen nicht allein die Stellen die Objektinformationen symbolisieren, sondern die Marken die wesentlichen Objektinformationen in sich tragen.

### 2.3.4 Hierarchisierung und Modularisierung

Das Konzept der Hierarchisierung beruht darauf, einen komplexen Prozess zunächst grob zu modellieren und anschließend die einzelnen Tätigkeiten genauer abzubilden. Huber u. a. (1991) geben eine Einführung für die Bildung von Hierarchiestufen (levels) innerhalb von Petri-Netz-Modellen. Hierarchische Modelle haben den Vorteil, dass sie

- Details in konsistenter Weise verbergen,
- sich in klar definierte Komponenten (sogenannte Sub-Prozesse bzw. Module) unterteilen lassen,
- wiederverwendbare Komponenten besitzen,
- sowohl eine Top-down-Modellierungsstrategie, als auch eine Bottom-up-Modellierungsstrategie unterstützen und
- eine starke grafische Ausdrucksmöglichkeit besitzen.

Die obere Hierarchiestufe repräsentiert die grobe Struktur des Prozesses. Über Substitut-Knoten, die sowohl Stellen als auch Transitionen sein können, wird das Netz sukzessive verfeinert.



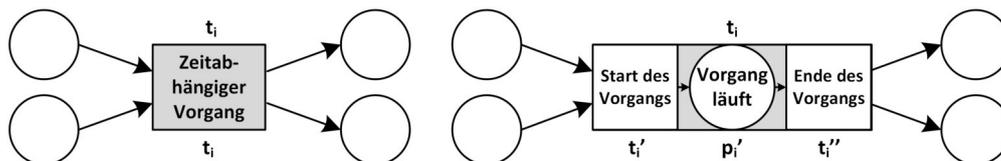
**Abbildung 2.8:** Hierarchisches Petri-Netz: (links) obere Hierarchiestufe mit der Substitut-Transition *sub\_t* und (rechts) Modul *sub\_t*

In Abbildung 2.8 wird ein Beispiel für einen hierarchischen Prozess gezeigt. Links ist die obere Hierarchiestufe mit dem hinterlegten Modul „sub\_t“ dargestellt. Dieser Prozess wird in einer weiteren Hierarchiestufe detaillierter modelliert, was in Abbildung 2.8 (rechts) gezeigt wird. Hierbei wird das Prinzip der Substitut-Transition angewendet, wie es von Huber u. a. (1991) vorgeschlagen wurde. Die Marken auf den Eingangsstellen der Substitut-Transition werden in das Modul übertragen. Die Eingangsstellen des Moduls werden in grau dargestellt. Gleiches gilt für die Ausgangsstellen des Subprozesses. Die Marken, die auf dieser Stelle am Ende des Prozesses erzeugt werden, werden wieder in die höhere Hierarchieebene überführt.

### 2.3.5 Modellierung zeitabhängiger Vorgänge

Im Allgemeinen werden durch das Schalten einer Transition die Marken aus dem Vorbereich entfernt und ohne Zeitverzögerung neue Marken im Nachbereich der Transition erzeugt. Für die Modellierung und Simulation zeitabhängiger Vorgänge, zu der auch die Durchführung einer Messung gehört, wurden die Petri-Netze erweitert (Ramchandani, 1974). Eine zeitabhängige Transition kann durch eine Aufspaltung in zwei Sub-Transitionen und eine dazwischenliegende Stelle visualisiert werden (vgl. Abbildung 2.9). Beim Schalten der Transition  $t_i$  schaltet zunächst die Sub-Transition  $t'_i$ , indem sie alle benötigten Marken aus dem Vorbereich entfernt und unmittelbar auf der Stelle  $p'_i$  ablegt. Auf dieser Stelle werden die Marken solange festgehalten, bis die Dauer  $\tau_i$  verstrichen ist. Nach Ablauf der Dauer werden die Marken freigegeben, die Sub-Transition  $t''_i$  schaltet und erzeugt die vorgegebenen Marken auf den Stellen des Nachbereichs (Ramchandani, 1974).

Die Dauer  $\tau_i$  der Transitionen kann entweder durch eine feste, nicht negative Zahl oder durch eine Zufallszahl angegeben werden, die bei einer unendlich häufigen Durchführung durch eine Verteilungsfunktion approximiert werden kann (Ramchandani, 1974). In Abbildung 2.10 wird als Beispiel für eine solche Verteilungsfunktion eine Rechteckverteilung gezeigt. Für alle zeitabhängigen Transitionen sind in diesem Fall die untere und obere Grenze ( $\tau_i - \omega$  und  $\tau_i + \omega$ ) für die Dauer festzulegen. Die Verteilungsfunktion kann je nach Tätigkeit, die durch die Transition modelliert wird, variieren. Innerhalb des Modells kann für jede Transition eine eigene Verteilungsfunktion gewählt werden.



**Abbildung 2.9:** Modellierung eines zeitabhängigen Vorgangs (nach Ramchandani, 1974 und Abel, 1990)

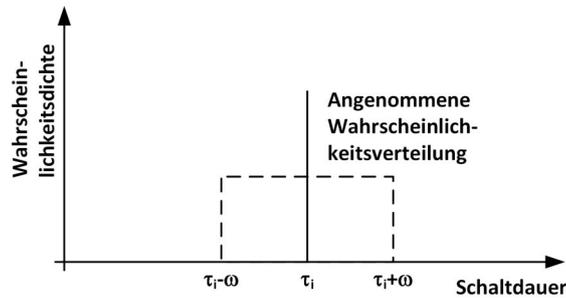


Abbildung 2.10: Zufällige Schaltdauer, approximiert durch eine Rechteckverteilung (nach Ramchandani, 1974)

### 2.3.6 Simulation

Mithilfe einer Simulation soll die durch das Petri-Netz-Modell approximierte Realität imitiert werden. In Abbildung 2.11 wird ein Beispiel für eine Simulation gezeigt. Algorithmus 1 zeigt den entsprechenden Pseudo-Code zur Simulation. Das Petri-Netz erhält zu Beginn der Simulation seine Anfangsmarkierung  $M_0$ . Im Beispiel beinhaltet die Anfangsmarkierung drei Marken auf der Stelle  $p_1$  und zwei Marken auf der Stelle  $p_2$  (s. Abbildung 2.11 oben links). Im ersten Simulationsschritt wird ermittelt, welche Transitionen des Petri-Netzes schaltfähig sind. Falls es Konflikte zwischen einzelnen Transitionen gibt (hier zwischen  $t_2$  und  $t_3$ ), werden die Prioritäten der Transitionen geprüft. Die Prioritäten werden durch  $P = x$  in den Transitionen symbolisiert, wobei eine größere Zahl die höhere Priorität zeigt. Transitionen mit höherer Priorität erhalten den Vorrang gegenüber Transitionen mit geringerer Priorität. Da  $t_2$  die höhere Priorität besitzt, sind zum Zeitpunkt  $z_0$  die Transitionen  $t_1$  und  $t_2$  aktiv.

---

#### Algorithmus 1 Petri-Netz Simulation

---

```

1: procedure SIMULATION(net, token)
2:   net.setInitialMarking(token)
3:   finished = false
4:   time = 0
5:   numberFiringT = 0
6:   while finished = false do
7:     activeTransitions = net.getActiveTransitions()
8:     for at : activeTransitions do
9:       net.fireTransition(at)
10:      numberFiringT++;
11:    end for
12:    time = net.nextTimeStep()
13:    completedTransitions = net.getCompletedTransitions()
14:    for ct : completedTransitions do
15:      net.releaseTransitions(ct)
16:      numberFiringT--;
17:    end for
18:    if activeTransitions = 0 and numberFiringT = 0 then
19:      finished = true
20:    end if
21:  end while
22: end procedure

```

---

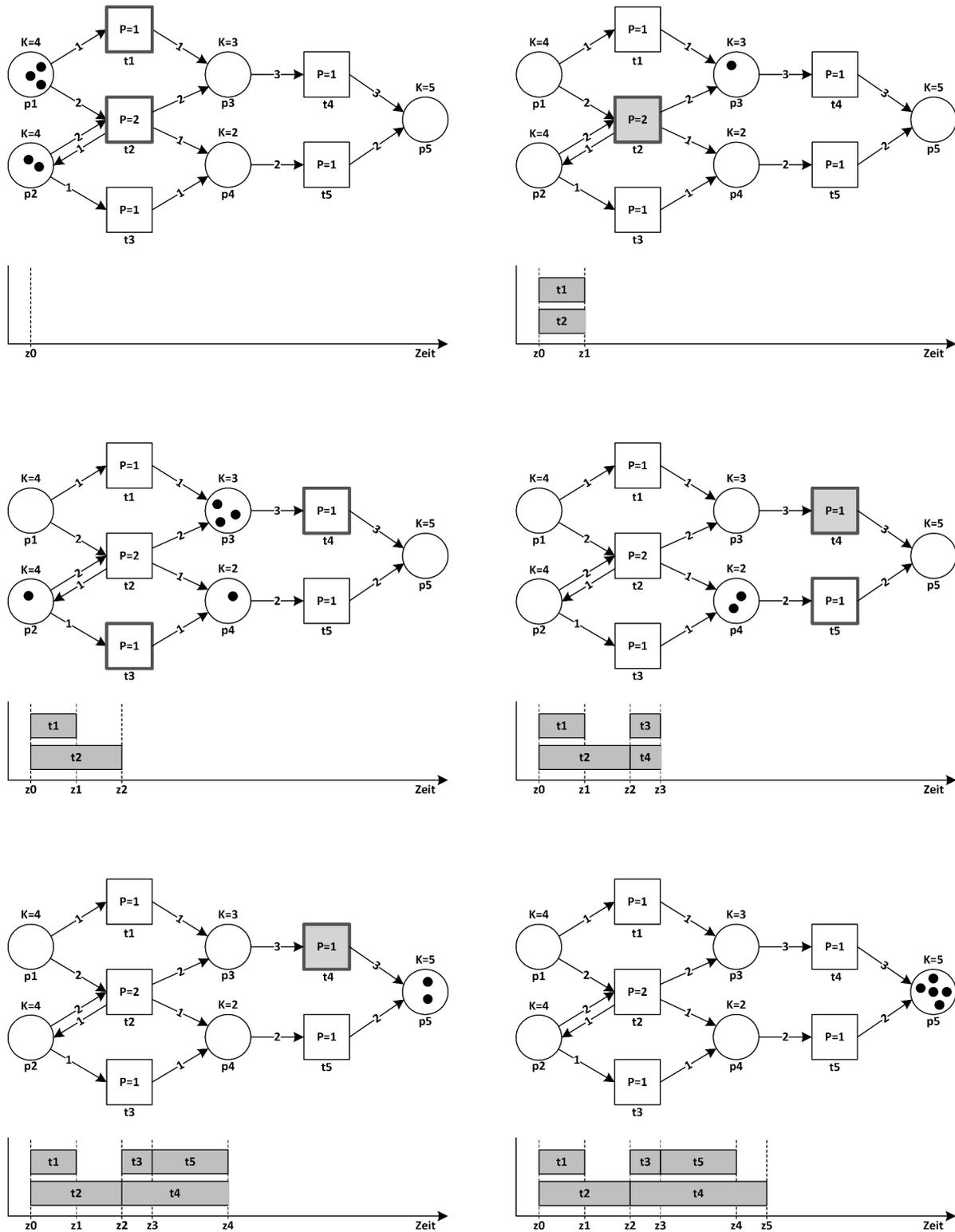


Abbildung 2.11: Beispiel für die Simulation eines S/T-Netzes mit deterministischen Dauern für das Schalten der Transitionen (Schaltdauern s. Tabelle 2.2)

Im nächsten Schritt schalten die aktiven Transitionen und die Marken werden aus dem jeweiligen Vorbereich entfernt. Handelt es sich um Transitionen mit Zeitbezug, werden die Marken erst nach dem Ablauf der Dauer  $\tau_i$  im Nachbereich der jeweiligen Transition erzeugt. Handelt es sich um Transitionen ohne Zeitbezug, erfolgt die Markenerzeugung dagegen unmittelbar. In Tabelle 2.2 werden die Schaltdauern der Transitionen aufgeführt. Nachdem die erste Transition ihre Marken

im Nachbereich erzeugt hat (hier:  $t1$  zum Zeitpunkt  $z1$ ) wird wieder geprüft, ob Transitionen schaltfähig sind.  $t2$  ist zum Zeitpunkt  $z1$  noch nicht abgeschlossen. Da sich nicht genügend Marken auf den Stellen im Netz befinden, ist keine weitere Transition schaltfähig. Erst zum Zeitpunkt  $z2$ , wenn  $t2$  abgeschlossen ist, werden Marken auf den Stellen  $p2$ ,  $p3$  und  $p4$  erzeugt und die Transitionen  $t3$  und  $t4$  werden als aktive Transitionen ermittelt.

Zum nächsten Zeitschritt  $z3$  wird die Transition  $t3$  abgeschlossen, während  $t4$  noch läuft. Beim Beenden der Transition  $t3$  wird eine zusätzliche Marke auf der Stelle  $p4$  erzeugt, wodurch  $t5$  aktiv wird und schalten kann. Nach der Dauer  $\tau_5$  ist der nächste Zeitschritt  $z4$  erreicht und die Transition  $t5$  wurde beendet, wodurch zwei Marken auf der Stelle  $p5$  erzeugt werden. Die Transition  $t4$  läuft noch und wird beim nächsten Zeitschritt  $z5$  abgeschlossen, wobei drei zusätzliche Marken auf der Stelle  $p5$  erzeugt werden. Die Simulation des Netzes ist abgeschlossen, da es keine schaltfähigen Transitionen mehr im Netz gibt und alle Transitionen beendet wurden.

**Tabelle 2.2:** Schaltdauern der Transitionen des Simulationsbeispiels in Abbildung 2.11

Transition	Schaltdauer $\tau$
t1	15 Min.
t2	30 Min.
t3	10 Min.
t4	45 Min.
t5	25 Min.

Das Schalten aller Transitionen wird in einem Ablaufplan mit Anfangs- und Endzeit abgespeichert. Der vollständige Ablaufplan des Simulationsbeispiels ist in Abbildung 2.11 unten rechts zu sehen. Die Gesamtdauer des Prozesses von 75 Minuten ist nach dem Abschluss der letzten Transition verfügbar.

## 2.4 Modellierung und Simulation von Messprozessen

### 2.4.1 Petri-Netz-Modelle von Messprozessen

Im Folgenden werden einige Messprozesse als Petri-Netze modelliert. Anschließend kann eine Simulation der Messprozesse erfolgen. Es handelt sich um ausgewählte, grundlegende Messprozesse. Weitere Petri-Netz-Modelle anderer Prozesse können jederzeit aufgestellt werden.

Die Messprozesse werden als farbige Petri-Netze modelliert. Messpunkte und Personen werden als farbige Marken abgebildet. Die Nutzung von farbigen Marken bietet den Vorteil, dass Personen- und Punkt-Marken als Objekte durch das Petri-Netz wandern können und an jeder Transition direkt Informationen zu ihrem Zustand zur Verfügung stehen. Wichtige Informationen für einen Personen-Marken sind z. B. der Aufgabenbereich der Person (Beobachter oder Gehilfe), die Qualifikation oder die aktuelle Position der Person im Messgebiet. Eine wichtige Information für einen Punkt-Marken ist u. a. der aktuelle Zustand. Er beinhaltet Angaben darüber, ob der Punkt bereits aufgebaut wurde, in welche Richtung das Prisma ausgerichtet ist oder ob der Punkt in eine gerade laufende Messung eingebunden ist.

In Abbildung 2.12 ist die Legende der nachfolgenden farbigen Petri-Netze dargestellt. Als Geodäten-Marken werden drei verschiedene Markenfarben vorgesehen, um später in einzelnen Petri-Netzen die verschiedenen Aufgaben oder Qualifikationsanforderungen berücksichtigen zu können.

Falls es sinnvoll ist, wird die Unterteilung des Prozesses in Module vorgenommen. Der Gesamtprozess wird dann grob auf der höheren Hierarchieebene modelliert, während die einzelnen Module auf der unteren Hierarchieebene dargestellt werden. Diese Vorgehensweise bietet sich z. B. bei der tachymetrischen Aufnahme und Absteckung von Punkten an, da die Module Aufbau und Stationierung sowie Abbau wiederverwendet werden können.

## Legende



Abbildung 2.12: Legende der farbigen Petri-Netze

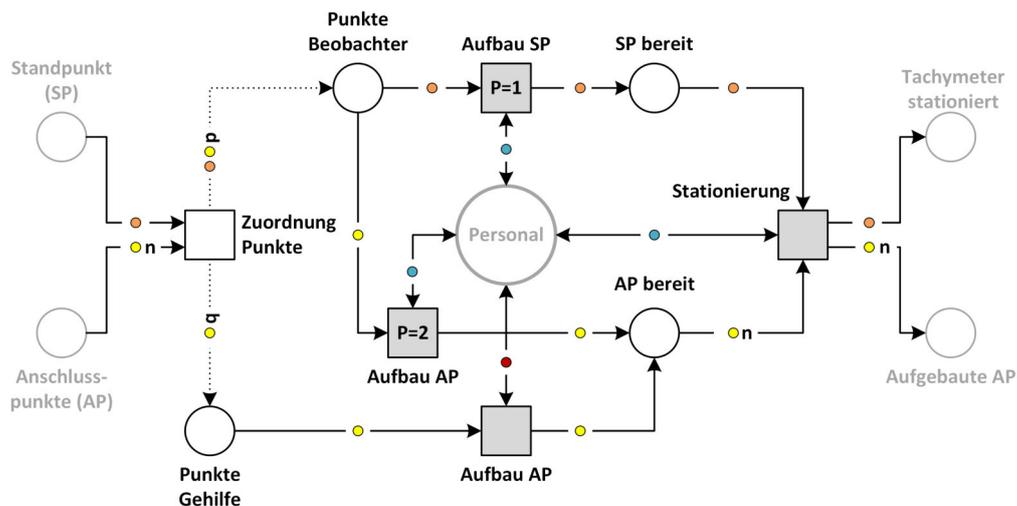


Abbildung 2.13: Modul Aufbau und Stationierung eines Tachymeters

### Aufbau und Stationierung eines Tachymeters

Innerhalb des Moduls **Aufbau und Stationierung** eines Tachymeters (Abbildung 2.13) wird der Aufbau der Anschlusspunkte und des Standpunktes durch das Personal sowie die freie Stationierung des Tachymeters modelliert.

Die Marken auf den Eingangsstellen *Personal*, der *Standpunkt (SP)* und die *Anschlusspunkte (AP)* werden aus der höheren Hierarchieebene übertragen. Den *Aufbau der Anschlusspunkte* können sowohl der Beobachter (blaue Marke) als auch ein Gehilfe (rote Marke) übernehmen. Liegen ausreichend Marken auf diesen Stellen, kann die Transition *Zuordnung Punkte* starten. Dem Beobachter wird dabei der Standpunkt und  $p$  Anschlusspunkte zugeordnet. Dem Gehilfen werden  $q$  Anschlusspunkte zugeteilt, wobei  $p + q = n$ , mit  $n = \text{Anzahl der Anschlusspunkte}$ . Die Transition *Aufbau AP* des Gehilfen ist jetzt schaltfähig. Der Beobachter kann prinzipiell den Standpunkt und die Anschlusspunkte aufbauen, wodurch ein Verzweigungskonflikt zwischen den Transitionen *Aufbau AP* und *Aufbau SP* entsteht. Dieser Konflikt wurde durch die höhere Priorisierung der Transition *Aufbau AP* gelöst, weswegen er erst mit dem Aufbau der Anschlusspunkte startet. Die Reihenfolge des Aufbaus wird in derselben Reihenfolge vorgenommen, wie die Marken auf der Stelle abgelegt wurden.

Die Schaltdauer der Transition berechnet sich mithilfe eines Laufzeitmodells, das in Abschnitt 2.4.2 vorgestellt wird. Ist das Schalten einer Transition abgeschlossen, wird die entsprechende Personen-Marke zurück zur Stelle *Personal* transferiert und die Punkt-Marke auf der Stelle *AP bereit* bzw. *SP bereit* abgelegt.

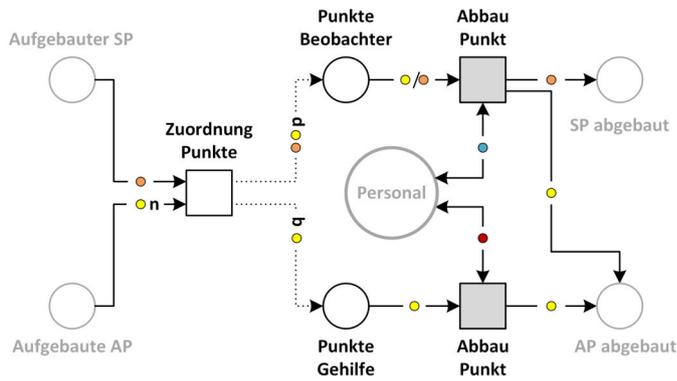


Abbildung 2.14: Modul Abbau

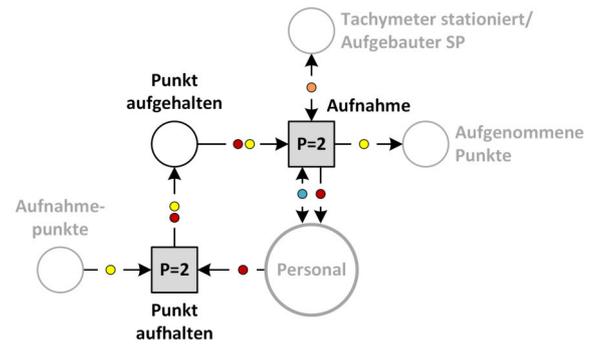


Abbildung 2.15: Modul tachymetrische Aufnahme

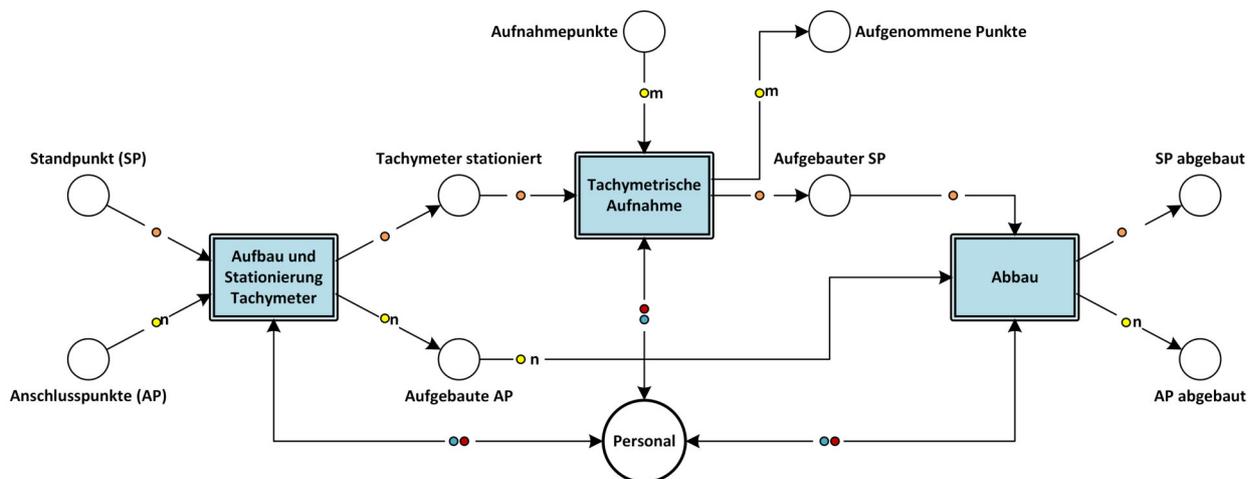


Abbildung 2.16: Farbiges Petri-Netz für die tachymetrische Aufnahme von Punkten

Die *Stationierung* des Tachymeters kann erfolgen, sobald die vordefinierte Anzahl von  $n$  Anschlusspunkten sowie der Standpunkt aufgebaut wurden. Die Schaltdauer der Transition *Stationierung* ist davon abhängig, wie viele Punkte für die Stationierung angezielt werden. Mit dem Abschluss des Schaltvorgangs ist das Modul abgeschlossen, da keine weitere Transition mehr schaltfähig ist. Die Marken auf den Ausgangsstellen (hier *Tachymeter stationiert*, *aufgebaute AP* und *Personal*) wird in die höhere Hierarchieebene übertragen (s. Abbildung 2.16).

### Abbau von Messpunkten

Das Modul **Abbau** (Abbildung 2.14) besitzt die Eingangsstellen *aufgebaute SP*, *aufgebaute AP* und *Personal*. Liegen ausreichend Marken auf diesen Stellen, kann die Transition *Zuordnung Punkte* starten. Dem Beobachter wird dabei der Standpunkt und  $p$  Anschlusspunkte zugeordnet. Dem Gehilfen werden  $q$  Anschlusspunkte zugeteilt, wobei  $p + q = n$ . Danach werden die Punkte in der Reihenfolge abgebaut, in der sie auf den Stellen *Punkte Beobachter* und *Punkte Gehilfe* liegen. Die Ausgangsstellen des Moduls sind *SP abgebaut*, *AP abgebaut* und *Personal*. Das Modul ist abgeschlossen, wenn keine Transition mehr läuft und keine weitere mehr schaltfähig ist.

### Tachymetrische Aufnahme

Ziel der tachymetrischen Aufnahme ist die Koordinatenbestimmung ausgewählter Punkte der Örtlichkeit in einem definierten Koordinatensystem. Dafür wird ein Tachymeter über mehrere bekannte Anschlusspunkte stationiert. Anschließend erfolgt die Aufnahme aller zu bestimmenden Punkte mit

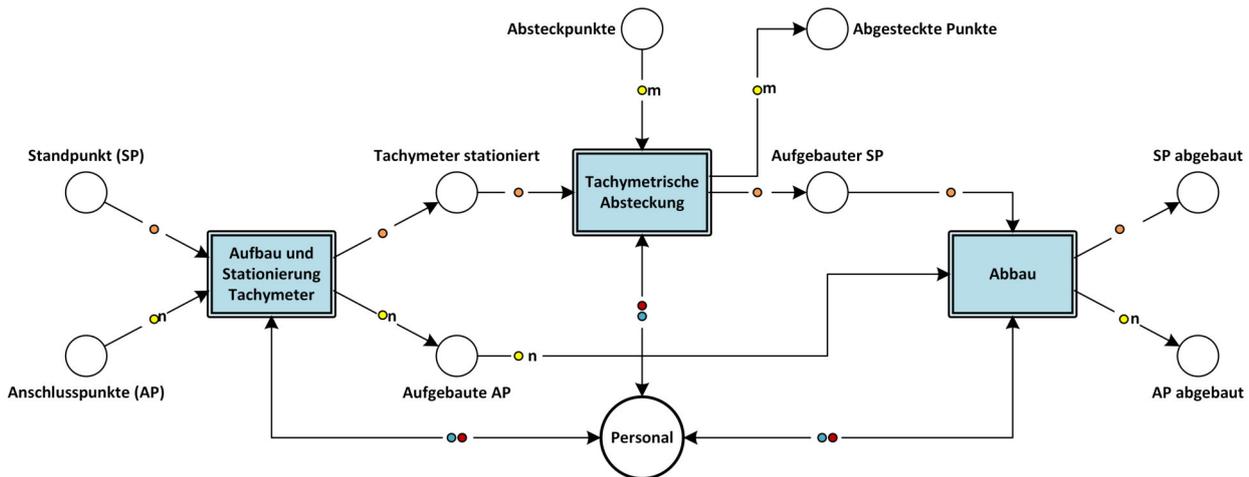


Abbildung 2.17: Farbiges Petri-Netz für die tachymetrische Absteckung von Punkten

einem Tachymeter. Der Gehilfe hält die aufzunehmenden Punkte dafür mit einem Lotstab auf. Im Anschluss an die Aufnahme werden die Anschlusspunkte und der Standpunkt abgebaut und der Prozess der tachymetrischen Aufnahme ist beendet.

Das Petri-Netz in Abbildung 2.16 setzt sich aus den Modulen Aufbau und Stationierung, tachymetrische Aufnahme und Abbau zusammen. Die Modelle der Module Aufbau und Stationierung (Abbildung 2.13) und Abbau (Abbildung 2.14) wurden in den beiden vorangegangenen Abschnitten bereits beschrieben.

Liegt die notwendige Anfangsmarkierung für das Modul **tachymetrische Aufnahme** (s. Abbildung 2.15) auf den Eingangsstellen *Aufnahmepunkte*, *Personal* und *Tachymeter stationiert* vor, kann die Transition *Punkt aufhalten* schalten. Der Gehilfe hält den ersten aufzunehmenden Punkt mit dem Lotstab auf. Anschließend erfolgt die Aufnahme dieses Punktes durch den Beobachter in der Transition *Aufnahme*. Damit ist die Aufnahme des Punktes abgeschlossen, und die Punktmarke wird auf der Stelle *aufgenommene Punkte* abgelegt. Das Petri-Netz des Moduls ist so lange schaltfähig, wie Punktmarken auf der Stelle *Aufnahmepunkte* liegen. Sobald alle Transitionen abgeschlossen sind und keine weitere mehr schaltfähig ist, werden die Marken auf den Stellen *Personal*, *aufgenommene Punkte* und *aufgebaute SP* in die höhere Hierarchieebene übertragen.

### Tachymetrische Absteckung

Ziel der tachymetrischen Absteckung ist es, die Koordinaten bestimmter Punkte aus Planungsunterlagen in die Örtlichkeit zu übertragen. Dafür wird ein Tachymeter über mehrere bekannte Anschlusspunkte stationiert. Anschließend wird die Position der abzusteckenden Punkte über einen iterativen Prozess aus Aufhalten und Korrigieren der Position eines Reflektors ausfindig gemacht und entsprechend vermarktet. Nach der Vermarktung wird die abgesteckte Position noch einmal kontrolliert, um sicherzustellen, dass der vermarktete Punkt den Planungsunterlagen im Rahmen einer vorgegebenen Genauigkeit entspricht. Ist das der Fall, ist die Absteckung des Punktes abgeschlossen und weitere Punkte können abgesteckt werden. Falls die Bewertung der Kontrolle ergibt, dass die abgesteckte Punktposition nicht den Anforderungen entspricht, wird der Punkt erneut abgesteckt, bis die Bewertung der Kontrolle ergibt, dass die Abstecktoleranz eingehalten wurde.

In Abbildung 2.17 ist das Petri-Netz der tachymetrischen Absteckung dargestellt. Das Petri-Netz setzt sich wie bei der tachymetrischen Aufnahme aus drei Modulen zusammen. Die einzelnen Module für den Aufbau, die eigentliche Absteckung und den Abbau der aufgebauten Anschlusspunkte und des Standpunktes sind in den Abbildungen 2.13, 2.18 und 2.14 zu finden.

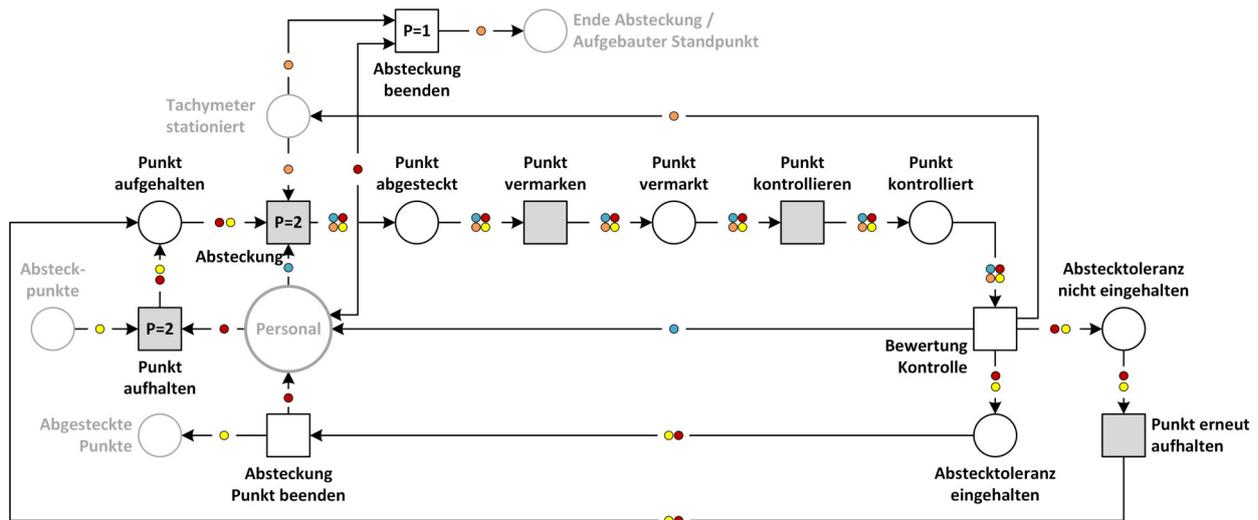


Abbildung 2.18: Modul tachymetrische Absteckung

Das Modul **tachymetrische Absteckung** (Abbildung 2.18) wird aktiviert, sobald ausreichend Marken auf dessen Eingangsstellen *Personal*, *Absteckpunkte* und *Tachymeter stationiert* liegen. Dadurch kann die Transition *Punkt aufhalten* schalten, in der der Gehilfe einen Lotstab in der Nähe des Absteckpunktes aufhält. Nach Abschluss der Transition kann die Transition *Absteckung* starten. Hierin misst der Beobachter den Reflektor an und korrigiert die Position des Reflektors, bis die gewünschte Position erreicht wurde. Daraufhin werden alle vier Marken (Beobachter, Gehilfe, Absteckpunkt, Standpunkt) auf der Stelle *Punkt abgesteckt* abgelegt und die Transition *Punkt vermarken* wird ausgeführt. Der Gehilfe vermarkt den abgesteckten Punkt und in der darauffolgenden Transition *Punkt kontrollieren* hält der Gehilfe den Lotstab auf dem vermarkten Punkt auf und der Beobachter bestimmt die Position des Punktes. In der Transition *Bewertung Kontrolle* wird überprüft, ob die geforderte Abstecktoleranz eingehalten wurde. Ist das der Fall, werden die Gehilfen-Marke und die Punkt-Marke auf der Stelle *Abstecktoleranz eingehalten* abgelegt. Daraufhin wird die Transition *Absteckung Punkt beenden* schalten, wodurch der Gehilfe zurück auf die *Personal*-Stelle und die Punkt-Marke auf die Stelle *abgesteckte Punkte* gelegt wird. Die Beobachter-Marke und die Standpunkt-Marke werden nach Abschluss der *Bewertung der Kontrolle* unabhängig von ihrem Ausgang auf den Stellen *Personal* bzw. *Tachymeter stationiert* abgelegt. Falls die Bewertung der Kontrolle ergibt, dass die *Abstecktoleranz nicht eingehalten* wurde, werden die Punkt- und Gehilfen-Marke auf der gleichnamigen Stelle abgelegt und der iterative Prozess aus *Punkt aufhalten* und *Absteckung* startet für den Punkt nochmal.

Das Modul **tachymetrische Absteckung** wird beendet, wenn keine Punkt-Marken mehr auf der Stelle *Absteckpunkte* liegen und keine der Transitionen mehr läuft oder schaltfähig ist. Das beinhaltet auch, dass alle abgesteckten Punkte die Abstecktoleranz einhalten. Die Marken der Ausgangsstellen *Personal*, *abgesteckte Punkte* und *Ende Absteckung/aufgebauter Standpunkt* werden in die höhere Hierarchieebene übertragen und das Modul **Abbau** kann starten.

### Geometrisches Nivellement

Ziel des geometrischen Nivellements ist eine Höhenübertragung von einem bekannten Höhenanschlusspunkt auf einen neuen Punkt mit unbekannter Höhe oder einem Höhenpunkt mit bekannter Höhe, falls es sich um eine Kontrolle handelt. Dafür wird ein Nivellier zwischen den Punkten aufgebaut und horizontalisiert. Auf dem bekannten Punkt wird eine Nivellierlatte aufgehoben, die als Rückblick bezeichnet wird. Nach erfolgter Ablesung des Rückblicks wird die Nivellierlatte auf dem neuen Punkt, dem Vorblick, aufgehoben und der Höhenunterschied kann nach erfolgter Ablesung

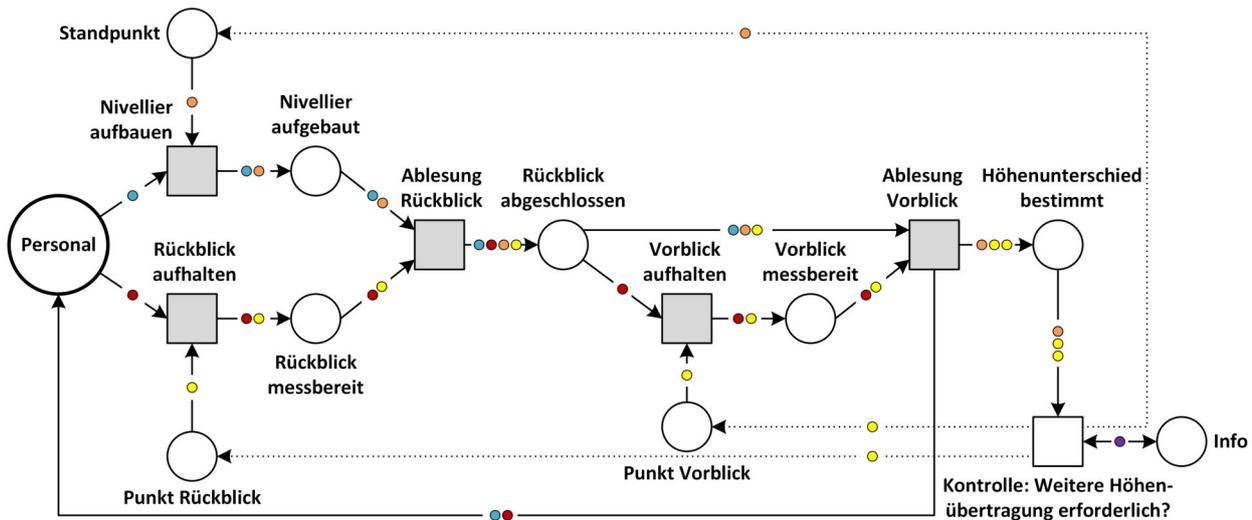


Abbildung 2.19: Geometrisches Nivellement

aus der Differenz von Rückblick und Vorblick berechnet werden. Beim Nivellement sind häufig mehrere Höhenübertragungen erforderlich, um am eigentlich zu bestimmenden Punkt anzukommen.

Für das geometrische Nivellement, dessen Petri-Netz in Abbildung 2.19 dargestellt ist, werden zwei Geodäten benötigt. Der Beobachter ist für den Aufbau und die Bedienung des Nivelliers zuständig und der Gehilfe hält die entsprechenden Punkte mit der Nivellierlatte auf. Als Anfangsmarkierung müssen je eine Beobachter-Marke und eine Gehilfen-Marke auf der Stelle *Personal* liegen. Außerdem ist eine Info-Marke auf der Stelle *Info* erforderlich. Mithilfe der Info-Marke wird überprüft, ob weitere Höhenübertragungen erforderlich sind. Hierin sind der Startpunkt und der Zielpunkt des Nivellements abgespeichert. Über die Information welche Zielweiten maximal gemessen werden sollen und ein hinterlegtes Wegenetz können die Standpunkte und Wechsellpunkte geplant werden. In der Transition *Kontrolle: Weitere Höhenübertragung erforderlich?* werden der erste Standpunkt des Nivellements und der erste Rückblick und Vorblick ermittelt. Die entsprechenden Punkt-Marken werden auf den Stellen *Standpunkt*, *Punkt Rückblick* und *Punkt Vorblick* abgelegt. Damit die Transition *Kontrolle: Weitere Höhenübertragung erforderlich?* schalten kann, müssen zusätzlich zur Info-Marke auf der Stelle *Info* zwei Punktmarken und eine Standpunkt-Marke auf der Stelle *Höhenunterschied bestimmt* liegen. Hierfür werden zunächst Dummy-Marken ohne weitere Information verwendet. Nach der Ermittlung des ersten Standpunktes sowie Rückblick und Vorblick können die Transitionen *Nivellier aufbauen* und *Rückblick aufhalten* schalten. Nachdem das Schalten der Transitionen abgeschlossen ist, liegen Marken auf den Stellen *Nivellier aufgebaut* und *Rückblick messbereit*. Dadurch kann die Transition *Ablesung Rückblick* schalten. Der Gehilfe kann nach Abschluss der Transition den *Vorblick aufhalten*. Währenddessen wartet der Beobachter bis der *Vorblick messbereit* ist. Erst dann kann die Transition *Ablesung Vorblick* schalten. Nach erfolgreicher Ablesung werden die Personen zurück auf die Stelle *Personal* gelegt und die Punkt-Marken auf die Stelle *Höhenunterschied bestimmt*. Im nächsten Schritt schaltet erneut die Transition *Kontrolle: Weitere Höhenübertragung erforderlich?*. Über die Informationen aus der Info-Marke wird geprüft, ob weitere Höhenunterschiede zu bestimmen sind oder ob der Vorblick bereits der Zielpunkt war. Sind weitere Höhenunterschiede zu bestimmen, werden die entsprechenden Punkt-Marken auf den Stellen *Standpunkt*, *Punkt Rückblick* und *Punkt Vorblick* abgelegt. Falls der Vorblick bereits der Zielpunkt ist, ist die Simulation des geometrischen Nivellements abgeschlossen.

### Statische GNSS-Messung

Neben der Punktbestimmung mit einer tachymetrischen Netzmessung ist auch eine Punktbestimmung mit GNSS möglich. Dafür werden GNSS-Antennen über den zu bestimmenden Punkten auf-

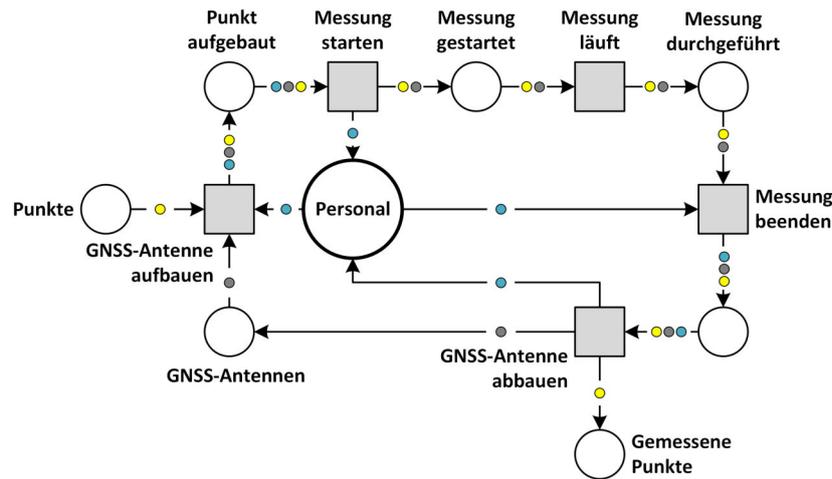


Abbildung 2.20: Statische GNSS-Messung

gebaut. Für eine allgemeingültige Modellierung, bei der auch die gleichzeitige Bestimmung mehrerer Punkte möglich ist, wird eine Stelle definiert, auf der die Marken für die verfügbaren Antennen gespeichert werden. Außerdem wird eine graue Marke für GNSS-Antennen eingeführt. Abbildung 2.20 zeigt das Petri-Netz der statischen GNSS-Messung.

Wenn mindestens eine Personen-Marke, eine Antennen-Marke und eine Punkt-Marke verfügbar sind, schaltet die Transition *GNSS-Antenne aufbauen*. Die Antenne wird zentriert, horizontalisiert und ihre Höhe wird gemessen. Nachdem die Zeit für den Antennenaufbau verstrichen ist, werden eine Punkt-Marke, die Antennen-Marke und die Personen-Marke auf der Stelle *Punkt aufgebaut* abgelegt. Anschließend kann die Transition *Messung starten* schalten. Nachdem dieser Vorgang durchgeführt wurde, wird die Personen-Marke zurück auf die *Personal*-Stelle gelegt und die Antennen- und die Punkt-Marke werden auf der Stelle *Messung gestartet* abgelegt. Die Person kann ggf. weitere Antennen und andere zu bestimmende Punkte aufbauen und deren Messung starten. Falls mehrere Personen, Antennen und Punkte verfügbar sind, kann der Aufbau der GNSS-Antennen zeitgleich erfolgen.

Parallel dazu schaltet die Transition *Messung läuft*. Ihre Schaltdauer richtet sich danach, wie lange der Punkt beobachtet werden soll. Wenn die vorgegebene Messdauer erreicht wurde, werden die Marken wieder freigegeben und auf der Stelle *Messung durchgeführt* abgelegt. Zum Beenden der Messung und Abbau der GNSS-Antenne wird wieder jeweils eine Person benötigt. Ist eine Personen-Marke verfügbar, kann die Transition *Messung beenden* starten. Anschließend kann dieselbe Person die *GNSS-Antenne abbauen*. Nachdem der Abbau beendet wurde, wird die Personen-Marke auf die *Personal*-Stelle und die Antennen-Marke auf die Stelle *GNSS-Antennen* zurück gelegt. Die Punkt-Marke wird auf die Stelle *gemessene Punkte* gelegt. Wenn weitere Punkte zu bestimmen sind, startet der Petri-Netz-Durchlauf wieder mit der Transition *GNSS-Antenne aufbauen*.

Wenn am Ende keine weiteren Punkte vorhanden sind, werden nach Ablauf der Messzeit alle Messungen beendet, die Antennen werden abgebaut und der Prozess der statischen GNSS-Messung ist beendet.

Dadurch, dass sich alle hier beschriebenen Petri-Netze die Marken des verfügbaren Personals teilen, ist es ohne weiteres möglich, dass der Geodät während der vollautomatischen Messung eine andere Prozesskette durchläuft und erst nach Beendigung dieser Tätigkeit die Antennen abbaut. Ein weiterer Vorteil dieser Modellierung ist, dass nach der Messung auch ein anderer gerade verfügbarer Geodät die Antennen abbauen könnte. Insbesondere bei Messungen auf größeren Baustellen könnte dies von Vorteil sein.

## Tachymetrische Netzmessung

Die Ziele einer tachymetrischen Netzmessung sind unter anderem die genaue Bestimmung neuer Festpunkte in einem vorhandenen Festpunktfeld sowie die Überprüfung von vorhandenen Festpunkten auf Punktbewegungen. Während einer Netzmessung werden nach und nach die Netzpunkte mit einem Tachymeter besetzt und Richtungs- und Streckenmessungen zu allen vorgesehenen Netzpunkten in mehreren Vollsätzen durchgeführt. Dafür sind über den anzumessenden Netzpunkten Prismen aufzubauen, die zum aktuellen Tachymeterstandpunkt ausgerichtet werden. Nach der Beendigung eines Standpunktes werden nach und nach die nächsten Netzpunkte mit dem Tachymeter besetzt. Die Prismen auf den Zielpunkten müssen dafür immer wieder zum aktuellen Standpunkt gedreht werden, noch nicht aufgebaute Zielpunkte müssen aufgebaut werden und nicht mehr benötigte Punkte können abgebaut werden.

Es handelt sich um einen sehr komplexen Messprozess, indem viele Tätigkeiten aufeinander abgestimmt werden müssen, um wirtschaftlich zu messen. Aufgrund der Komplexität eignet sich dieser Messprozess besonders für eine Effizienzoptimierung. In Kapitel 4 wird detailliert auf das Prozessmodell und die Optimierung der tachymetrischen Netzmessung eingegangen.

### 2.4.2 Laufzeitmodell

Für die Berechnung der Gesamtdauer einer Messung  $\tau_{Prozess}$  muss bekannt sein, wie viel Zeit die Personen für die einzelnen Tätigkeiten benötigen. Die Dauer jeder Tätigkeit kann entweder durch einen deterministischen Wert  $\tau$  oder einen Zufallswert  $X$ , der einer bestimmten Wahrscheinlichkeitsverteilung folgt, angegeben werden.

#### 2.4.2.1 Deterministische Werte

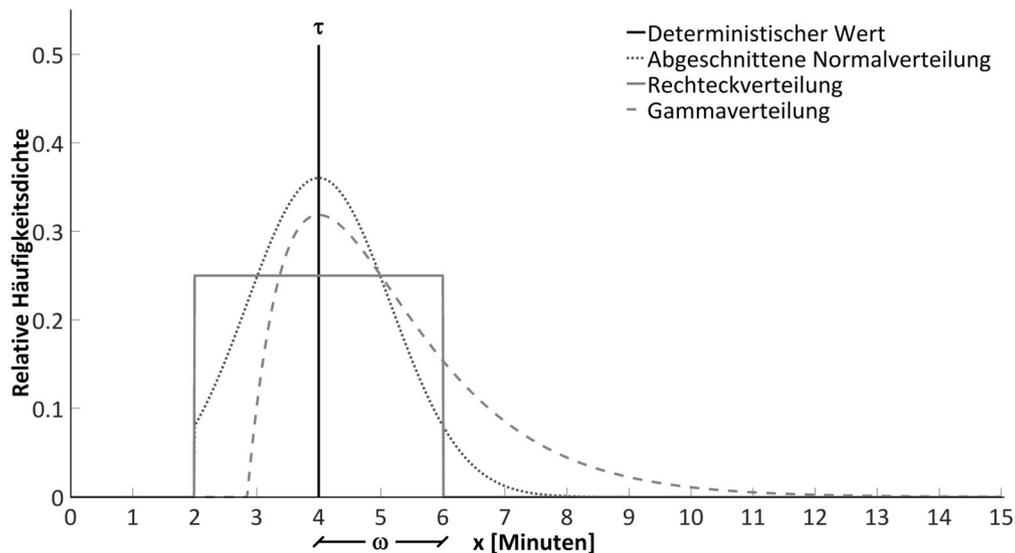
Liegen keine näheren Informationen zur Dauer eines Arbeitsschrittes vor, wird in der Regel ein deterministischer Wert  $\tau$  für die Dauer in der Simulation verwendet. Wenn die Simulation mit deterministischen Werten durchgeführt wird, ist eine einmalige Simulation für jede Variante ausreichend.

Für Optimierungsaufgaben ist es praktikabler mit deterministischen Werten für die Dauer zu arbeiten. Dadurch lassen sich die Lösungen verschiedener Messanordnungen besser miteinander vergleichen. Würden Zufallswerte verwendet werden, müsste die Simulation viele Male durchgeführt werden, um die mittleren Dauern der verschiedenen Messanordnungen miteinander vergleichen zu können. Das beinhaltet jedoch eine weitere Erhöhung des Rechenaufwands für die ohnehin schon komplexen Optimierungsaufgaben. Bei der Durchführung einer einfachen Simulation unter Verwendung von Zufallswerten, könnte es sein, dass zufällig immer eine geringe Dauer für die Tätigkeiten generiert wird und die Gesamtdauer des Prozesses verhältnismäßig gering ist. Eine andere Variante, die eigentlich eine bessere Messanordnung besitzt, aber mit zufällig generierten längeren Dauern belegt wurde, würde dann nicht als bessere Lösung erkannt werden.

Bei einer Verwendung von Zufallswerten wird deshalb empfohlen, dass mindestens 100 Iterationen pro Messvariante simuliert werden. Nur dann wird eine statistisch belastbare mittlere Messdauer für den Vergleich verschiedener Messvarianten kalkuliert. Das bedeutet aber auch, dass die Rechenzeit pro Messvariante mindestens um den Faktor 100 ansteigt.

#### 2.4.2.2 Zufallswerte

Ist eine Verteilungsfunktion für die Dauer der Arbeitsschritte bekannt, können Zufallswerte für die Dauer simuliert werden. Eine Verteilungsfunktion kann durch wiederholtes Ausführen der einzelnen Tätigkeiten und Stoppen der Zeiten abgeleitet werden. Da die Durchführung solcher Wiederholungsmessungen sehr aufwendig ist und eine große Stichprobe ( $> 100$ ) für die aussagekräftige Anpassung



**Abbildung 2.21:** Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen einer Tätigkeit mit den Variablen  $\tau = 4.0$  Minuten und  $\omega = 2.0$  Minuten

einer Verteilungsfunktion benötigt wird, wurden Ansätze entwickelt, um die Zeiten automatisiert während einer Messung mithilfe von GPS-Loggern zu erfassen (s. von Gösseln, 2012).

Im Anschluss an die Datenerhebung sollte ein Ausreißertest erfolgen. Danach werden die Daten auf Homogenität untersucht und ein Test auf Normalverteilung wird durchgeführt. Sollten die Daten nicht normalverteilt sein, ist die Anpassung einer geeigneten Verteilungsfunktion notwendig. Dieses Auswerteschema wurde bereits im Rahmen eines studentischen Bachelorprojekts für einige Tätigkeiten getestet. Weitere Untersuchungen zur Ableitung der Verteilungsfunktionen wurden in dieser Arbeit nicht durchgeführt und sollen in zukünftigen Arbeiten erfolgen. Das Modell zur Simulation von Messprozessen ist bereits so angelegt, dass Verteilungsfunktionen für die Dauer einzelner Tätigkeiten berücksichtigt werden können.

Wird die Simulation unter der Verwendung von Zufallswerten für die Dauer der Arbeitsschritte durchgeführt, muss sie sehr häufig absolviert werden, um realitätsnahe Ergebnisse für die Gesamtdauer des Messprozesses zu erhalten.

Es wird angenommen, dass verschiedene Tätigkeiten durch verschiedene Verteilungsfunktionen abgebildet werden müssen. Für das in Tabelle 2.5 auf S. 45 dargestellte Laufzeitmodell werden beispielhafte Verteilungsfunktionen angegeben, um die Simulation mit Zufallswerten zu zeigen. Die Dauer für das Aufstellen und Horizontieren eines Tachymeters wird zum Beispiel durch eine Normalverteilung beschrieben. Dabei wird angenommen, dass es gleich wahrscheinlich ist, dass die Dauer kürzer oder länger ist, als der deterministische Wert. Andere Tätigkeiten haben eine bestimmte Dauer, die mindestens für die Durchführung erforderlich ist und kaum unterschritten werden kann. Bei ihnen ist es wahrscheinlicher, dass die Tätigkeit länger dauert, als dass sie schneller durchgeführt wird. Solche Tätigkeiten werden häufig automatisch oder halb-automatisch durchgeführt. Eine gute Approximation dieses Verhaltens kann durch die Gammaverteilung oder eine andere asymmetrische Verteilungsfunktion erreicht werden.

In Abbildung 2.21 werden Beispiele für Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen einer Tätigkeit gezeigt. Der deterministische Wert für diese Beispiel-Tätigkeit ist  $\tau = 4.0$  Minuten mit der möglichen Abweichung  $\omega = 2.0$  Minuten. Die Dauern entsprechen der Tätigkeit *Messinstrument vorbereiten*, die in der Transition *Aufbau Standpunkt* durchgeführt wird (vgl. Tabelle 2.5 auf S. 45).  $\tau - \omega$  beschreibt die maximale untere Grenze, die für die Dauer angesetzt wird. Der Wert ist von Bedeutung, wenn Dauern sehr kurz sind und nahe bei 0 liegen, aber dennoch eine Standardabweichung besitzen.

Dadurch wird verhindert, dass Zufallswerte unter 0 generiert werden. Alle gezeigten Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen können über die beiden Variablen  $\tau$  und  $\omega$  ausgedrückt werden. Das hat den Vorteil, dass später im Simulationsprogramm einfach zwischen deterministischer und stochastischer Simulation gewechselt werden kann. Die Variable  $\tau$  hat gegenüber dem Mittelwert  $\mu$  den Vorteil, dass sie beim Maximum der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion liegt und daher sowohl für die deterministische als auch stochastische Simulation verwendet werden kann.

### Rechteckverteilung

Die Symbolschreibweise der Rechteckverteilung  $U$  mit der unteren Grenze  $a = \tau - \omega$  und der oberen Grenze  $b = \tau + \omega$  lautet:

$$X \sim U(a, b) \Rightarrow X \sim U(\tau - \omega, \tau + \omega) \quad (2.3)$$

Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Rechteckverteilung lautet:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{2\omega} & , \text{für } -\omega \leq x - \tau \leq \omega \\ 0 & , \text{sonst} \end{cases} \quad (2.4)$$

### Abgeschnittene Normalverteilung

Die Symbolschreibweise der Normalverteilung  $N$  mit dem Mittelwert  $\mu = \tau$  und der Varianz  $\sigma^2 = \frac{\omega^2}{3}$  lautet:

$$X \sim N(\mu, \sigma^2) \Rightarrow X \sim N\left(\tau, \frac{\omega^2}{3}\right) \quad (2.5)$$

Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Normalverteilung wird am unteren Ende abgeschnitten, um zu verhindern, dass Zufallswerte unterhalb einer Grenze von  $a = \tau - \omega$  erzeugt werden (s. Robert, 1995):

$$f(x) = \begin{cases} \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \cdot \exp\left(-\frac{(x-\tau)^2}{2\sigma^2}\right)}{\frac{1}{2} \cdot \left(1 - \operatorname{erf}\left(\frac{a-\tau}{\sqrt{2\sigma^2}}\right)\right)} & , \text{für } x \geq a \\ 0 & , \text{für } x < a \end{cases} \quad (2.6)$$

### Gammaverteilung

Die Symbolschreibweise der Gammaverteilung  $\Gamma$  mit dem Formparameter  $k = 2$  und dem Skalierungsfaktor  $\theta = \frac{\omega}{\sqrt{3}}$  lautet:

$$X \sim \Gamma(k, \theta) \Rightarrow X \sim \Gamma\left(2, \frac{\omega}{\sqrt{3}}\right) \quad (2.7)$$

Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Gammaverteilung wird soweit nach rechts verschoben, dass der  $x$ -Wert des Maximums der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion dem deterministischen Wert  $\tau$  entspricht. Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion lautet dann:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{(x-\tau+\theta)}{\theta^2} \cdot \exp\left(-\frac{x-\tau+\theta}{\theta}\right) & , \text{für } x \geq \tau - \theta \\ 0 & , \text{für } x < \tau - \theta \end{cases} \quad (2.8)$$

### 2.4.2.3 Tätigkeitsdauern für Messprozesse

In Tabelle 2.5 auf S. 45 und Tabelle 4.1 auf S. 71 (tachymetrische Netzmessung) sind die Transitionen der modellierten Petri-Netze mit den Tätigkeiten, die innerhalb einer Transition zu erledigen sind, aufgelistet.

Zu jeder Tätigkeit wird eine Verteilungsfunktion sowie die Tätigkeitsdauer  $\tau$  und der Wert  $\omega$  angegeben. Die dort angegebenen Werte basieren auf eigenen Erfahrungswerten, Ermittlungen innerhalb eines studentischen Bachelorprojekts und wurden z.T. aus realen Messungen mit GPS-Loggern abgeleitet. Für Tätigkeiten mit Dauern unter 20 Sekunden und für das Zurücklegen der Wege, für die keine Erfahrungswerte vorliegen, wurden keine Verteilungsfunktionen angenommen. Für die meisten anderen Tätigkeiten wurden abgeschnittene Normalverteilungen verwendet. Eine Ausnahme bildet die Ablesung des Vorblicks/Rückblicks beim geometrischen Nivellement. Hier erfolgt die Ablesung automatisiert. Bei schlechten Sichtverhältnissen kommt es jedoch hin und wieder vor, dass die Ablesung wiederholt werden muss. Dies soll durch den steileren Anstieg und den flacheren Abfall der Gammaverteilung (vgl. Abbildung 2.21) approximiert werden.

Sobald andere (bessere) Zeitwerte für die Tätigkeiten vorliegen, können sie jederzeit in das Laufzeitmodell übernommen werden. Für die weiteren Berechnungen in dieser Arbeit werden die angegebenen Schaltdauern mit ihren Verteilungsfunktionen verwendet.

Die Dauer der einzelnen Tätigkeiten (Aufbau, Umbau, Abbau, Messung und Wege) hängt von weiteren Parametern ab, wie z. B. der Vermarktungsart der Punkte oder der Art der Messung. Im Folgenden wird aufgeführt, welche Teilschritte wann durchzuführen sind.

#### Aufbau

Beim **Aufbau eines Anschlusspunktes** (AP) ist die Zeit davon abhängig, wie der Punkt vermarktet ist und auf welche Art er aufgebaut werden soll. Es wird zwischen den Vermarktungsarten *ZW* Zwangszentrierung (z. B. Pfeiler, Konsole), *ST* Stativ, *STU* Stativ unterirdisch, *LS* Lotstab und *LU* Lotstab unterirdisch unterschieden.

- (a) Bei Punkten mit Zwangszentrierung berechnet sich die Dauer  $\tau_{\text{AufbauAP } ZW}$  für den vollständigen Aufbau aus folgenden Einzeltätigkeiten: Unter der Tätigkeit Equipment aufbauen  $\tau_{\text{Equip auf}}$  wird das Ausladen des Equipments aus dem Fahrzeug und das Positionieren am Punkt verstanden, hier konkret das Aufschrauben des Dreifußes auf der Konsole oder dem Pfeiler. Außerdem gehören zum Aufbau das Horizontieren des Dreifußes  $\tau_{\text{Horiz}}$ , das Messen der Reflektorhöhe über dem Punkt bzw. der Punktplatte  $\tau_{\text{Höhe messen}}$  und das Ausrichten des Reflektors zum Standpunkt  $\tau_{\text{Refl ausrichten}}$ :

$$\tau_{\text{AufbauAP } ZW} = \tau_{\text{Equip auf}} + \tau_{\text{Horiz}} + \tau_{\text{Höhe messen}} + \tau_{\text{Refl ausrichten}} \quad (2.9)$$

- (b) Für ebenerdige Punkte, über denen ein Stativ aufgebaut wird, wird zur Berechnung der Dauer für das Schalten der Transition die Zeit für die Tätigkeit zum Zentrieren des Dreifußes über der Punktmarke  $\tau_{\text{Zentr}}$  addiert:

$$\tau_{\text{AufbauAP } ST} = \tau_{\text{AufbauAP } ZW} + \tau_{\text{Zentr}} \quad (2.10)$$

- (c) Bei unterirdisch vermarkten Punkten wird dazu noch die Dauer für das Freilegen des Punktes  $\tau_{\text{Punkt freilegen}}$  addiert:

$$\tau_{\text{AufbauAP } STU} = \tau_{\text{AufbauAP } ST} + \tau_{\text{Punkt freilegen}} \quad (2.11)$$

- (d) Für ebenerdige Punkte, die mit einem Lotstab aufgebaut werden, entfällt die Dauer für Zentrierung eines Dreifußes, da der Lotstab direkt auf der Mitte des Punktes aufgehoben wird:

$$\tau_{\text{AufbauAP LS}} = \tau_{\text{AufbauAP ZW}} \quad (2.12)$$

- (e) Bei unterirdisch vermarkten Punkten, die mit einem Lotstab aufgebaut werden sollen, wird die Dauer für das Freilegen des Punktes dazu addiert:

$$\tau_{\text{AufbauAP LSU}} = \tau_{\text{AufbauAP LS}} + \tau_{\text{Punkt freilegen}} \quad (2.13)$$

Der **Aufbau eines Standpunktes** (SP) ist vergleichbar mit dem Aufbau der Anschlusspunkte. Auch hier wird zwischen den Vermarktungsarten *ZW* Zwangszentrierung (z. B. Pfeiler, Konsole), *ST* Stativ und *STU* Stativ unterirdisch unterschieden. Hinzu kommt noch die Option *FS* freier Standpunkt, bei dem das Stativ nicht über einem Punkt aufgebaut wird. Statt der Reflektorausrichtung wird beim Standpunkt das Messinstrument vorbereitet  $\tau_{\text{Instr vorbereiten}}$ . Die Vorbereitung beinhaltet das Anschalten des Instrumentes und die Eingabe der wichtigen Daten des aktuellen Standpunktes (u. a. Standpunktnummer, Temperatur, Luftdruck).

- (f) Bei Punkten mit Zwangszentrierung berechnet sich die Dauer für den vollständigen Aufbau des Standpunktes aus folgenden Tätigkeiten des Laufzeitmodells:

$$\tau_{\text{AufbauSP ZW}} = \tau_{\text{Equip auf}} + \tau_{\text{Horiz}} + \tau_{\text{Höhe messen}} + \tau_{\text{Instr vorbereiten}} \quad (2.14)$$

- (g) Für ebenerdige Punkte, über denen ein Stativ aufgebaut wird, setzt sich die Gesamtdauer aus folgenden Zeiten zusammen:

$$\tau_{\text{AufbauSP ST}} = \tau_{\text{AufbauSP ZW}} + \tau_{\text{Zentr}} \quad (2.15)$$

- (h) Bei unterirdisch vermarkten Punkten wird dazu noch die Dauer für das Freilegen des Punktes addiert:

$$\tau_{\text{AufbauSP STU}} = \tau_{\text{AufbauSP ST}} + \tau_{\text{Punkt freilegen}} \quad (2.16)$$

- (i) Beim freien Standpunkt entfällt das Freilegen des Punktes, das Zentrieren über dem Punkt und das Messen der Instrumentenhöhe:

$$\tau_{\text{AufbauSP FS}} = \tau_{\text{Equip auf}} + \tau_{\text{Horiz}} + \tau_{\text{Instr vorbereiten}} \quad (2.17)$$

## Umbau

Der Umbau eines Punktes setzt sich i.d.R. aus Teilschritten der Kategorien *Abbau*  $\tau_{\text{Equip ab}}$  und *Aufbau*  $\tau_{\text{Equip auf}}$  zusammen. Es wird zwischen drei Varianten unterschieden.

- (a) Beim Umbau von Reflektor auf Messinstrument wird ggf. noch leicht nachhorizontiert und die Höhe der Kippachse des Messinstrumentes über dem Punkt gemessen. Außerdem wird das Instrument auf dem neuen Standpunkt vorbereitet:

$$\tau_{\text{Umbau AP} \rightarrow \text{SP}} = \tau_{\text{Equip ab (Ref)}} + \tau_{\text{Equip auf (Instr)}} + \tau_{\text{Horiz}} + \tau_{\text{Höhe messen}} + \tau_{\text{Instr vorbereiten}} \quad (2.18)$$

- (b) Beim Umbau von Messinstrument auf Reflektor wird nicht nachhorizontiert. Neben dem Ab- und Aufbau wird die Höhe der Reflektormitte über dem Punkt gemessen und der Reflektor

wird zum nächsten Standpunkt ausgerichtet:

$$\tau_{\text{Umbau SP} \rightarrow \text{AP}} = \tau_{\text{Equip ab (Instr)}} + \tau_{\text{Equip auf (Refl)}} + \tau_{\text{Höhe messen}} + \tau_{\text{Refl ausrichten}} \quad (2.19)$$

(c) Bei der Änderung der Ausrichtung wird der Reflektor in eine andere Richtung gedreht:

$$\tau_{\text{Umbau AP}} = \tau_{\text{Refl ausrichten}} \quad (2.20)$$

### Abbau

(a) Beim Abbau eines ebenerdig vermarkten Punktes, der mit einem Stativ oder Lotstab aufgebaut wurde oder bei einer Konsole bzw. einem Pfeiler muss lediglich die Zeit für das Entfernen des Messequipments  $\tau_{\text{Equip ab}}$  berücksichtigt werden:

$$\tau_{\text{Abbau ZW/ST/LS/FS}} = \tau_{\text{Equip ab}} \quad (2.21)$$

(b) Beim Abbau eines unterirdisch vermarkten Punktes muss die Dauer für das Verdecken des Punktes  $\tau_{\text{Punkt verdecken}}$  zusätzlich addiert werden:

$$\tau_{\text{Abbau STU/LSU}} = \tau_{\text{Abbau ZW/ST/LS/FS}} + \tau_{\text{Punkt verdecken}} \quad (2.22)$$

### Messung

(a) Die Dauer für die Messung eines Zielpunktes  $p$  setzt sich aus den Zeiten für die Eingabe der Punktdaten ins Messinstrument  $\tau_{\text{Eingabe Pktdaten}}$  (Punktnummer, Tafelhöhe), der Grobanzielung des Punktes von Hand  $\tau_{\text{Pkt von Hand}}$  und der Richtungs- und Streckenmessung  $\tau_{\text{Ri/Str}}$  zusammen (die Feinausrichtung auf die Reflektormitte erfolgt automatisch per Automatic Target Recognition (ATR)):

$$\tau_{\text{Messung } p} = \tau_{\text{Eingabe Pktdaten}} + \tau_{\text{Pkt von Hand}} + \tau_{\text{Ri/Str}} \quad (2.23)$$

(b) Bei einer einfachen tachymetrischen Messung zu mehreren Punkten ist die Dauer der Messung von der Anzahl der Zielpunkte  $n_p$  abhängig:

$$\tau_{\text{Messung}} = n_p \cdot \tau_{\text{Messung } p} \quad (2.24)$$

(c) Bei einer Satzmessung ist die Dauer der Messung abhängig von der Anzahl  $n_p$  der Zielpunkte und der Anzahl  $n_{vs}$  der Vollsätze. Im ersten Halbsatz wird jeder Punkt der  $n_p$  Punkte wie bei der einfachen tachymetrischen Messung angemessen. In den nachfolgenden Halbsätzen wird die Drehung des Instrumentes automatisch  $\tau_{\text{Pkt autom}}$  durchgeführt und die Messung erfolgt mit ATR:

$$\tau_{\text{Satzmessung}} = n_p \cdot \left( \tau_{\text{Messung } p} + (2n_{vs} - 1) \cdot \left( \tau_{\text{Pkt autom}} + \tau_{\text{Ri/Str}} \right) \right) \quad (2.25)$$

### Wege

Die längste Dauer während eines Messprozesses nimmt häufig das Zurücklegen der Wege zwischen den Punkten in Anspruch. Um diese Zeiten zu ermitteln, wird ein Wegenetz für jedes Messgebiet angelegt. Alle Messpunkte werden über das Wegenetz miteinander verbunden. Das Wegenetz besteht aus Wegepunkten und Wegekanten. Als Kantengewichte werden beim Anlegen des Netzes die mittleren Geschwindigkeiten angegeben, die beim Zurücklegen der jeweiligen Strecken erreicht werden. Aus den Koordinaten der dazugehörigen Wegepunkte wird die Dauer für das Zurücklegen der Wegekante berechnet. Die mittlere Geschwindigkeit richtet sich nach dem Ausbau der Straße. Für

kleine Straßen und Wege wurden geringere Geschwindigkeiten angenommen als für große Straßen. Die Daten können Annahmen sein, aus Erfahrungswerten abgeleitet werden oder idealerweise aus der Datenerfassung mit GPS-Loggern stammen.

Zusätzlich ist es wichtig die Fortbewegungsart des Beobachters und der Gehilfen zu kennen. Falls der Beobachter und der Gehilfe mit verschiedenen Fortbewegungsmitteln unterwegs sind, wird für jede Person eine eigene Distanzmatrix (s. Tabelle A.7) berechnet, wobei die Höchstgeschwindigkeit des Fortbewegungsmittels berücksichtigt wird. Für einen Fußgänger wird die maximale Geschwindigkeit auf 5 km/h gesetzt. Für einen Radfahrer beträgt sie 15 km/h und für einen Autofahrer 100 km/h. Diese Werte werden bei der Berechnung der Punkt-zu-Punkt-Dauer berücksichtigt, da es sein kann, dass die mittlere Geschwindigkeit einer Kante einen höheren Wert besitzt.

### Beispiel: Wegenetz Wilhelm Busch Museum

In Abbildung 2.22 ist das Wegenetz des Beispiels *Wilhelm Busch Museum* abgebildet. Tabelle A.4 zeigt die Attribute der einzelnen Kanten des Wegegraphen. Jede Kante besitzt eine Kanten-ID, die Information, von welchem Punkt zu welchem Punkt die Kante verläuft, sowie Attribute zur Dauer, Distanz und zur mittlere Geschwindigkeit, die auf dieser Kante erreicht werden kann. Für dieses Beispiel wurde die mittlere Geschwindigkeit aller Kanten auf 5 km/h festgelegt, da alle Wege zu Fuß zurückgelegt werden.

In Tabelle A.9 sind die Routen dargestellt, die für die kürzeste Entfernung zwischen den Messpunkten berechnet wurden. Die kürzeste Entfernung wird mit dem Dijkstra-Algorithmus (s. Dijkstra, 1959) berechnet, wobei als Kantengewicht die Dauer verwendet wird. In Tabelle A.7 werden die Dauern für das Zurücklegen der Wege von Messpunkt zu Messpunkt gezeigt. In Tabelle A.8 werden die entsprechenden Distanzen dazu aufgeführt.

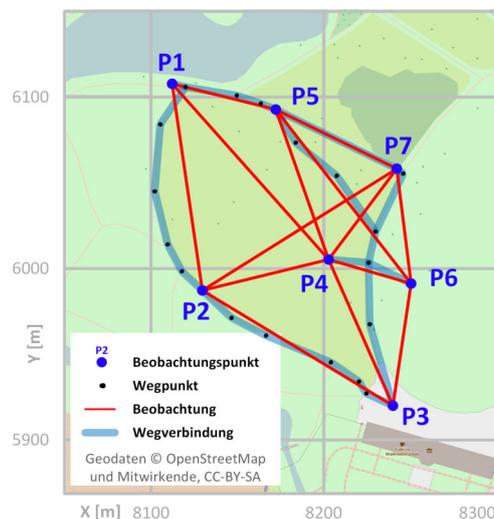


Abbildung 2.22: *Wilhelm Busch Museum: Beispiel für ein Wegenetz*

### 2.4.3 Kostenmodell

Zur Berechnung der Kosten eines Messprozesses wurde ein Kostenmodell aufgestellt. Es besteht in erster Linie aus den Personalkosten und Kosten für die gefahrenen Kilometer während der Messung. Dies sind die Kosten, die von Messplan zu Messplan variieren können, je nachdem, wie lange die Messung dauert und wie weit die Wege im Netz sind, die per Auto zurückgelegt werden. Die individuellen Kosten, die sich je nach Auftrag unterscheiden, können bei Bedarf zusätzlich berücksichtigt werden.

### Gesamtkosten

Die Gesamtkosten  $C_{gesamt}$  setzen sich aus der Summe der Personalkosten  $C_{Personal}$ , den Transportkosten für alle Fahrzeuge  $C_{Transport}$  und ggf. den individuellen Kosten  $C_{Individuell}$  zusammen.

$$C_{gesamt} = C_{Personal} + C_{Transport} (+C_{Individuell}) \quad (2.26)$$

### Personalkosten

Die Kosten für die Messprozesse werden über die Personalkosten beschrieben. Die Messprozesse werden dafür in Teilprozesse untergliedert und mithilfe von Petri-Netzen modelliert. Für jeden Teilprozess wird, wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, unter Verwendung des Laufzeitmodells die Dauer berücksichtigt. Schließlich wird die Gesamtzeit des Messprozesses  $\tau_{Prozess}$  über die Personalkosten  $C_{Stundenlohn_i}$  (Euro/Stunde) in Geldeinheiten umgerechnet und der Gesamtkostenrechnung zugeführt.  $pers$  ist die Anzahl der an der Messung beteiligten Personen. Außerdem werden die Anfahrtszeiten  $\tau_{Anfahrt}$  zum Messgebiet berücksichtigt, die ebenfalls mit den Personalkosten zu multiplizieren sind.

$$C_{Personal} = \sum_i^{pers} C_{Stundenlohn_i} \cdot (\tau_{Prozess} + \tau_{Anfahrt}) \quad (2.27)$$

Für Vermessungsingenieure wird in den nachfolgenden Beispielen ein Stundenlohn von 60 Euro/Stunde angesetzt. Für einen Messgehilfen werden 30 Euro/Stunde veranschlagt.

### Transportkosten

Die Transportkosten beinhalten den Treibstoffverbrauch des jeweiligen Fahrzeugs für die zurückgelegte Entfernung  $w_{Fahrzeug_i}$ , wobei  $f$  die Anzahl der Fahrzeuge ist. Des Weiteren wird in den Transportkosten der Wertverlust der Fahrzeuge berücksichtigt, die sich, wie die Treibstoffkosten, auf die Einheit Euro/Kilometer zurückführen lassen.

$$C_{Transport} = \sum_{i=1}^f C_{km-Kosten_i} \cdot w_{Fahrzeug_i} \quad (2.28)$$

In den später folgenden Beispielen wird ein Wert von  $C_{km-Kosten} = 0.30$  Euro/km für Treibstoff und Wertverlust angesetzt.

Die Personalkosten des Fahrers und ggf. Beifahrers während der Fahrzeit werden unter Personalkosten geführt.

### Individuelle Kosten

Zusätzlich zu den Personal- und Transportkosten können noch weitere Kosten bei der Durchführung eines Messauftrags entstehen. Diese Kosten variieren allerdings nicht in Abhängigkeit von der Mess- und Aufbaureihenfolge. Sie werden deshalb nur bei Bedarf mit in die Kostenkalkulation einbezogen und werden hier als individuelle Kosten  $C_{Individuell}$  bezeichnet. Hierzu zählen: Anfahrtskosten zum Messgebiet (Personal und Transport), Übernachtungskosten, Materialkosten, Fixkosten des Büros (Miete, fixe Personalkosten, ...), Leihgebühren für Instrumente sowie Abschreibungskosten für Instrumente, Soft- und Hardware.

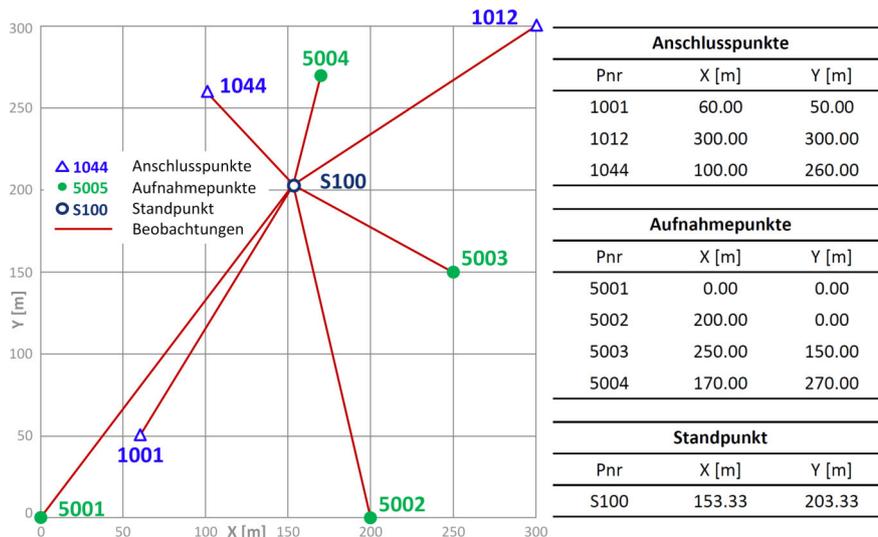


Abbildung 2.23: Tachymetrische Aufnahme: Übersicht der Anschluss- und Aufnahmeempunkte

Tabelle 2.3: Tachymetrische Aufnahme: Distanzmatrix - Dauer [Minuten]

	S100	1001	1012	1044	5001	5002	5003	5004
S100	0	2.15	2.11	0.93	3.06	2.50	1.33	0.83
1001	2.15	0	4.16	2.57	0.94	1.78	2.58	2.95
1012	2.11	4.16	0	2.45	5.09	3.80	1.90	1.60
1044	0.93	2.57	2.45	0	3.34	3.34	2.23	0.85
5001	3.06	0.94	5.09	3.34	0	2.40	3.50	3.83
5002	2.50	1.78	3.80	3.34	2.40	0	1.90	3.26
5003	1.33	2.58	1.90	2.23	3.50	1.90	0	1.73
5004	0.83	2.95	1.60	0.85	3.83	3.26	1.73	0

Tabelle 2.4: Aufbau-, Mess- und Abbaureihenfolge und -aufteilung

Aufbau		Reihenfolge		Abbau	
Beobachter	Gehilfe	Tachym. Aufnahme		Beobachter	Gehilfe
1044-S100	1012-1001	5001-5002-5003-5004		S100-1001	1044-1012

#### 2.4.4 Beispielhafte Simulation eines Messprozesses

In diesem Abschnitt wird die Simulation der tachymetrischen Aufnahme als beispielhafter Messprozess detailliert beschrieben. Diese einfache Messaufgabe kann leichter nachvollzogen werden als die später intensiv behandelte tachymetrische Netzmessung. Neben der Simulation mit deterministischen Werten für die Tätigkeitsdauern werden auch Simulationen mit Zufallswerten durchgeführt.

##### Beispiel: Tachymetrische Aufnahme

In Abbildung 2.23 ist ein Beispiel für eine tachymetrische Aufnahme von vier Punkten dargestellt. Die Aufnahme wird mit einem Beobachter und einem Gehilfen durchgeführt. Zu Beginn der Messung sind die drei oberirdisch liegenden Anschlusspunkte (mit Lotstäben) und der freie Standpunkt aufzubauen. Anschließend wird eine freie Stationierung durchgeführt, indem alle Anschlusspunkte angemessen und die Standpunktkoordinaten berechnet werden. Dann werden die vier Punkte 5001 bis 5004 angemessen. Sie werden von dem Messgehilfen mit einem Lotstab aufgehalten und der Beobachter misst den Punkt mit dem Tachymeter an. Nachdem alle Punkte angemessen wurden, werden die Anschlusspunkte und der Standpunkt abgebaut.

Die Petri-Netz-Modellierung der tachymetrischen Aufnahme wird in Abbildung 2.16 gezeigt. Als Wegenetz wird vereinfacht eine direkte Wegverbindung zwischen allen Punkten angenommen. Als

durchschnittliche Geschwindigkeit wird für jede Wegkante 5 km/h festgelegt, woraus sich die Distanzmatrix in Tabelle 2.3 ergibt. Die Punkte befinden sich alle ebenerdig und müssen daher nicht freigelegt und später wieder verdeckt werden.

Für die Simulation wird die Aufbau-, Mess- und Abbaureihenfolge und -aufteilung in Tabelle 2.4 verwendet. Die Dauer für die Durchführung der Tätigkeit richtet sich nach dem Laufzeitmodell in Tabelle 2.5. Die Petri-Netz-Simulation wird in diesem Beispiel zunächst mit deterministischen Werten für die Dauer durchgeführt.

Zu Beginn der Simulation werden die Punktmarken der Anschlusspunkte (1001, 1012, 1044) auf der Stelle *Anschlusspunkte (AP)* und die Standpunktmarke (S100) auf der Stelle *Standpunkt (SP)* abgelegt. Außerdem werden die beiden Personenmarken des Beobachters und des Gehilfen der Stelle *Personal* und die vier Punktmarken der Aufnahmepunkte (5001-5004) der Stelle *Aufnahmepunkte* zugeordnet. Aufgrund der Anfangsmarkierung wird als Erstes das Modul **Aufbau und Stationierung Tachymeter** (s. Petri-Netz in Abbildung 2.13 auf S. 28) aufgerufen. Darin werden die Punkte in der Transition *Zuordnung Punkte* zunächst den Personen zugeordnet. Die entsprechenden Punkte der Person liegen dann auf den Stellen *Punkte Beobachter* (1044, S100) und *Punkte Gehilfe* (1012, 1001). Der Gehilfe und der Beobachter beginnen mit dem Aufbau der Anschlusspunkte. Für den Beobachter wird dies über die höhere Priorisierung der Transition *Aufbau AP* gegenüber der danach auszuführenden Transition *Aufbau SP* geregelt. Nachdem der Aufbau aller Anschlusspunkte erfolgt ist, d.h. drei Punktmarken auf *AP bereit* liegen, und der Standpunkt aufgebaut wurde, erfolgt die *Stationierung* des Tachymeters. Nach Abschluss der *Stationierung* werden Marken auf den Stellen *Tachymeter stationiert* und *aufgebaute AP* abgelegt. Damit ist das Modul Aufbau und Stationierung Tachymeter abgeschlossen und die Marken auf den Stellen *Personal*, *Tachymeter stationiert* und *aufgebaute AP* werden in die höhere Hierarchieebene transferiert.

Dadurch liegt die notwendige Anfangsmarkierung für die Ausführung des Moduls **Tachymetrische Aufnahme** (s. Petri-Netz in Abbildung 2.15) vor. Der Gehilfe hält den ersten aufzunehmenden Punkte 5001 auf, was durch das Schalten der Transition *Punkt aufhalten* simuliert wird. Anschließend erfolgt die *Aufnahme* des Punktes 5001 durch den Beobachter. Damit ist die Aufnahme des Punktes abgeschlossen, und die Punktmarke wird auf der Stelle *aufgenommene Punkte* abgelegt. Das Petri-Netz des Moduls ist so lange lebendig, wie Punktmarken auf der Stelle *Aufnahmepunkte* liegen. Sobald das Netz nicht mehr aktiv und schaltfähig ist, werden die Marken auf den Stellen *Personal*, *aufgenommene Punkte* und *aufgebaute SP* in die höhere Hierarchieebene übertragen.

Die Messung ist damit abgeschlossen und die Anfangsmarkierung für die Ausführung des Moduls **Abbau** (s. Petri-Netz in Abbildung 2.14) liegt vor. In dem Modul wird, wie beim Aufbau der Punkte, zunächst wieder eine Zuordnung der abzubauenen Punkte zu den Personen vorgenommen. Dem Beobachter werden der Standpunkt S100 und der Anschlusspunkt 1001 zugeordnet; dem Gehilfen die Punkte 1044 und 1012. Der Abbau der Punkte erfolgt nach und nach durch die entsprechenden Personen. Wenn das Netz nicht mehr aktiv und schaltfähig ist, ist das Modul Abbau abgeschlossen und die Marken auf den Stellen *Personal*, *SP abgebaut* und *AP abgebaut* werden in die höhere Hierarchieebene übertragen. Da auch in der oberen Hierarchieebene keine Module und Transitionen mehr schaltfähig sind, ist die Simulation der tachymetrischen Aufnahme abgeschlossen.

Als Ergebnis der Simulation wird der zeitliche Ablauf der Messung in Abbildung 2.24 dargestellt. In dem Ablauf-Diagramm ist zu erkennen, wann welche Person welche Tätigkeit durchführt und wann Wartezeiten für die Person entstehen. Außerdem wird die Gesamtdauer des Prozesses mit  $\tau_{\text{Prozess}} = 34.92 \text{ Minuten} = 0.582 \text{ Stunden}$  ausgegeben. Die Personalkosten belaufen sich nach Gleichung 2.27 auf

$$C_{\text{Personal}} = \underbrace{(30 \text{ Euro/Stunde} + 60 \text{ Euro/Stunde})}_{\text{Gehilfe}} \cdot 0.582 \text{ Stunden} = 52.38 \text{ Euro} \quad (2.29)$$

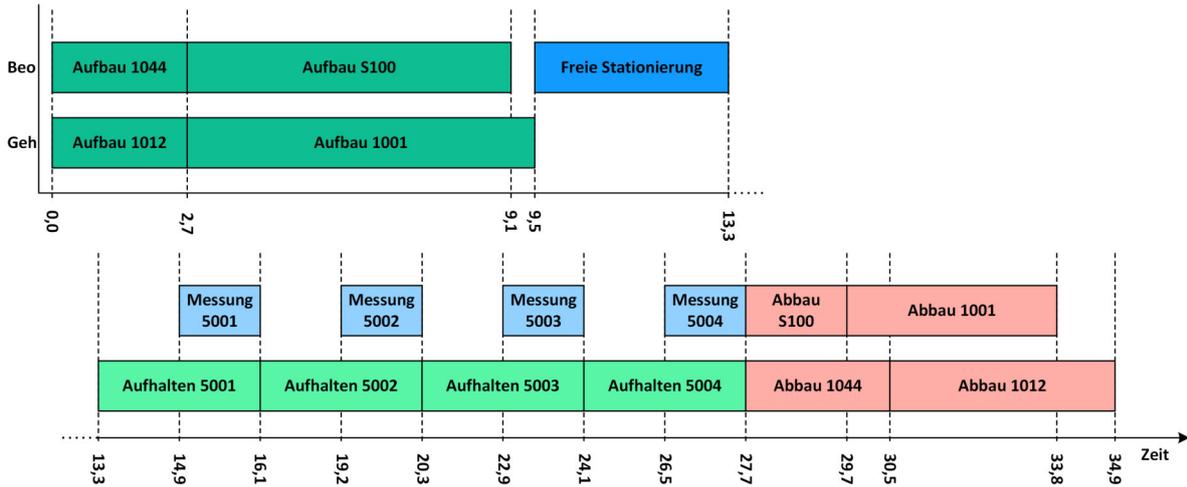


Abbildung 2.24: Ablauf-Diagramm der tachymetrischen Aufnahme: Die obere Reihe zeigt die zeitliche Abfolge der Tätigkeiten des Beobachters und die untere Reihe die des Gehilfen

Die zurückgelegte Entfernung für beide Personen zusammen liegt bei  $d = 1.458$  km. Da beide Personen die Wege zu Fuß zurücklegen, entstehen keine zusätzlichen Transportkosten. Da auch die Kosten und die Dauer für die Anfahrt sowie alle weiteren individuellen Kosten bei diesem Beispiel nicht berücksichtigt werden, entsprechen die Gesamtkosten der Messung den Personalkosten aus Gleichung 2.29.

Im Anschluss an die Simulation des Petri-Netzes mit deterministischen Werten für die Dauer, werden im nächsten Schritt Zufallswerte verwendet. Um zu zeigen, wie stark die Ergebnisse variieren, werden 10000 Simulationen berechnet, deren Ergebnisse in dem Histogramm in Abbildung 2.25 dargestellt werden. Das Histogramm zeigt die Verteilung der simulierten Prozessdauern mit Zufallswerten für die Tätigkeitsdauer. Die gestrichelte Linie stellt die berechnete Prozessdauer mit deterministischen Werten dar. Die als dunkle durchgezogene Linie geplottete Normalverteilung wurde aus den Daten der Prozessdauern mit Zufallswerten abgeleitet. Der Mittelwert aus 10000 Berechnungen beträgt 36.66 Minuten mit einer Standardabweichung von 1.89 Minuten. Es ist zu erkennen, dass die mittlere Messdauer aus 10000 Berechnungen etwa 2 Minuten länger ist, als die Messdauer, die mit deterministischen Werten berechnet wurde. Die meisten Zufallszahlen, die bei einer tachymetrischen Aufnahme erzeugt werden, sind abgeschnitten normalverteilt (vgl. Tabelle 2.5). Für die Wege und einige Tätigkeiten, die sehr kurz sind, werden weiterhin deterministische Werte verwendet. Der entstehende Versatz des Mittelwertes aus der Berechnung der zeitlichen Variation gegenüber der deterministischen Berechnung lässt sich damit erklären.

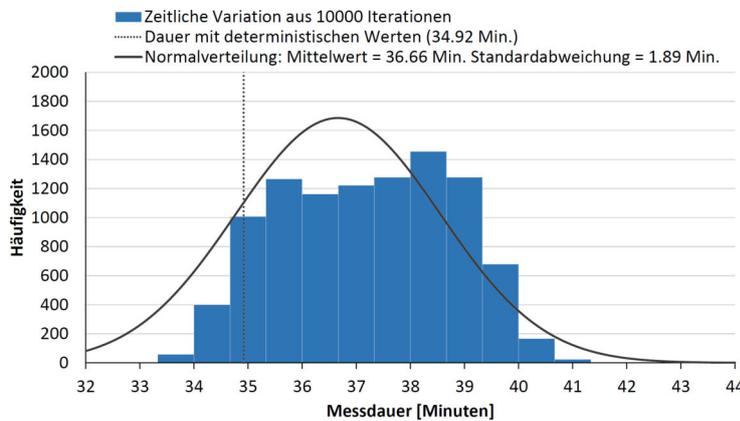


Abbildung 2.25: Tachymetrische Aufnahme: Histogramm der zeitlichen Variation

**Tabelle 2.5:** *Schaltdauern der Transitionen (inkl. Tätigkeiten) für die vorgestellten Petri-Netze. Die Kombinationen der einzelnen Tätigkeiten in den Transitionen wurden in Abschnitt 2.4.2.3 auf S. 37 beschrieben.*

Modul	Transition	Tätigkeit	$\tau$ [Sek.]	Verteilung	$\omega$ [Sek.]	
Aufbau und Stationierung	Aufbau Standpunkt (freie Stationierung)	Weg	var.	deterministisch		
		Equipment aufbauen	60	Abgeschn. NV	20	
		Horizontieren	30	Abgeschn. NV	10	
		Messinstrument vorbereiten	240	Abgeschn. NV	120	
	Aufbau Anschlusspunkt mit Lotstab	Weg	var.	deterministisch		
		Punkt freilegen	180	Abgeschn. NV	60	
		Equipment aufbauen	60	Abgeschn. NV	20	
		Horizontieren	30	Abgeschn. NV	10	
		Höhe messen	60	Abgeschn. NV	30	
	Stationierung	Reflektor ausrichten	10	deterministisch		
		Eingabe Punktdaten	10	deterministisch		
		Punkt einstellen (von Hand)	50	Abgeschn. NV	20	
Richtungs- und Streckenmessung		10	deterministisch			
Abbau	Abbau Punkt	Überprüfung Stationierung	20	Abgeschn. NV	5	
		Weg	var.	deterministisch		
		Equipment abbauen	120	Abgeschn. NV	30	
		Punkt verdecken	30	Abgeschn. NV	10	
Tachymetrische Aufnahme/ Absteckung	Punkt aufhalten	Weg	var.	deterministisch		
		Punkt aufhalten	30	Abgeschn. NV	10	
		Reflektor ausrichten	10	deterministisch		
	Aufnahme	Eingabe Punktdaten	10	deterministisch		
		Punkt einstellen (von Hand)	50	Abgeschn. NV	20	
		Richtungs- und Streckenmessung	10	deterministisch		
	Absteckung	Absteckung	300	Abgeschn. NV	100	
	Punkt vermarken	Punkt vermarken	180	Abgeschn. NV	60	
		Punkt kontrollieren	Punkt aufhalten	30	Abgeschn. NV	10
			Reflektor ausrichten	10	deterministisch	
Eingabe Punktdaten			10	deterministisch		
Punkt einstellen (von Hand)	50		Abgeschn. NV	20		
Richtungs- und Streckenmessung	10	deterministisch				
	Geometrisches Nivellement	Rückblick/Vorblick aufhalten	Weg	var.	deterministisch	
		Punkt aufhalten	30	Abgeschn. NV	10	
	Ablesung Rückblick/Vorblick	Ablesung Rückblick/Vorblick	40	Gammaverteilung	10	
Nivellier aufbauen	Weg	var.	deterministisch			
	Equipment aufbauen	60	Abgeschn. NV	20		
	Horizontieren	30	Abgeschn. NV	10		
	Nivellier vorbereiten	120	Abgeschn. NV	40		
Statische GNSS-Messung	GNSS-Antenne aufbauen	Weg	var.	deterministisch		
		Punkt freilegen	180	Abgeschn. NV	60	
		Equipment aufbauen	60	Abgeschn. NV	20	
		Horizontieren	30	Abgeschn. NV	10	
		Zentrieren	90	Abgeschn. NV	40	
		Höhe messen	60	Abgeschn. NV	30	
		GNSS-Receiver vorbereiten	240	Abgeschn. NV	120	
	Messung starten	Messung starten	60	deterministisch		
Messung läuft		3600	deterministisch			
Messung beenden	Messung beenden	60	deterministisch			



# 3 Prozessoptimierung

*In diesem Kapitel werden zu Beginn wichtige Begriffe wie die Definition der Effizienz und der Prozessoptimierung erläutert. Anschließend wird auf die Effizienzoptimierung von Messprozessen eingegangen und die Wahl des Optimierungsverfahrens diskutiert. Dafür werden die für die Messprozessoptimierung relevanten Optimierungsprobleme kurz vorgestellt und einige gängige Verfahren zur Lösung kombinatorischer Optimierungsprobleme genannt.*

*Für das gewählte Optimierungsverfahren, die genetischen Algorithmen, werden die Grundlagen beschrieben. Es wird auf den formalen Aufbau, die Funktionsweise und die Operatoren eingegangen.*

*Schließlich wird die Vorgehensweise bei der Effizienzoptimierung von Messprozessen erläutert. Als Anwendungsbeispiel wird die tachymetrische Aufnahme mit der Brute-Force-Methode und den genetischen Algorithmen optimiert.*

## 3.1 Definition wichtiger Begriffe

### 3.1.1 Effizienz

Als Effizienz (Wirtschaftlichkeit) wird nach DIN EN ISO 9000 (2000) „das Verhältnis zwischen dem erreichten Ergebnis und den eingesetzten Mitteln“ bezeichnet. Um zu prüfen, ob eine Maßnahme wirtschaftlich ist, wird das Verhältnis von Nutzen und Aufwand gebildet.

In einem Produktionsprozess lässt sich das Verhältnis von verursachten Kosten für die Herstellung und den Einnahmen durch den Verkauf des Produktes bilden, um eine Aussage über die wirtschaftliche Produktion zu machen. Ein Produktionsprozess wird als wirtschaftlich bezeichnet, wenn seine Kosten durch die Einnahmen gedeckt werden. In der Informatik arbeitet eine Software effizient, wenn sie möglichst wenig Hardware-Ressourcen in Anspruch nimmt (speichereffizient) oder eine möglichst geringe Laufzeit benötigt (laufzeiteffizient).

Ein Messprozess lässt sich wie ein Produktionsprozess betrachten, wenn das Ergebnis der Ingenieurvermessung als „Produkt“ verkauft wird. Die Einnahmen werden dann mit den verursachten Kosten ins Verhältnis gesetzt und es wird geprüft, ob der Messprozess wirtschaftlich durchgeführt wurde. Steht der Messprozess dagegen in Wechselwirkung mit anderen Prozessen, wie z. B. Bauprozessen, kann es wichtig sein, dass die Messung möglichst schnell durchgeführt wird.

Messprozesse werden am besten mit folgenden Effizienzkriterien beschrieben:

1. Ein Messprozess ist *kosteneffizient*, wenn er möglichst geringe *Gesamtkosten* verursacht und diese Kosten geringer sind als die Einnahmen, die durch die Messung erzielt werden.
2. Ein Messprozess ist *laufzeiteffizient*, wenn eine möglichst geringe *Dauer* für die Durchführung der Messungen und Auswertungen benötigt wird.

### 3.1.2 Optimierung

Unter einer Optimierung wird im Allgemeinen die Suche nach einem Optimum unter gegebenen Voraussetzungen und einer bestimmten Zielsetzung verstanden. Ein Optimum ist dabei das beste erreichbare Resultat im Sinne eines Kompromisses zwischen verschiedenen Parametern.

In Grafarend u. a. (1979, S.2) ist die mathematische Optimierung als „eine Reihe von Methoden, die geeignet sind, Systeme hinsichtlich einer vorher definierten Zielgröße - der Zielfunktion - und gewissen Nebenbedingungen - den Restriktionen - zu optimieren“ definiert. Im Bereich der ingenieurgeodätischen Messprozesse bedeutet das, dass ein Kompromiss zwischen der erreichbaren Genauigkeit, der Zuverlässigkeit und der Wirtschaftlichkeit zu finden ist.

### 3.1.3 Prozessoptimierung

Die Prozessoptimierung dient zur Steigerung der Effizienz bestehender Prozesse in Organisationen. Hierfür werden die Prozesse zunächst analysiert, wofür die in Kapitel 2 erläuterte Prozessmodellierung eine Grundlage bieten kann. Anschließend werden im Rahmen der Prozessoptimierung die Abläufe und der Ressourceneinsatz so gestaltet, dass der Prozess effizienter durchgeführt werden kann.

### 3.1.4 Simulationsbasierte Optimierung

In der simulationsbasierten Optimierung wird die Optimierung auf Grundlage einer Simulation durchgeführt. Die Zielgröße wird nicht wie in der klassischen Optimierung durch die Berechnung einer Zielfunktion ermittelt, sondern durch die Simulation eines Modells. Genauso, wie die Variablen der Zielfunktion variieren können, können die Variablen des Prozessmodells variieren. Die simulationsbasierte Optimierung bietet insbesondere dann Vorteile, wenn eine Zielfunktion zur Bewertung der Zielsetzung schwer oder nicht aufgestellt werden kann. Dies ist beispielsweise auch bei der Berechnung der Dauer der tachymetrischen Netzmessung der Fall.

## 3.2 Effizienzoptimierung von Messprozessen

### 3.2.1 Ziele der Effizienzoptimierung

Die Wirtschaftlichkeit eines Messprozesses kann über einen Vergleich der Kosten oder der Messdauer beurteilt werden. Werden zwei Varianten einer Messung miteinander verglichen, ist die Variante effizienter, die die geringeren Kosten bzw. die geringere Messdauer verursacht. In den meisten Fällen wird ein Vergleich der Kosten durchgeführt. Der Prozess soll also möglichst kosteneffizient realisiert werden.

In einigen Fällen kann es aber auch wichtig sein, eine möglichst kurze Messdauer zu erreichen. Das kann der Fall sein, wenn für eine Messung nur ein bestimmtes Zeitfenster zur Verfügung steht, weil zum Beispiel Sperrungen durchgeführt werden müssen oder der Messprozess in Wechselwirkung mit anderen Prozessen steht (z. B. Bauprozessen). Der Prozess soll dann möglichst laufzeiteffizient durchgeführt werden.

In den Kosten sind in erster Linie die Personalkosten und die gefahrenen Kilometer während der Messung enthalten (vgl. Abschnitt 2.4.3). Dies sind die Kosten, die von Messplan zu Messplan variieren können, je nachdem, wie lange die Messung dauert und wie weit die Wege im Netz sind, die per Auto zurückgelegt werden. Alle anderen Kosten werden bei der Optimierung des Ablaufplans einer Messung nicht berücksichtigt und müssen individuell, je nach Auftrag, berücksichtigt werden. Zu den individuellen Kosten gehören zum Beispiel die Anfahrtkosten zum Messgebiet, Übernachtungskosten u.s.w.

Zur Ermittlung der Dauer einer Messung wird ein systematisiertes Modell aller Aufgaben bei der Durchführung einer Messung benötigt (vgl. Abschnitt 2.4.2). Es muss zum Beispiel bekannt sein, wie lange der Aufbau eines Punktes dauert oder wie viel Zeit für die Messung mehrerer Vollsätze auf einem Standpunkt (für eine bestimmte Anzahl von Zielpunkten) benötigt wird. Des Weiteren sollten die Zeiten, die zum Zurücklegen der Wege zwischen den einzelnen Messpunkten benötigt werden, bekannt sein.

Eine Bewertung der Wirtschaftlichkeit erfolgt also im Wesentlichen über einen Vergleich zwischen verschiedenen Messvarianten. Ein Ingenieurbüro könnte die Kosten der Messung zusätzlich den Einnahmen gegenüberstellen, die mit dem Auftrag erzielt werden. Dafür müssen noch die bereits erwähnten individuellen Kosten zu den Messkosten addiert werden.

### 3.2.2 Neben- und Randbedingungen der Effizienzoptimierung

Neben den Effizienzkriterien *Dauer* und *Kosten* sind außerdem einige Nebenbedingungen zu nennen, die für die Effizienzoptimierung eine wichtige Rolle spielen können. Hierzu zählen zum Beispiel der *Integrationsgrad*, der *Automatisierungsgrad* und die Einhaltung der *Qualitätsanforderungen*. Ziel einer Effizienzoptimierung kann dann zum Beispiel sein, die Kosten zu minimieren und gleichzeitig einen hohen Automatisierungsgrad zu erreichen.

#### Integrationsgrad

Der Integrationsgrad  $IG$  gibt an, wie gut der ingenieurgeodätische Prozess in einen übergeordneten Prozess (z. B. Bauprozess, Fertigungsprozess) eingliedert ist. Das Ziel bei Einführung dieser Nebenbedingung ist die Verursachung möglichst geringer Kosten durch Wartezeiten anderer, am übergeordneten Prozess beteiligter Personen oder Maschinen (z. B. von Bautrupps, Baumaschinen oder Fertigungsmaschinen). Es kann sinnvoll sein, den Personal- und Ressourceneinsatz für einen Messprozess zu erhöhen, wenn dadurch eine Verringerung der Wartezeitkosten erreicht wird. Hierfür sind die Kosten, die ohne den Einsatz zusätzlichen Personals entstehen (Kosten aus der Planung -  $K_p$ ), den Kosten mit zusätzlichem Personal (und daraus folgenden geringeren Wartezeiten -  $K_n$ ) gegenüberzustellen:

$$IG = \frac{K_p}{K_n} \quad (3.1)$$

Der Integrationsgrad ist höher, je größer  $IG$  wird. Die veranschlagten Kosten können sich auf einen überschaubaren Teilprozess oder auf den gesamten übergeordneten Prozess beziehen. Bei komplexen Gesamtprozessen mit vielen nebenläufigen Aktivitäten, die zu bestimmten Zeitpunkten voneinander abhängig sind, ist letzterer Vorschlag zu wählen. Dann werden auch die Kosten und ggf. zusätzlichen Wartezeiten aller nachfolgenden Arbeiten mit einbezogen.

Sollte  $IG < 1$  sein, ist der Integrationsgrad der neuen Variante schlechter, als die vorhandene Lösung und damit nicht geeignet, um die Kosten zu reduzieren.

#### Automatisierungsgrad

Der Automatisierungsgrad  $AG$  eines Messprozesses ist definiert als das Verhältnis der automatisierten Prozessdauer  $\tau_{auto}$  zur Gesamtprozessdauer  $\tau_{Prozess}$  (DIN 19233). Er kann auch direkt mithilfe der Einsatzdauer des Personals  $\tau_{Pers.Einsatz}$  innerhalb des Gesamtprozesses ausgedrückt werden. In der Gesamtprozessdauer sind sowohl manuelle als auch automatisierte Arbeitsschritte enthalten.

$$AG = \frac{\tau_{auto}}{\tau_{Prozess}} = \frac{\tau_{Prozess} - \tau_{Pers.Einsatz}}{\tau_{Prozess}} \quad (3.2)$$

Der Automatisierungsgrad ist dementsprechend hoch, wenn die Einsatzzeiten des Personals im Prozess gering sind. Wird als Nebenbedingung der Effizienzoptimierung ein möglichst hoher Automatisierungsgrad gefordert, ist  $AG$  zu maximieren.

Ein hoher Automatisierungsgrad lohnt sich hauptsächlich bei Prozessen, die besonders häufig durchgeführt werden. Es ist zu beachten, dass die Hard- und Software, die für die automatisierte Durchführung von Teilprozessen benötigt werden, mit ihren Abschreibungskosten in die Kostenberechnung einzubeziehen sind (vgl. Kostenmodell in Abschnitt 2.4.3).

## Qualitätsanforderungen

Neben den genannten Nebenbedingungen kann die Einhaltung von Qualitätsanforderungen (z. B. Genauigkeit, Zuverlässigkeit, Toleranz) als Randbedingung für die Effizienzoptimierung betrachtet werden. Denn der Nutzen eines ingenieurgeodätischen Prozesses ist gering, wenn die geforderte Qualität nicht eingehalten wird. Eine hohe Effizienz ist häufig nur zu Lasten der Qualität realisierbar – und umgekehrt. Folglich sind sowohl die Erfüllung der Qualitätskriterien als auch die Einhaltung von Zeitvorgaben Mindestvoraussetzungen für ein zu lieferndes Messergebnis. Sinkt die Qualität eines Prozesses soweit, dass die Anforderungen an das Messergebnis nicht mehr erfüllt werden, sinkt auch der Nutzen des ingenieurgeodätischen Prozesses. Der Prozess wird dadurch ineffizienter, weil das Messergebnis nicht in dem Maße verwendet werden kann, wie es vorgesehen war. Wenn die Qualität dahingegen steigt und die Anforderungen an ein Messergebnis „übererfüllt“ sind, muss der Nutzen allerdings nicht unbedingt steigen.

Da eine Qualitätssteigerung meistens mit einem größeren Aufwand verbunden ist, bleibt festzuhalten, dass die Qualität einerseits immer als eine Mindestanforderung an das Messergebnis eingehalten werden muss, andererseits sind bei einer „Übererfüllung“ der Qualitätskriterien Aufwand und gesteigerter Nutzen einander gegenüberzustellen und es ist zu prüfen, ob der Aufwand dafür gerechtfertigt ist.

## Weitere Nebenbedingungen

Als weitere Nebenbedingung kann eine festgelegte Höchstgrenze für die Dauer bei der Optimierung nach Kosten eingeführt werden. Umgekehrt ist auch die Festlegung einer Kostengrenze bei der Optimierung der Dauer vorstellbar. Ähnlich können maximal zur Verfügung stehende Ressourcen behandelt werden.

## 3.3 Wahl des Optimierungsverfahrens für die simulationsbasierte Effizienzoptimierung von Messprozessen

### 3.3.1 Relevante Optimierungsprobleme

In der Einleitung wurden bereits die relevanten Problemklassen für die Optimierung von Messprozessen genannt (vgl. Tabelle 1.1 auf S. 11). Hierzu gehören die kombinatorischen Optimierungsprobleme: Reihenfolgeprobleme, Zuordnungsprobleme und Parametervariationen. Die genannten Problemklassen werden im Folgenden genauer beschrieben.

#### Reihenfolgeprobleme

Großes Potenzial für eine Effizienzsteigerung bietet die Optimierung der Reihenfolge der Tätigkeiten. Hiermit ist die Reihenfolge der Standpunkte, sowie die Aufbau-, Abbau- und Messreihenfolge gemeint. Diese Aufgabe kann vereinfacht als Routenplanungsaufgabe betrachtet werden. In vielen Branchen (Vertrieb, Logistik, ...) ist die Routenplanung der Fahrzeuge eines Unternehmens seit jeher ein wichtiger Bestandteil der Außendienstplanung. Eine Rundreiseplanung des Außendienstmitarbeiters zu den Kunden in verschiedenen Städten stellt ein klassisches Traveling Salesman Problem (TSP) dar, mit dem die kürzeste Route für die Rundreise ermittelt werden soll.

Das TSP gehört der Klasse der np-äquivalenten Probleme an, wodurch sich bei steigender Anzahl der Städte schnell extrem viele Lösungsmöglichkeiten ergeben, die nicht mehr in einer praktikablen Rechenzeit ausgewertet werden können. Die Anzahl der Lösungsmöglichkeiten  $v$  beim symmetrischen TSP (d.h. die Kantengewichte sind ungerichtet) mit bekanntem und identischen Start- und Endpunkt beträgt:

$$v = \frac{(n-1)!}{2}, \text{ mit } n = \text{Anzahl der zu besuchenden Städte} \quad (3.3)$$

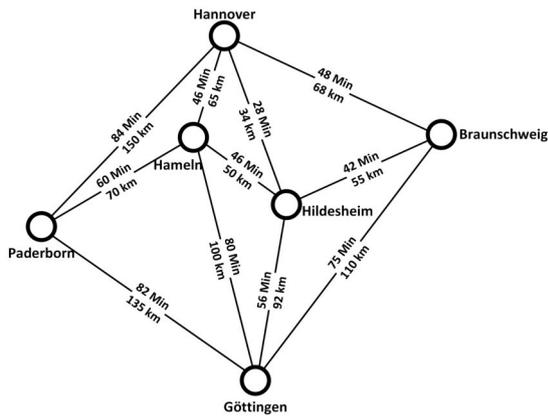


Abbildung 3.1: Entfernungsgraph (Dauer, Distanz) eines symmetrischen TSP



Abbildung 3.2: Lösung für die kürzeste Rundreise

Tabelle 3.1: Distanzmatrix - Dauer in Minuten

	Hannover	Braunschweig	Hildesheim	Hameln	Göttingen	Paderborn
Hannover	0	48	28	46	84	84
Braunschweig	48	0	42	88	75	148
Hildesheim	28	42	0	46	56	106
Hameln	46	88	46	0	86	60
Göttingen	84	75	56	86	0	82
Paderborn	84	148	106	60	82	0

Aufgrund der Wichtigkeit des TSP für die Optimierung von Messprozessen wird im Folgenden ein einfaches Beispiel für ein TSP gezeigt. In Abbildung 3.1 sind sechs Städte dargestellt, die von einem Handlungsreisenden besucht werden sollen. Die Reise beginnt in Hannover. Am Ende der Reise soll er wieder zu seinem Ausgangspunkt Hannover zurückkehren. Die Städte sind als Knoten eines Entfernungsgraphen dargestellt. Dieser Entfernungsgraph kann in eine Entfernungsmatrix umgesetzt werden. Die Distanzmatrix mit der zeitlichen Entfernung zwischen den einzelnen Städten ist in Tabelle 3.1 dargestellt. Da es sich bei dem Graphen um einen symmetrischen Graphen handelt, gibt es 60 Möglichkeiten die Rundreise durchzuführen. Für dieses kleine Beispiel können alle Möglichkeiten berechnet werden. Schon bei zehn Städten wird die Berechnung deutlich aufwändiger, da es hier bereits 181440 Möglichkeiten gibt. Als bestes Ergebnis für das Beispiel wird die Rundreise in Abbildung 3.2 ermittelt. Der Handlungsreisende benötigt dafür 333 Minuten und 469 km.

Übertragen auf eine Messung könnten die Städte den Standpunkten einer Messung entsprechen, die bei einer tachymetrischen Netzmessung genau einmal besetzt werden sollen.

### Zuordnungsprobleme

Bei der Lösung von Zuordnungsproblemen sollen endlich viele Variablen mit Werten aus einer endlichen Wertemenge so belegt werden, dass gewisse Randbedingungen (engl. constraints) eingehalten werden (Boersch u. a., 2007). Sie werden deshalb auch als Constraintprobleme bezeichnet.

Ein bekanntes Zuordnungsproblem ist die Erstellung von Stundenplänen. Hierin sollen in einer einfachen Variante einer Menge von Räumen und Zeitfenstern bestimmte Veranstaltungen zugeordnet werden. Eine Bedingung ist dabei, dass ein Raum während eines Zeitfensters nur durch eine Veranstaltung belegt sein darf. Werden auch noch Teilnehmer, die die Veranstaltung besuchen, Lehrer, die die Veranstaltung halten und Ressourcen, die für die Veranstaltung benötigt werden und in dem Raum zur Verfügung stehen sollen (z. B. Physiksaal, Turnhalle), berücksichtigt, wird das Pro-

blem deutlich komplexer. In diesem Fall gibt es deutlich mehr Nebenbedingungen, die eingehalten werden müssen.

Ebenfalls als Zuordnungsproblem kann die Zuordnung von Mitarbeitern zu bestimmten Maschinen formuliert werden. Randbedingungen können die Eignung der Mitarbeiter zur Bedienung der Maschine sein oder die Minimierung der Kosten, wobei jede Verwendung einer Maschine individuelle Kosten verursacht.

Übertragen auf eine Messung können verschiedene Punkte auf verschiedene Mitarbeiter aufgeteilt werden. Eine Randbedingung ist dann, dass die Zeit, die die Mitarbeiter für den Aufbau oder Abbau der Punkte benötigen, minimal ist. Hierfür ist die Anordnung der Punkte optimal zu wählen, d.h. die Wege sollten möglichst kurz sein. Das Problem kann deshalb auch als Multiple Traveling Salesman Problem (mTSP) formuliert werden, in dem mehrere Handlungsreisende mehrere Städte besuchen sollen.

### Parametervariation

Aufgabe der Parameteroptimierung ist das Finden eines Parametervektors oder eines Parameters zur Optimierung einer Funktion bzw. Zielgröße. Das Ziel ist eine Minimierung bzw. Maximierung der Zielgröße, je nach Problemstellung.

Für eine Messung kann abgeschätzt werden, ob die Durchführung mit einem oder zwei Gehilfen sinnvoller, d.h. kostengünstiger, ist. Die Petri-Netz-Simulation der Messung wird dann mit unterschiedlichen Personenanzahlen durchgeführt. Anhand der Zielgröße, z.B. Minimierung der Kosten oder Dauer, wird die Lösung bewertet.

Für die Aufnahme eines Straßenzuges kommen mehrere Messverfahren, z.B. GPS oder Tachymetrie in Frage. Um herauszufinden, welches Verfahren in dem Fall verwendet wird, könnten beide Messverfahren unter den gegebenen Bedingungen simuliert werden und die Kosten anschließend verglichen werden.

## 3.3.2 Ansätze zur Lösung kombinatorischer Optimierungsprobleme

### Exakte Verfahren

Mit exakten Verfahren wird sicher die optimale Lösung für ein Optimierungsproblem gefunden. Das Problem wird dabei in endlich vielen Schritten gelöst (Domschke u. a., 2015). Hierbei ist die vollständige Enumeration, also das Ausprobieren aller Lösungen die einfachste, oft aber nicht die schnellste Variante. Diese Methode wird auch *Brute-Force-Methode* (BF) genannt. Die Implementierung der Brute-Force-Methode ist i.d.R. recht einfach, die Rechenzeit des Programms kann aber bei steigender Komplexität sehr schnell ansteigen.

Eine weitere übliche Methode ist die unvollständige Enumeration, wozu z. B. auch die *Branch-and-Bound-Verfahren* gehören (Domschke u. a., 2015). Das Problem wird dabei in mehrere Teilmengen aufgeteilt, von denen ggf. nur ein Teil der Lösungen untersucht werden muss. Schlechte Teile werden idealerweise frühzeitig erkannt und müssen nicht untersucht werden.

Eine Erweiterung der *Branch-und-Bound-Verfahren* stellen die *Branch-und-Cut-Verfahren* dar. Hierfür wird der Lösungsraum durch geeignete Nebenbedingungen (*Schnittebenen*) begrenzt. Weitere Informationen zu den beiden Verfahren sind in Domschke und Scholl (2010) zu finden.

Bei komplexen Optimierungsproblemen kann die Berechnung der exakten Lösung sehr lange dauern. Häufig sind heuristische Verfahren die einzige Möglichkeit, eine gute Lösung für das Problem zu erhalten.

### Heuristische Verfahren

Heuristische Verfahren werden angewendet, wenn die Lösung des Problems durch exakte Verfahren zu rechenintensiv ist. Mit ihnen wird nicht unbedingt die optimale Lösung, häufig aber eine gute Lösung erreicht. Nach Domschke und Scholl (2010) lassen sich die Heuristiken unterteilen in:

1. Eröffnungsverfahren
2. Lokale Such- und Verbesserungsverfahren zur Verbesserung einer Lösung
3. Populationsbasierte Verfahren
4. Unvollständig exakte Verfahren, z. B. vorzeitig abgebrochene Branch-and-Bound-Verfahren
5. Relaxionsbasierte Verfahren

Zu den lokalen Such- und Verbesserungsverfahren gehört z. B. das *Simulated Annealing*, welches auf dem Prinzip des physikalischen Abkühlungsvorgangs beruht. Ein weiteres bekanntes Verfahren ist das *Tabu-Search*. Hierbei wird die Nachbarschaft der aktuellen zulässigen Lösung untersucht. Im Gegensatz zu einigen anderen lokalen Verfahren wird hierbei auch eine schlechtere als die aktuelle Lösung akzeptiert, mit der im nächsten Iterationsschritt weitergearbeitet wird (Domschke und Scholl, 2010).

Genetische Algorithmen (GA) sind ein weit verbreitetes populationsbasiertes Optimierungsverfahren, das z. B. zur Lösung von Maschinenbelegungsplanungen eingesetzt wird. GA werden insbesondere dann angewendet, wenn das Problem sehr komplex ist und der Lösungsraum mehrdimensional, diskontinuierlich und verrauscht ist (Goldberg, 1989). Durch ihre randomisierte Arbeitsweise sind die GA in der Lage für solche Probleme eine gute Lösung zu finden und dabei nicht zu einem lokalen Minimum zu konvergieren. Außerdem benötigen die GA keine Zielfunktion während der Optimierung. Ihnen reicht ein Fitnesswert aus, der im Vergleich mit anderen Lösungen für die Güte der Lösung steht.

#### 3.3.3 Diskussion

Für komplexe Messprozesse, wie die tachymetrische Netzmessung, ist es sehr schwierig, eine geeignete Kostenfunktion zur Bewertung der Lösung aufzustellen. Bei einer Netzmessung hängen die nachfolgenden Tätigkeiten, wie der Aufbau der Zielpunkte, stark davon ab, wie mit der Messung begonnen wird. Der Aufbau der Zielpunkte ist jedes Mal unterschiedlich, wenn die Reihenfolge der Standpunkte getauscht wird. Deshalb können während der Simulation einer Lösung nicht einfach Beobachtungsblöcke getauscht werden und die Zeit für den Aufbau als gleich angenommen werden. Das bedeutet, dass bei jeder Veränderung der Standpunktreihenfolge eine neue Simulation durchgeführt werden muss. Aufgrund der Schwierigkeit beim Aufstellen einer geeigneten Funktion zur Bewertung der Güte einer Lösung, eignen sich die GA als Optimierungsverfahren. Für sie wird lediglich ein Fitnesswert benötigt, der aus einer Simulation kommen kann. Die GA lassen sich daher hervorragend mit dem Prozessmodell der Petri-Netze kombinieren. In Mejía u. a. (2012) wird diese Kombination zur Ablaufplanung von komplexen Fertigungssystemen erfolgreich eingesetzt. Hofmann u. a. (2008) haben für die Optimierung von Materialflüssen innerhalb von Bauprozessen ebenfalls eine Kombination aus Petri-Netzen und GA angewendet und damit in ersten Testläufen gute Ergebnisse erzielt.

Für die Optimierung kleinerer Messaufgaben könnten auch exakte Verfahren angewendet werden. Für die tachymetrische Netzmessung liegt die Grenze der Lösbarkeit mit exakten Verfahren in einer angemessenen Rechenzeit allerdings bei ca. 7-9 Netzknoten. Die Tests zur Festlegung dieses Schwellwertes wurden auf dem Rechner GIH-lokal durchgeführt, dessen Spezifikationen in Tabelle 4.3 dargestellt sind. Bei einer größeren Punktzahl ist die Rechenzeit mit exakten Verfahren sehr hoch.

Prinzipiell würden auch andere heuristische Verfahren zur Optimierung einer tachymetrischen Netzmessung in Frage kommen. Es wurden auch Tests mit dem bereits erwähnten Simulated Annealing (SA) durchgeführt. Allerdings konnte mit den GA schneller eine gute Lösung erreicht werden, da dabei mit einer Population von Lösungen gearbeitet und nicht mit einer Einzellösung, wie beim SA. Ein Vorteil bei der Verwendung von GA ist die gute Parallelisierbarkeit bei der Berechnung der Optimierung. Die Population von Lösungen lässt sich parallel auswerten. Aufgrund der guten Ergebnisse, die mit den GA erzielt wurden, wurden bisher keine weiteren Verfahren zur Optimierung von Messprozessen untersucht.

Aufgrund der guten Kombinierbarkeit von Petri-Netzen als Simulationsverfahren und GA als Optimierungsverfahren und des mehrdimensionalen und verrauschten Lösungsraums bei der Ablaufplanung der tachymetrischen Netzmessung werden die GA als Optimierungsverfahren gewählt.

### 3.4 Genetische Algorithmen

GA gehören zur Gruppe der evolutionären Algorithmen, die auf dem Prinzip der biologischen Evolution nach Darwin beruhen. Nach seinem Ansatz erfolgt eine natürliche *Selektion* der stärksten Individuen („survival of the fittest“). Die stärksten Individuen pflanzen sich durch Paarung fort (*Rekombination*). Die Nachkommen erben die genetischen Informationen ihrer Eltern. Durch *Mutationen* wird der genetische Code der Nachkommen zudem leicht verändert. Diese Herangehensweise wird in GA auf Optimierungsprobleme übertragen. Zu Beginn der Optimierung wird eine Population aus verschiedenen Lösungsvorschlägen generiert, die dann von Generation zu Generation verändert (verbessert) wird. Eine detaillierte Erläuterung der Verfahren ist in Goldberg (1989), Domschke und Drexl (2005), Domschke und Scholl (2006) oder Boersch u. a. (2007) zu finden. Hier soll ein kurzer Überblick über den Aufbau und die Funktionsweise von GA gegeben werden, die sich gut für eine Effizienzoptimierung von ingenieurgeodätischen Prozessen eignen.

#### 3.4.1 Formaler Aufbau

Lösungsvorschläge für ein Optimierungsproblem werden in GA in Form von Individuen abgespeichert. In Abbildung 3.3 wird der Aufbau eines solchen Individuums gezeigt. Es besteht aus einer sequentiellen Folge der Eingabeparameter, dem sogenannten Genotyp, optionalen Zusatzinformationen und einem individuell berechneten Fitnesswert. Im Genotyp wird im Falle von Messprozessen z. B. die Reihenfolge der Standpunkte mit Integerwerten codiert (s. Abbildung 4.4 auf S. 76). Als Zusatzattribut kann z. B. die Anzahl der Personen, mit der die Messung durchgeführt wird, oder das verwendete Messinstrument abgespeichert werden. Über eine problemspezifische Bewertungsfunktion oder eine Simulation (wie in dieser Arbeit) wird der Fitnesswert, also die Güte der Lösung, bestimmt. Zur Berechnung dieser Fitness wird der codierte Genotyp (oft binär- oder permutationscodiert) decodiert und in den Phänotyp umgewandelt. Im Falle der Standpunktfolgen würden die Integerwerte den Punktnummern zugeordnet werden. Der dann berechnete Fitnesswert entspricht der Dauer oder den Kosten des Messprozesses, je nachdem, welches Effizienzkriterium gewählt wurde.

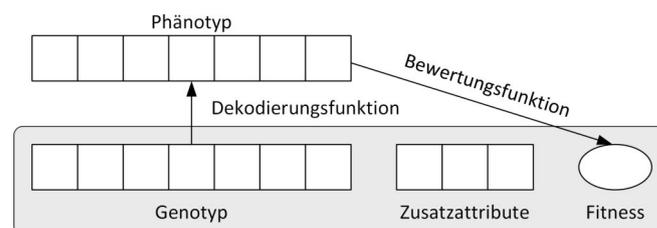


Abbildung 3.3: Bestandteile eines Individuums (nach Weicker, 2007, S. 36)

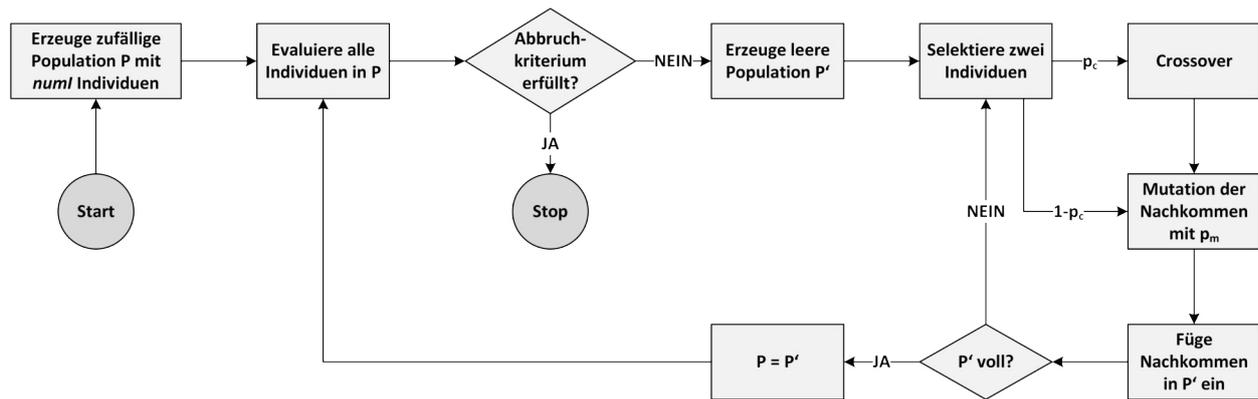


Abbildung 3.4: Ablauf eines simplen GA (nach Boersch u. a., 2007, S. 77)

### 3.4.2 Funktionsweise

In GA wird mit mehreren Lösungsvorschlägen parallel gearbeitet, die zusammen die sogenannte *Population* (Lösungsmenge) bilden. Die Anfangspopulation  $P$  wird aus einer festgelegten Anzahl  $numI$  von Individuen zufällig erzeugt. Im Laufe der Optimierung, deren Ablaufschema in Abbildung 3.4 dargestellt ist, wird die vorhandene Population durch die Operatoren Selektion, Crossover und Mutation in Anlehnung an die Evolutionstheorie nach Darwin verändert. Die guten Individuen werden selektiert und nehmen an der Bildung der nächsten Generation teil, die schlechten Individuen überleben mit einer geringeren Wahrscheinlichkeit. Mit der Crossoverwahrscheinlichkeit  $p_c$  wird ein Crossover (eine Paarung) von zwei Individuen durchgeführt. Über die Mutation, die mit der Mutationswahrscheinlichkeit  $p_m$  durchgeführt wird, werden geringe Änderungen an dem neuen Individuum vorgenommen. Die neu erzeugten Individuen bilden die nächste Generation der Population  $P'$ . Der Prozess aus Selektion, Crossover und Mutation wird solange fortgeführt, bis die Population  $P'$  voll ist, d. h.  $numI$  Individuen enthält. Dann wird  $P = P'$  und der Ablauf startet von Neuem. Um die Optimierung abzuschließen, muss ein geeignetes Abbruchkriterium gefunden werden. Dies ist häufig eine zuvor festgelegte Generationenanzahl  $numG$ . Welche Werte für die Stellgrößen  $numI$  und  $numG$  zu wählen sind, hängt stark von der Komplexität des Problems ab.

Während des Optimierungsprozesses wird in jeder Generation das bis dahin beste Individuum abgespeichert. Dadurch lässt sich die so genannte Fitness-Historie erstellen.

### 3.4.3 Operatoren

#### Selektion

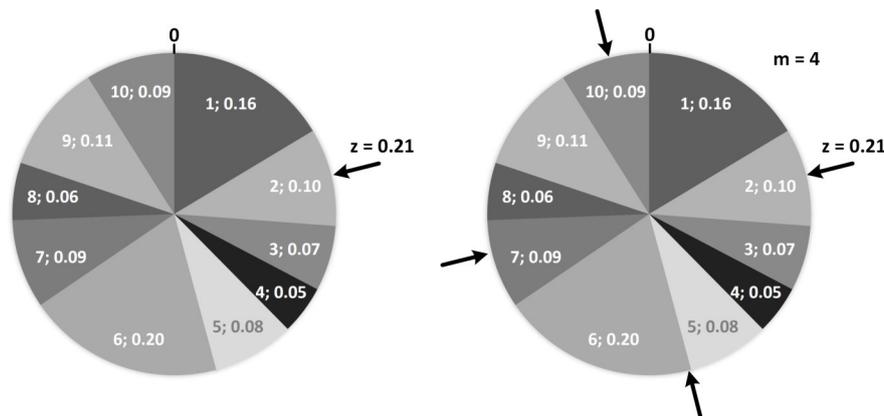
Aus der Population wird per Selektionsverfahren ein Teil der Individuen ausgewählt und aus diesen selektierten Individuen wird mit den Verfahren der *Rekombination* (*Crossover*) und *Mutation* eine neue Generation von Individuen gebildet. Die Auswahl der Individuen erfolgt nach ihrer Güte und wird über den Fitnesswert gesteuert. Gute Individuen haben eine größere Chance an der Bildung der neuen Generation teilzunehmen. Es gibt verschiedene Ansätze, wie diese guten Individuen ausgewählt werden. Die Wahl des Selektionsverfahrens bestimmt den Selektionsdruck und damit verbunden kann der Verlust der Vielfalt gesteuert werden. Pohlheim (1998) hat in seiner Dissertation verschiedene Selektionsverfahren beschrieben und miteinander verglichen.

Bei einer **fitnessproportionalen Selektion**, wie der *Rouletteselektion*, werden die Individuen entsprechend ihrer Fitness aus der Population ausgewählt. Die Fitnesswerte  $f_i$  bekommen Wahrscheinlichkeitswerte  $p_i$  zugeordnet, die darüber entscheiden, mit welcher Wahrscheinlichkeit das Individuum an dem Selektionsprozess teilnimmt. Der aktuelle Fitnesswert  $f_i$  wird dabei durch die Summe aller Fitnesswerte  $\sum_{j=1}^n f_j$  der aktuellen Population geteilt.

Die Wahrscheinlichkeit  $p_i$  berechnet sich wie folgt (Boersch u. a., 2007, S. 74):

$$p_i = \frac{f_i}{\sum_{j=1}^n f_j} \quad (3.4)$$

Die Individuen werden anschließend nacheinander in einem Rouletterad angeordnet. Die Größe des Abschnitts entspricht der Wahrscheinlichkeit  $p_i$ . Hierbei wird von einer Maximierung des Fitnesswertes ausgegangen. Soll die Fitness minimiert werden, wie beispielsweise die Kosten einer Messung, ist  $f_i := 1/f_i$  in die Formel einzusetzen. Bei der Rouletteselektion wird eine Zufallszahl  $z$  (gleichverteilt im Bereich zwischen 0 und 1) generiert. Das Individuum, in dessen Abschnitt diese Zufallszahl zeigt, wird ausgewählt. Dieser Vorgang wird so oft wiederholt, wie Individuen ausgewählt werden sollen. In Abbildung 3.5 (links) wird ein Beispiel mit zehn Individuen gezeigt. Als Zufallszahl wurde  $z = 0.21$  generiert. Dadurch wird das zweite Individuum ausgewählt.



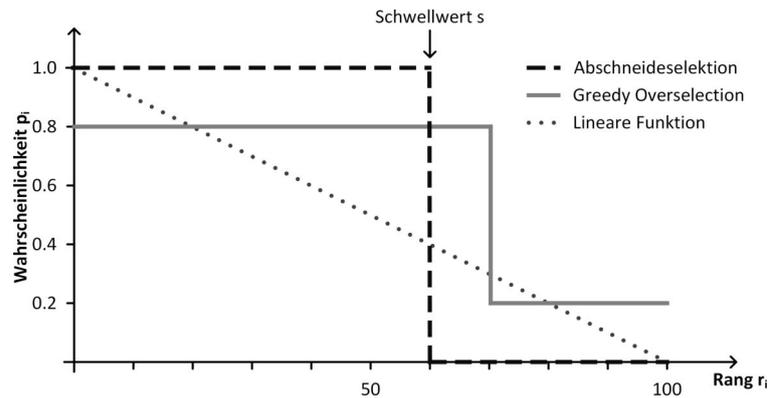
**Abbildung 3.5:** Beispiele für (links) Rouletteselektion und (rechts) Stochastic universal sampling

Das *Stochastic universal sampling* ist der Rouletteselektion sehr ähnlich. Die Individuen werden, wie bei der Rouletteselektion, in einem Rouletterad angeordnet. Bei dieser Variante werden gleichzeitig  $m$  Individuen ausgewählt. Die  $m$  Punkte werden gleichmäßig über das Rouletterad verteilt, ausgehend von einer generierten Zufallszahl  $z$ , gleichverteilt im Bereich zwischen 0 und 1 (Boersch u. a., 2007). Abbildung 3.5 (rechts) zeigt ein Beispiel mit zehn Individuen, bei dem vier Individuen gleichzeitig ausgewählt werden. Als Zufallszahl wurde auch hier  $z = 0.21$  generiert.

Bei der **Turnierselektion** werden  $n$  Individuen zufällig aus der Population ausgewählt. Der Gewinner des Turniers ist das Individuum mit dem besten Fitnesswert. Umso größer die Turniergröße  $n$  gewählt wird, umso größer ist der Selektionsdruck und der Verlust der Vielfaltigkeit in der Population (Pohlheim, 1998). Das liegt daran, dass Individuen mit einer geringen Fitness bei einer größeren Gruppe weniger Chancen auf den Gewinn des Turniers haben.

Bei der **rangbasierten Selektion** werden die Individuen nach ihrer Güte sortiert. Mithilfe der Position in der Liste (Rang  $r_i$ ) wird die Wahrscheinlichkeit  $p_i$  bestimmt, mit der das Individuum  $i$  am Rekombinationsprozess teilnimmt. Individuen mit einem höheren Rang nehmen mit einer höheren Wahrscheinlichkeit am Rekombinationsprozess zur Bildung der neuen Generation teil. Häufig wird eine lineare Funktion zur Berechnung der Wahrscheinlichkeit  $p_i$  verwendet, wie in Abbildung 3.6 dargestellt. Üblich ist auch das Verfahren der *Greedy Overselection* (Boersch u. a., 2007), bei dem die besten Individuen (z. B. 70%, s. Abbildung 3.6) mit einer Wahrscheinlichkeit von  $p_i = 0.8$  und die schlechteren 30% mit einer Wahrscheinlichkeit von  $p_i = 0.2$  selektiert werden.

Bei der *Abschneideselektion* werden nur die besten Individuen ausgewählt. Dazu werden die Individuen ebenfalls nach ihrer Güte sortiert. Anschließend werden alle Individuen, die sich oberhalb eines Schwellwertes  $s$  befinden, ausgewählt. Die anderen Individuen nehmen nicht am Reprodukti-



**Abbildung 3.6:** Beispiele für Funktionen zur Berechnung der Wahrscheinlichkeit  $p_i$  in Abhängigkeit vom Rang  $r_i$  des Individuums  $i$  (hier für 100 Individuen)

onsprozess teil. Der Variationsdruck variiert mit dem Schwellwert. Werden  $s = 40\%$  der Individuen ausgewählt, ist der Selektionsdruck größer als bei  $s = 60\%$  (wie in Abbildung 3.6).

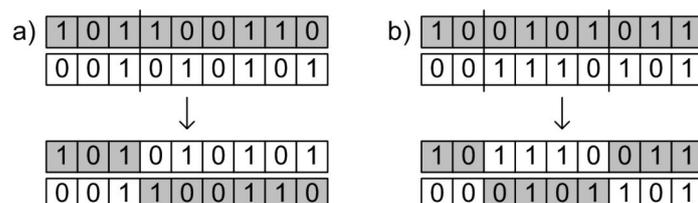
Ein Mittel, um die besten Individuen einer Generation in jedem Fall in die nächste Generation zu übertragen, ist der **Elitismus**. Hierbei wird z.B. das beste Individuum einer Generation ohne Veränderung in die Population der nächsten Generation übernommen.

### Rekombination/Crossover

Nach der Selektion der Individuen, werden jeweils zwei Individuen mit einer bestimmten Crossoverwahrscheinlichkeit (Rekombinationswahrscheinlichkeit)  $p_c$  miteinander gekreuzt. Dadurch entstehen zwei neue Individuen, die einen Teil der neuen Population bilden. Die Einführung einer Crossoverwahrscheinlichkeit ist eine Besonderheit der GA. Hierdurch besteht die Möglichkeit, dass Individuen erhalten bleiben und unverändert in die nächste Generation übergehen können. Die Crossoverwahrscheinlichkeit kann Werte zwischen  $p_c = 0$  und  $p_c = 1$  annehmen. Bei einer Wahrscheinlichkeit von  $p_c = 0$  findet nie eine Rekombination statt und bei  $p_c = 1$  immer.

Der Crossoveroperator führt die Eigenschaften verschiedener Individuen zusammen, indem er zwei Eltern (selektierte Individuen der aktuellen Generation) zu zwei Nachkommen (Individuen der nächsten Generation) kombiniert. Die Beschreibung der Operatoren und die Beispiele erfolgen nach Boersch u. a. (2007). In Abbildung 3.7 sind der *1-Punkt-Crossover* und der *2-Punkt-Crossover* dargestellt. Beim 1-Punkt-Crossover werden zwei Individuen an einer zufälligen Stelle geteilt und die Endstücke werden vertauscht. Beim 2-Punkt-Crossover gibt es zwei Stellen an denen die Individuen geteilt werden und das Mittelstück wird getauscht. Dieses Verfahren lässt sich auf *n-Punkt-Crossover* erweitern und lässt sich auf viele Arten von Genotypen anwenden.

Da es Fälle gibt (wie zum Beispiel das Traveling Salesman Problem), bei denen jeder Wert nur einmal im Parametervektor auftreten darf, ist es wichtig, für die Individuen permutationserhaltende Operatoren bei der Rekombination zu verwenden. Zu diesen Operatoren gehören das *Partially*



**Abbildung 3.7:** Crossovervarianten: a) 1-Punkt-Crossover und b) 2-Punkt-Crossover

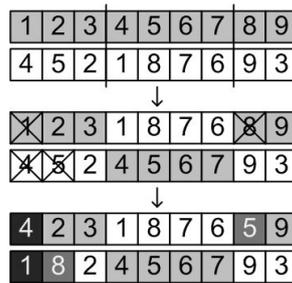


Abbildung 3.8: *Partially Matched Crossover (PMX)*

*Matched Crossover (PMX)*, das *Ordered Crossover (OX)* und das *Cycle Crossover (CX)*. Das PMX in Abbildung 3.8 arbeitet prinzipiell wie das 2-Punkt-Crossover, indem die Mittelteile der Eltern ausgetauscht werden. Da das Verfahren permutationserhaltend sein soll, können allerdings der Anfangs- und Endteil der Eltern nicht einfach für die Nachkommen übernommen werden. Im Fall vom ersten Nachkommen würde sonst die 1 zweimal auftauchen und die 4 gar nicht. Ebenso verhält es sich mit der 8 und der 5. Deshalb wird die 1 mit der 4 getauscht und die 8 mit der 5. Dadurch wird erreicht, dass in beiden Nachkommen alle Zahlen nur einmal vorhanden sind.

## Mutation

Zur Erhaltung der Vielfalt werden die Merkmale der rekombinierten Lösungen an einer oder mehreren Stellen mit einer festzulegenden Mutationswahrscheinlichkeit  $p_m$  zufällig verändert. Wie die Crossoverwahrscheinlichkeit kann auch die Mutationswahrscheinlichkeit Werte zwischen  $p_m = 0$  und  $p_m = 1$  annehmen. Bei Werten nahe 1 findet mit großer Wahrscheinlichkeit eine Mutation des Individuums statt. Die *Standardmutation* verändert die Bitcodierung des Genotyps: mit einer bestimmten Mutationswahrscheinlichkeit werden ein oder mehrere Bits des Parametervektors negiert. Bei permutatiionscodierten Genotypen sind auch bei der Mutation spezielle *permutationserhaltende Operatoren* zu verwenden. Abbildung 3.9 zeigt mögliche permutationserhaltende Operatoren.

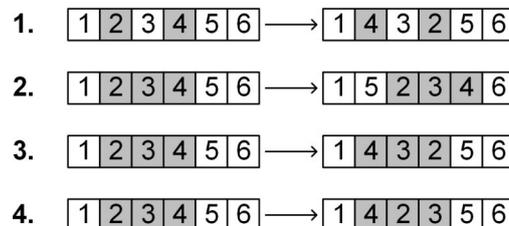


Abbildung 3.9: *Permutationserhaltende Mutationsoperatoren: 1. Tausch zweier Gene, 2. Verschieben eines Teilstrings, 3. Inversion (Umdrehen) eines Teilstrings, 4. Permutation (Mischen) eines Teilstrings*

Die beschriebene Vorgehensweise aus Selektion, Rekombination und Mutation wird bis zur Erfüllung eines Abbruchkriteriums (z. B. einer bestimmten Anzahl von Generationen oder Konvergenz der Lösung) durchgeführt. Das Individuum mit dem bis dahin besten Fitnesswert wird als Ergebnis der Optimierung ausgegeben.

### 3.4.4 Anwendung

Die Anwendung der GA als Optimierungsverfahren hat den Vorteil, dass nur ein Teil des Lösungsraums abgesucht wird und so eine deutlich geringere Rechenzeit als bei der kompletten Untersuchung des Lösungsraums erreicht wird. Durch die Rekombination werden gute Eigenschaften einzelner Lösungen (Individuen) in die nächste Generation übertragen und die Suche im Lösungsraum wird dadurch immer gezielter. Die Anwendung der Mutation sorgt aber dennoch dafür, dass

lokale Minima im Lösungsraum wieder verlassen werden können und das globale Minimum gefunden werden kann.

Für jede Problemstellung ist festzulegen, wie viele Individuen pro Generation erzeugt werden sollen und wie viele Generationen ausgewertet werden sollen. Weitere Stellgrößen (s. Tabelle 3.2), die die Fortpflanzung und Veränderung von Individuen beeinflussen, sind die Wahl des Selektionsverfahrens und damit die Festlegung des Selektionsdrucks und die Wahrscheinlichkeiten, dass Individuen sich paaren oder verändern (Crossover- und Mutationswahrscheinlichkeit).

**Tabelle 3.2:** *Stellgrößen für die Optimierung mit GA*

Stellgrößen	Mögliche Werte
Optimierungsziel	Dauer, Kosten
Individuenanzahl $numI$	$numI \in \mathbb{N}^+$
Generationenanzahl $numG$	$numG \in \mathbb{N}^+$
Mutationswahrscheinlichkeit $p_m$	0.0 bis 1.0
Crossoverwahrscheinlichkeit $p_c$	0.0 bis 1.0
Selektionsverfahren	s. Abschnitt 3.4.3 Selektion

### 3.4.5 Bewertung der Effektivität

Zur Bewertung der Güte des Optimierungsergebnisses mit GA müssen vergleichbare Kriterien gefunden werden. Da die beste Lösung in der Regel nicht bekannt ist und damit keine absolute Abweichung zur besten Lösung berechnet werden kann, müssen andere Kriterien herangezogen werden, um Lösungen zu bewerten, die mit verschiedenen Stellgrößen berechnet wurden. Die Berechnung einer Problemstellung (Umgebung) mit bestimmten Stellgrößen wird im Folgenden Szenario genannt. Ein aussagekräftiger Vergleich der *Fitnesshistorien* verschiedener Szenarien ist nur mit gemittelten Werten aus mehreren Iterationen möglich, da die Einzellösungen stark zufallsbestimmt sind. Weitere Bewertungskriterien sind die *minimalen* und *maximalen Werte der Lösungen* (hier: Dauer oder Kosten) sowie die *mittleren Werte* und deren *Standardabweichungen*. Außerdem kann bei mehreren Iterationen die *jemals erzielte beste Lösung* für die Umgebung gespeichert werden, die dann mit den weiteren Lösungen verglichen werden kann.

De Jong (1975) schlägt in seiner Dissertation die *Online-Performance* und die *Offline-Performance* zum Vergleich verschiedener Lösungen vor. Sie berechnet sich aus den Fitnesswerten des Optimierungsprozesses, ist aber durch die dort eingeführte Mittelbildung im Gegensatz zur Fitnesshistorie bereits geglättet, weshalb sie der Fitnesshistorie als Bewertungskriterium vorzuziehen sind.

Die *Online-Performance*  $x_e(s)$  eines Szenarios  $s$  in einer Umgebung  $e$  wird danach wie folgt berechnet:

$$x_e(s) = \frac{1}{T} \sum_1^T f_e(t) \quad (3.5)$$

$f_e(t)$  ist der Fitnesswert der Umgebung zum Testzeitpunkt  $t$  und  $T$  ist die Anzahl der bisher berechneten Testzeitpunkte. Die *Online-Performance* ist also das *Mittel aller bisher berechneten Fitnesswerte* bis zum aktuellen Testzeitpunkt. Sie zeigt, wie sich die gesamte Population über die Generationen entwickelt.

Das zweite Maß ist die *Offline-Performance*  $x_e^*(s)$  eines Szenarios  $s$  in einer Umgebung  $e$ . Sie wird wie folgt berechnet:

$$x_e^*(s) = \frac{1}{T} \sum_1^T f_e^*(t) \quad (3.6)$$

mit  $f_e^*(t) = \text{best} \{f_e(1), f_e(2), \dots, f_e(t)\}$ . Die *Offline-Performance* ist demnach ein *Mittel der besten Fitnesswerte* einer Generation zum Zeitpunkt  $t$  und gibt die Konvergenz der Lösung an.

Auch bei der *Online-* und *Offline-Performance* sollten zur aussagekräftigen Beurteilung eines Szenarios Mittelwerte aus mehreren Iterationen verwendet werden.

## 3.5 Effizienzoptimierung von Messprozessen

### 3.5.1 Zusammenhänge

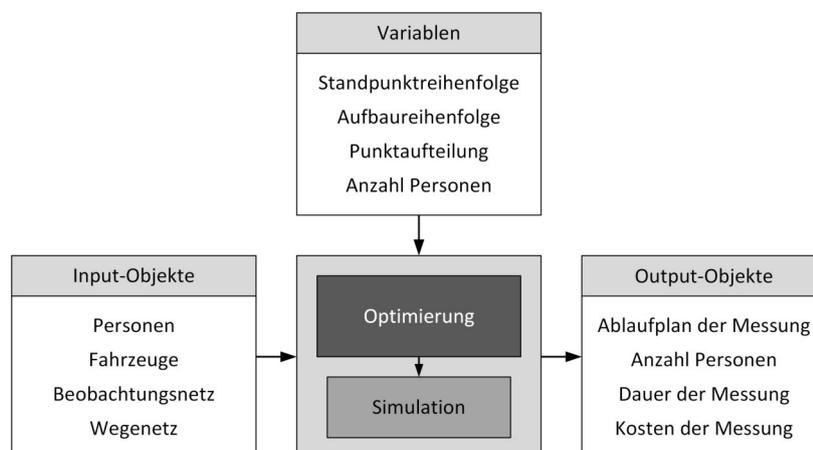
Als Grundlage für die Effizienzoptimierung eines Messprozesses müssen mögliche Input-Objekte und die Variablen definiert werden. Zu den Input-Objekten gehören nach Abbildung 3.10 das Personal, verfügbare Fortbewegungsmittel, das Beobachtungsnetz und ein Wegenetz. Zu den Variablen, also den Größen, die während der Optimierung verändert werden, zählen die Standpunktfolgenfolge, die Aufbaureihenfolge und die Aufteilung der Punkte auf verfügbare Personen. Außerdem kann die Anzahl der Personen, die die Messung durchführt, optimiert werden.

In der Effizienzoptimierung werden Lösungen mit den Input-Objekten und den Variablen zusammengestellt. In einer Simulation wird für jeden Lösungsvorschlag ein Fitnesswert zur Bewertung der Lösung ermittelt. Mithilfe eines Optimierungsverfahrens wird die beste bzw. eine möglichst gute Lösung auf Basis des vorgegebenen Optimierungsziels (geringe Kosten, geringe Dauer) gesucht. Die Output-Objekte der Optimierung sind der Ablaufplan der Messung, die Anzahl der Personen sowie die Gesamtdauer und die Gesamtkosten des Messprozesses.

Mathematisch ausgedrückt handelt es sich um ein kombinatorisches Optimierungsproblem. Für einfache Aufgaben können alle möglichen Lösungen aufgewertet werden. In einem komplexen Messprozess, wie der tachymetrischen Netzmessung, lassen sich die Variablen auf viele verschiedene Weisen kombinieren. Es handelt sich daher um ein komplexes kombinatorisches Problem, das sich nicht ohne einen hohen Rechenaufwand lösen lässt. Deshalb wird eine Optimierung der tachymetrischen Netzmessung mithilfe von GA durchgeführt.

### 3.5.2 Beispiel: Tachymetrische Aufnahme

Um die Vorgehensweise bei der Effizienzoptimierung von Messprozessen zu verdeutlichen, wird das einfache Beispiel der tachymetrischen Aufnahme gewählt (Abbildung 3.11). Die tachymetrische Aufnahme wurde als Simulationsbeispiel bereits in Abschnitt 2.4.4 eingeführt. Bei der beschriebenen



**Abbildung 3.10:** Schematische Darstellung der Zusammenhänge bei der simulationsbasierten Effizienzoptimierung von Messprozessen

Messsituation können folgende Eingangsgrößen optimiert werden: Reihenfolge der Messung der Aufnahmepunkte, Auf- und Abbaureihenfolge der Anschlusspunkte und des Standpunktes, Aufteilung der Anschlusspunkte beim Auf- und Abbau. Alle Möglichkeiten für das Beispiel sind in Tabelle 3.3 aufgelistet. Die Anzahl der Möglichkeiten für die Optimierung der Messreihenfolge der Aufnahme beträgt  $4! = 24$ . Für den Auf- und Abbau der Anschlusspunkte werden die Punkte auf den Beobachter und den Gehilfen aufgeteilt. Es gibt drei Anschlusspunkte, die auf  $2^3 = 8$  Arten aufgeteilt werden können. Dem Beobachter wird zusätzlich noch der Auf- und Abbau des Standpunktes zugeordnet. Unter der Annahme, dass der Standpunkt beim Aufbau zuletzt aufgebaut und beim Abbau zuerst abgebaut wird, ergeben sich bei drei Anschlusspunkten für eine Person jeweils  $3! = 6$  Möglichkeiten und bei zwei Anschlusspunkten für eine Person jeweils  $2! = 2$  Möglichkeiten für die Anordnung der Reihenfolge. Insgesamt entstehen damit die 24 Möglichkeiten für den Aufbau bzw. Abbau, die in Tabelle 3.3 gezeigt werden.

Aufgrund der relativ kurzen Entfernung zwischen den Messpunkten werden alle Wege zu Fuß zurückgelegt. Hierfür sind keine weiteren Kosten pro Kilometer zu berücksichtigen. Für den Beobachter werden 60 Euro/h als Stundenlohn angesetzt und für den Gehilfen 30 Euro/h.

### Optimierung mit der Brute-Force-Methode

Für einfache Messprozesse, zu denen auch eine tachymetrische Aufnahme gehört, können alle Varianten mit verschiedenen und unterschiedlich kombinierten Variablen simuliert und miteinander verglichen werden. Der Vorteil der BF-Methode besteht darin, dass sie einfach zu implementieren ist und mit Sicherheit die beste Lösung liefert. Die Dauer der Messung wurde mithilfe des Petri-Netztes in Abbildung 2.16 und des Laufzeitmodells in Tabelle 2.5 berechnet. Für die Dauer der einzelnen Prozessschritte wurden die deterministischen Werte verwendet. Insgesamt ergeben sich  $24 \cdot 24 \cdot 24 = 13824$  Lösungen durch die Kombination aller Möglichkeiten aus Tabelle 3.3. Tabelle 3.4 zeigt die Zusammenstellung der Varianten. Für den Messprozess der tachymetrischen Aufnahme könnten im Prinzip auch der Aufbau, die Messung und der Abbau getrennt optimiert werden und die jeweils besten Varianten miteinander kombiniert werden. Allerdings müssen dabei auch die Positionen der Personen im Messgebiet berücksichtigt werden. Denn auch die Wege, die die Personen zwischen den einzelnen Modulen Aufbau und Stationierung, Messung und Abbau zurücklegen, benötigen Zeit. Deshalb wird die Gesamtdauer mit dem Petri-Netz-Modell aus Abbildung 3.11 simuliert und es werden alle 13824 Kombinationsmöglichkeiten ausgewertet. Des Weiteren soll mit diesem

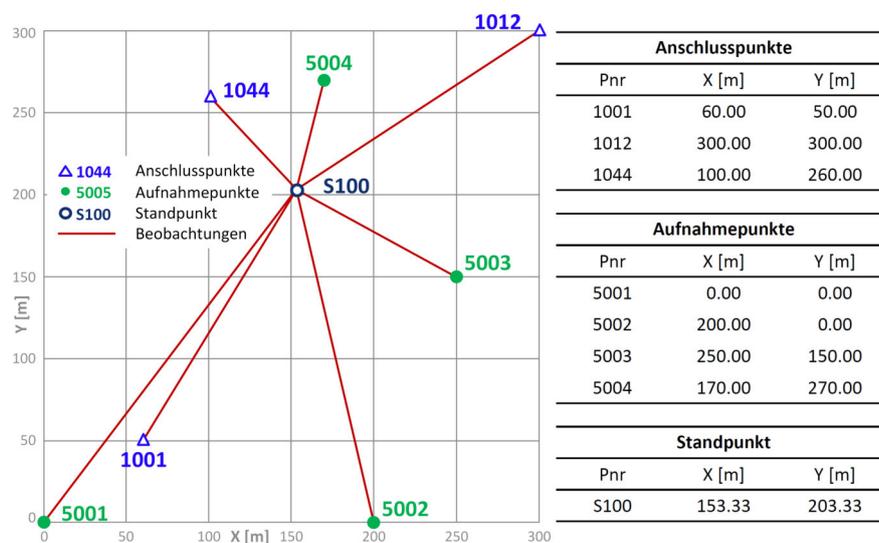


Abbildung 3.11: Tachymetrische Aufnahme: Übersicht der Anschluss- und Aufnahmepunkte (identisch mit Abbildung 2.23)

einfachen Beispiel nachvollziehbar gezeigt werden, wie der Optimierungsprozess unter Verwendung von Petri-Netz-Modellen funktioniert. Für die Optimierung der tachymetrischen Netzmessung, die in Kapitel 4 vorgestellt wird, ist keine Aufteilung der einzelnen Tätigkeiten in Module möglich, da mit jeder Änderung der Standpunktfolgenfolge auch die Aufbau- und Umbau- und Abbautätigkeiten variieren. Der Lösungsraum für das gezeigte Beispiel der tachymetrischen Aufnahme erstreckt sich von der maximalen Messdauer  $d_{max} = 1.015$  Stunden = 60.9 Minuten bis zur minimalen Mess-

**Tabelle 3.3:** *Tachymetrische Aufnahme: Varianten für den Auf- und Abbau (Aufteilung und Reihenfolge der Anschlusspunkte und des Standpunktes) sowie die Aufhalte- und Messreihenfolgenfolge der Aufnahmepunkte*

Aufbauvarianten			Messvarianten	Abbauvarianten			
Beobachter		Gehilfe		Beobachter		Gehilfe	
1	1001-1012-1044-S100	-	1	5001-5002-5003-5004	1	S100-1001-1012-1044	-
2	1001-1044-1012-S100	-	2	5001-5002-5004-5003	2	S100-1001-1044-1012	-
3	1012-1001-1044-S100	-	3	5001-5003-5002-5004	3	S100-1012-1001-1044	-
4	1012-1044-1001-S100	-	4	5001-5003-5004-5002	4	S100-1012-1044-1001	-
5	1044-1001-1012-S100	-	5	5001-5004-5002-5003	5	S100-1044-1001-1012	-
6	1044-1012-1001-S100	-	6	5001-5004-5003-5002	6	S100-1044-1012-1001	-
7	1001-1012-S100	1044	7	5002-5001-5003-5004	7	S100-1001-1012	1044
8	1012-1001-S100	1044	8	5002-5001-5004-5003	8	S100-1012-1001	1044
9	1001-1044-S100	1012	9	5002-5003-5001-5004	9	S100-1001-1044	1012
10	1044-1001-S100	1012	10	5002-5003-5004-5001	10	S100-1044-1001	1012
11	1012-1044-S100	1001	11	5002-5004-5001-5003	11	S100-1012-1044	1001
12	1044-1012-S100	1001	12	5002-5004-5003-5001	12	S100-1044-1012	1001
13	1001-S100	1012-1044	13	5003-5001-5002-5004	13	S100-1001	1012-1044
14	1001-S100	1044-1012	14	5003-5001-5004-5002	14	S100-1001	1044-1012
15	1012-S100	1001-1044	15	5003-5002-5001-5004	15	S100-1012	1001-1044
16	1012-S100	1044-1001	16	5003-5002-5004-5001	16	S100-1012	1044-1001
17	1044-S100	1001-1012	17	5003-5004-5001-5002	17	S100-1044	1001-1012
18	1044-S100	1012-1001	18	5003-5004-5002-5001	18	S100-1044	1012-1001
19	S100	1001-1012-1044	19	5004-5001-5002-5003	19	S100	1001-1012-1044
20	S100	1001-1044-1012	20	5004-5001-5003-5002	20	S100	1001-1044-1012
21	S100	1012-1001-1044	21	5004-5002-5001-5003	21	S100	1012-1001-1044
22	S100	1012-1044-1001	22	5004-5002-5003-5001	22	S100	1012-1044-1001
23	S100	1044-1001-1012	23	5004-5003-5001-5002	23	S100	1044-1001-1012
24	S100	1044-1012-1001	24	5004-5003-5002-5001	24	S100	1044-1012-1001

**Tabelle 3.4:** *Tachymetrische Aufnahme: Zusammenstellung aller Varianten*

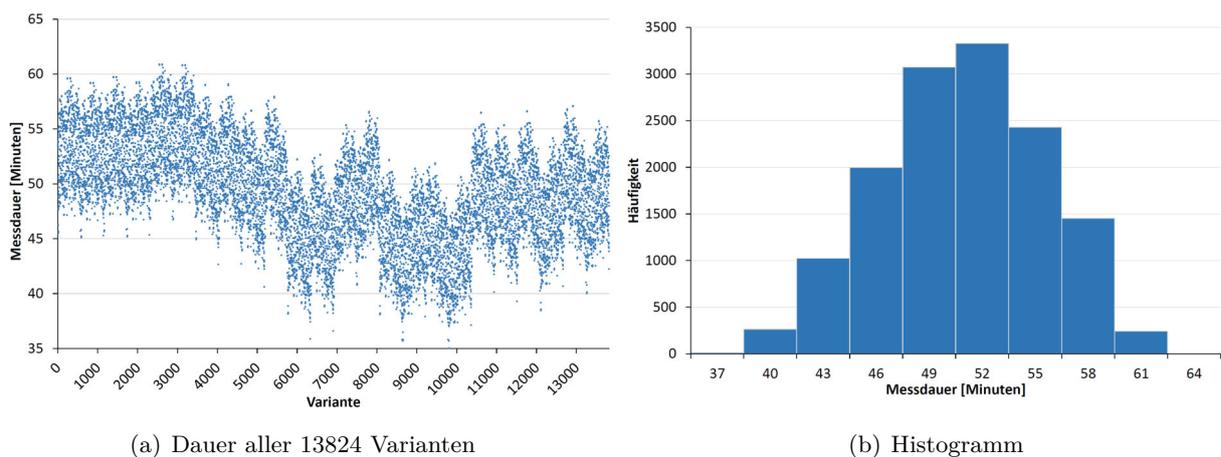
Variante	Aufbauvariante	Messvariante	Abbauvariante
1	1	1	1
2	1	1	2
3	1	1	3
⋮	⋮	⋮	⋮
25	1	2	1
26	1	2	2
27	1	2	3
⋮	⋮	⋮	⋮
49	1	3	1
50	1	3	2
51	1	3	3
⋮	⋮	⋮	⋮
577	2	1	1
578	2	1	2
579	2	1	3
⋮	⋮	⋮	⋮
13824	24	24	24

dauer  $d_{min} = 0.582$  Stunden = 34.9 Minuten. In Abbildung 3.12 ist die Messdauer aller 13824 Lösungsvarianten dargestellt. Der Lösungsraum des Beispiels ist vierdimensional

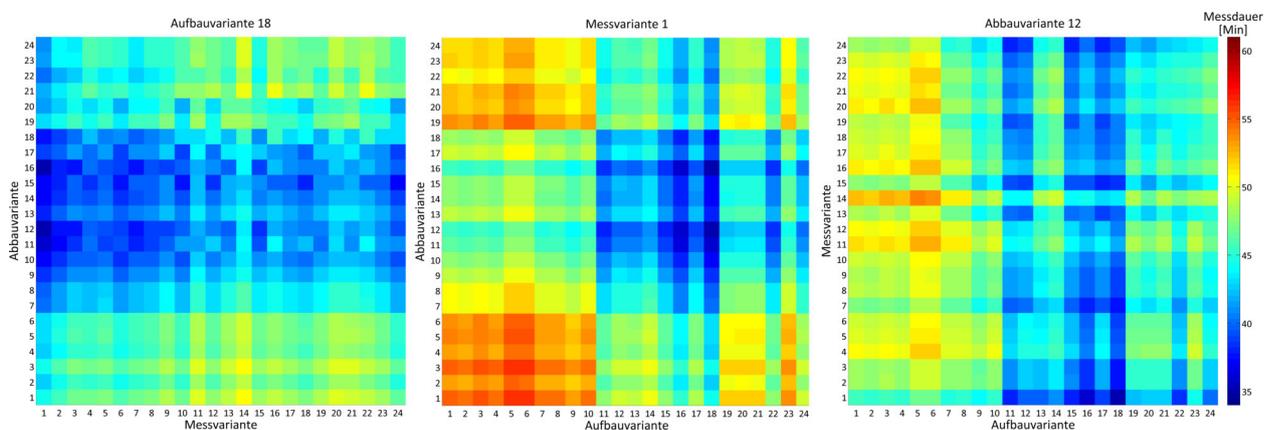
$$f(\text{Aufbauvariante, Messvariante, Abbauvariante}) = \text{Messdauer} \quad (3.7)$$

und kann daher nicht ohne weiteres vollständig geplottet werden. In Abbildung 3.13 wird deshalb immer eine Variante als konstant angenommen. Die Messdauer wird als Farbwert zwischen blau und rot abgebildet. Wobei blau für eine kurze Dauer und rot für eine lange Dauer verwendet wird.

Abbildung 3.13 (links) zeigt die Variation der Dauer in Abhängigkeit von der Abbau- und Messvariante. Als Aufbauvariante wurde die Variante 18 gewählt, da damit die insgesamt geringste Dauer erreicht wurde. In der Abbildung ist zu erkennen, dass die Varianten 7 bis 18 für den Abbau weniger Zeit beanspruchen als die Varianten 1-6 und 19-24. Bei den mittleren Varianten werden die Punkte auf den Beobachter und den Gehilfen aufgeteilt. Die Wahl der Messvariante hat im Gegensatz zur Abbauvariante einen geringeren Einfluss auf die Gesamtdauer des Prozesses, da die Wege zwischen den einzelnen Punkten sehr kurz sind. Bei sehr weiten Wegen und einer größeren Anzahl von Punkten wäre der Einfluss der Messreihenfolge auf die Berechnung der Dauer größer, was eine ausgeprägtere Struktur im Plot verursachen würde. In diesem Beispiel werden die besten Ergebnisse mit der ersten Messvariante erzielt, bei der die Reihenfolge dem kürzesten Weg zwischen allen Aufnahmepunkten entspricht. Mit Variante 14 werden die schlechtesten Ergebnisse erzielt.



**Abbildung 3.12:** Tachymetrische Aufnahme: Zusammenstellung aller Varianten für die BF-Berechnung



**Abbildung 3.13:** Tachymetrische Aufnahme: Lösungsräume verschiedener Aufbau-, Mess- und Abbauvarianten

Abbildung 3.13 (Mitte) zeigt die Variation der Dauer in Abhängigkeit von der Aufbau- und der Abbauparadigme. Für die Messung wurde in diesem Fall Variante 1 gewählt. Es ist zu erkennen, dass die dominantesten Strukturen durch die Wahl der Aufbauvariante entstehen. Die Varianten 11 bis 18, in der die Punkte auf die beiden Personen aufgeteilt werden, erzeugen geringe Gesamtdauern. In diesem Fall wird auch eine deutlich erkennbare Struktur von der Abbauparadigme erzeugt. Insgesamt ist die Dauer des Abbaus kürzer als die des Aufbaus. Die Dauer für das Zurücklegen der Wege zwischen den Punkten ist jedoch identisch. Bei den Abbauparadigmen 1 bis 6 baut der Beobachter alle Punkte allein ab, während der Gehilfe keine Aufgaben hat. Die gleichzeitige Wahl dieser Variante mit den Aufbauvarianten 1 bis 10 verursacht den ausgeprägten roten Bereich links unten. Bei Variante 11 und 12 ist die Gesamtprozessdauer trotz ungerecht verteilter Aufbaukonstellation (Beobachter: drei Punkte, Gehilfe: einen Punkt) vergleichsweise gering, da der Gehilfe den Punkt 1001 aufbaut und im Anschluss daran einen kurzen Weg zum ersten Aufnahmeort 5001 hat.

Abbildung 3.13 (rechts) zeigt die Variation der Dauer in Abhängigkeit von der Mess- und der Aufbauvariante. Für den Abbau wurde Variante 14 gewählt. Die auffälligen Strukturen werden in diesem Fall durch die Wahl der Aufbauvariante erzeugt. Die Messreihenfolge erzeugt dagegen kaum Strukturen. Insgesamt ist das Spektrum des Lösungsraums größer als in Abbildung 3.13 (links). Dies ist erneut durch die insgesamt längere Dauer beim Aufbau gegenüber der Abbaudauer zu erklären.

Zusammenfassend wird festgestellt, dass die Wahl der Aufbau- und Abbauparadigme in diesem Beispiel deutlich mehr Einfluss auf die Gesamtdauer haben, als die Wahl der Messreihenfolge.

### Optimierung mit genetischen Algorithmen

Im Anschluss an die Auswertung aller Lösungen wurde die Effizienzoptimierung mittels GA durchgeführt (vgl. Abschnitt 3.4). GA haben gegenüber der BF-Methode (also der Auswertung aller möglichen Lösungen) den Vorteil, dass nur ein Bruchteil des Lösungsraums ausgewertet werden muss, um eine gute Lösung zu erreichen. Dieser Vorteil kommt besonders bei großen Lösungsräumen zum Tragen. Der Nachteil der GA bzw. allgemein von heuristischen Verfahren ist, dass es im Allgemeinen keine Garantie für das Erreichen der besten Lösung gibt und es auch keine Informationen darüber gibt, wie nah die erreichte Lösung an das globale Minimum heran gekommen ist. Große Lösungsräume mit mehreren lokalen Minima können allerdings aufgrund der enormen Rechenzeit nur mit heuristischen Verfahren untersucht werden.

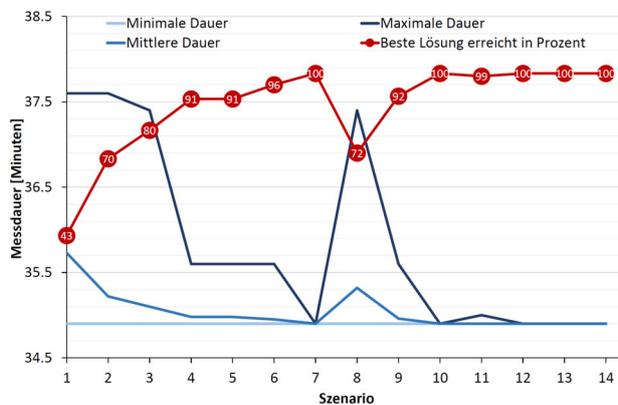
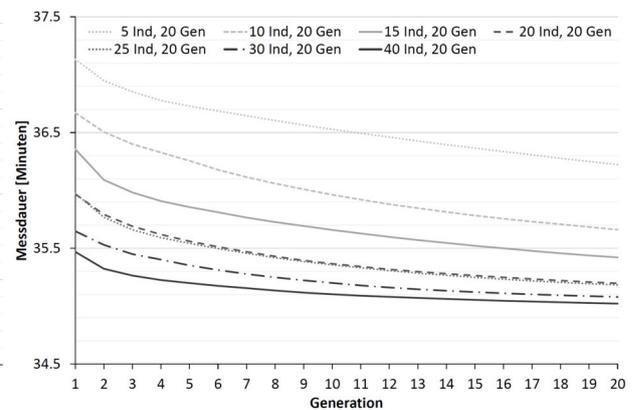
Für das gezeigte Beispiel kann die BF-Lösung mit der Lösung aus den GA verglichen werden. Die Optimierung mittels GA wurde 100-mal mit verschiedenen Werten für die Individuen- und Generationenanzahl durchgeführt. Damit soll abgeschätzt werden, wie viele Lösungen untersucht werden müssen, um die beste Lösung möglichst oft zu erreichen.

In Tabelle 3.5 und in Abbildung 3.14 wird für jedes Szenario die beste, die schlechteste und die mittlere Lösung aus 100 Iterationen angegeben. Außerdem wird gezeigt, in wie vielen Fällen die optimale Lösung bei 100 Iterationen erreicht wurde. Zusätzlich wird angegeben, nach wie vielen Generationen die jeweils beste Lösung des Durchlaufs erreicht wurde. Dabei wird ein Mittelwert der Messdauer über die 100 Iterationen gebildet. Die Rechenzeit pro Iteration gibt an, wie lang für einen Optimierungsdurchlauf mit den angegebenen Individuen und Generationen benötigt wird. Die Rechenzeit für die BF-Optimierung beträgt zum Vergleich 2 Minuten und 23 Sekunden.

Es ist zu erkennen, dass bereits bei einer Untersuchung von 3 bis 4% des Lösungsraums in mehr als 90% der Fälle die optimale Lösung gefunden wird. Je größer die Individuenanzahl ist, umso früher nähert sich die Lösung der optimalen Lösung an. Das lässt sich anhand der geringeren Offline-Performance (vgl. Abschnitt 3.4.5) in Abbildung 3.15 festmachen. Darüber hinaus wird häufiger die optimale Lösung erreicht, wenn die Generationenanzahl wächst. Mit jedem zusätzlichen Individuum und jeder zusätzlichen Generation steigt aber auch die Rechenzeit.

**Tabelle 3.5:** Tachymetrische Aufnahme: Erzielte Lösungen bei der Optimierung mittels GA bei der Durchführung von 100 Iterationen

Szenario	numI	numG	Untersuchte Lösungen	Min. Messdauer [Min]	Max. Messdauer [Min]	Mittlere Messdauer [Min]	Beste Lsg. erreicht	Mittlere Rechenzeit [Sek]
S01	5	20	100 (0.7%)	34.9	37.6	35.73	43%	2
S02	10	20	200 (1.4%)	34.9	37.6	35.22	70%	4
S03	15	20	300 (2.2%)	34.9	37.4	35.10	80%	5
S04	20	20	400 (2.9%)	34.9	35.6	34.98	91%	7
S05	25	20	500 (3.6%)	34.9	35.6	34.98	91%	9
S06	30	20	600 (4.3%)	34.9	35.6	34.95	96%	10
S07	40	20	800 (5.8%)	34.9	34.9	34.90	100%	12
S08	5	50	250 (1.8%)	34.9	37.4	35.32	72%	5
S09	10	50	500 (3.6%)	34.9	35.6	34.96	92%	9
S10	15	50	750 (5.4%)	34.9	34.9	34.90	100%	13
S11	20	50	1000 (7.2%)	34.9	35.0	34.90	99%	17
S12	25	50	1250 (9.0%)	34.9	34.9	34.90	100%	21
S13	30	50	1500 (10.9%)	34.9	34.9	34.90	100%	23
S14	40	50	2000 (14.5%)	34.9	34.9	34.90	100%	31

**Abbildung 3.14:** Tachymetrische Aufnahme: Erzielte Lösungen bei der Optimierung mittels GA bei der Durchführung von 100 Iterationen**Abbildung 3.15:** Tachymetrische Aufnahme: Offline-Performance bei unterschiedlicher Individuenanzahl mit 20 Generationen und 100 Iterationen

Bei diesem Beispiel handelt es sich um ein überschaubares Problem bei dem die Rechenzeit pro Iterationsschritt nicht sehr groß ist. Bei der Optimierung der tachymetrischen Netzmessungen, die in Kapitel 4 vorgestellt wird, ist die Auswirkung auf die Rechenzeit allerdings deutlich größer. Für jede Problemstellung ist deshalb ein Kompromiss aus Individuen- und Generationsanzahl und der Rechenzeit zu finden. In diesem Fall könnte eine Individuenanzahl von 15 bis 20 gewählt werden, bei einer Generationsanzahl zwischen 20 und 50. Daraus resultiert eine Rechenzeit zwischen 5 und 17 Sekunden. Die Dauer für die Berechnung der BF-Lösung beträgt zum Vergleich 2 Minuten und 23 Sekunden.

Durch die Anwendung der GA wird ein deutlicher Zeitvorteil bei der Berechnung der Lösung erzielt. Allerdings wird damit das Risiko in Kauf genommen, nicht unbedingt die optimale Lösung herausgefunden zu haben. Für das Beispiel der tachymetrischen Aufnahme ist eine Optimierung des Prozesses in der Regel nicht notwendig, da meist auch intuitiv eine gute Variante gefunden wird. Für komplexere Messprozesse, wie die tachymetrische Netzmessung, wird durch die verbesserte Anordnung der Tätigkeiten jedoch häufig ein erheblicher Zeitvorteil erreicht. Außerdem können die Petri-Netz-Modelle und der Prozess der Optimierung eingesetzt werden, wenn die Messprozesse

Teil eines großen Gesamtprozesses sind, wie z. B. Bauprozessen (vgl. Kochkine u. a. (2012); Rinke u. a. (2012, 2017)). Soll eine Simulation des Gesamtprozesses durchgeführt werden, müssen auch die Messprozesse modelliert und optimiert werden.

## 4 Simulation und Planung einer effizienten Netzmessung

*In diesem Kapitel wird zu Beginn erläutert, warum die tachymetrische Netzmessung eine sehr komplexe Aufgabe ist und warum es sinnvoll ist, über eine Optimierung der Abläufe nachzudenken. Anschließend wird gezeigt, wie das Simulationsmodell aufgestellt wurde und wie die Optimierung einer tachymetrischen Netzmessung durchgeführt wird. Auf die dafür benötigten Input-Objekte und Stellgrößen der genetischen Algorithmen wird ebenso eingegangen, wie auf die speziellen Lösungsansätze zur Optimierung der Standpunktreihenfolge und der Punktaufteilung und -reihenfolge.*

*Später wird die Dokumentation der Optimierungsergebnisse gezeigt, bevor das entwickelte Verfahren zur simulationsbasierten Optimierung auf drei Beispielnetze angewendet wird. In der Evaluation wird die Wahl der Stellgrößen in den genetischen Algorithmen untersucht sowie eine Empfehlung zur Einstellung dieser Stellgrößen gegeben. Schließlich folgt eine Bewertung der erzielten Ergebnisse und des Verfahrens.*

### 4.1 Problemstellung

Die tachymetrische Netzmessung gehört zu den komplexesten Aufgaben der Ingenieurgeodäsie. Soll eine Netzmessung möglichst wirtschaftlich durchgeführt werden, stellen sich bei der Planung vorab folgende Fragen (Rehr u. a., 2011):

1. Wie viele Personen setzt man für die Netzmessung ein, um schnell und/oder kostengünstig zu arbeiten?
2. In welcher Reihenfolge werden die Standpunkte am besten abgearbeitet?
3. Wer baut welche Zielpunkte in welcher Reihenfolge auf?

Großes Potenzial für eine Effizienzsteigerung bietet dabei die Optimierung der Standpunktreihenfolge und die Reihenfolge für den Auf-, Ab- und Umbau der Messpunkte. Hierbei handelt es sich um eine erweiterte Lösung des in Abschnitt 3.3.1 beschriebenen Traveling Salesman Problems.

In dem Ansatz, der in dieser Arbeit entwickelt wurde, werden die Ideen der Vorgehensweisen von Dare und Saleh (2000), Saleh und Chelouah (2004) und Staudinger (1999) aufgegriffen (s. Kapitel 1). Zum einen werden die Routen der beteiligten Personen mithilfe eines angepassten mTSP optimiert. Zum anderen werden die Kosten der einzelnen Prozessschritte einer tachymetrischen Netzmessung, ähnlich wie in Staudinger (1999) beschrieben, kalkuliert. Im Gegensatz zum Ansatz von Staudinger wird mit tachymetrischen Netzen mit einer festgelegten Netzkonfiguration gearbeitet. Das Ziel ist hier nicht die Suche der besten Netzkonfiguration, sondern eine gute Abstimmung der Abläufe untereinander und eine verbesserte Wahl der Punktfolgen und Wege, so dass *kosteneffizient* bzw. *laufzeiteffizient* gearbeitet wird. Aufgrund der Komplexität des Problems werden GA zur Lösungssuche verwendet. Mit ihnen wird zwar nicht unbedingt die beste Lösung erreicht, aber eine gute zulässige Lösung in akzeptabler Rechenzeit.

## 4.2 Entwicklung von SimPle-Net

Zur Unterstützung bei der Planung einer tachymetrischen Netzmessung wurde das Programm SimPle-Net (**S**imulation und **P**lanung effizienter **N**etzmessungen) entwickelt. Die Implementierung wurde in der Programmiersprache JAVA umgesetzt. Erste Entwicklungen des Programms fanden im Rahmen des DFG-Forschungsprojektes EQuIP (Effizienzoptimierung und Qualitätssicherung ingenieurgeodätischer Prozesse im Bauwesen) statt. Innerhalb der Projektgruppe erfolgte eine Einigung auf die Programmiersprache JAVA, da bereits einige Klassenbibliotheken des damaligen Instituts für Bauinformatik der Leibniz Universität Hannover (heute: Institut für Risiko und Zuverlässigkeit) implementiert waren und im Projekt und in SimPle-Net verwendet werden konnten. Hierzu zählt die Klassenbibliothek *bijava*, in der die Basiselemente der Graphentheorie enthalten sind. In der Klassenbibliothek *modsim.ga* wurden die Basisstrukturen der GA implementiert. In der Diplomarbeit von Rinke (2009) wurden darauf aufbauend die farbigen Petri-Netze implementiert sowie zeitliche Aspekte in Petri-Netzen berücksichtigt. In der Arbeit wurde außerdem die Parallelisierbarkeit zur Auswertung der Population in mehreren Threads auf mehreren Prozessorkernen implementiert.

Darauf aufbauend wurde ein Klassenpaket *meas* entwickelt. Hierin wurden Pakete zur Verwaltung von (Mess)punkten (*point*), Beobachtungen (*obs*), Ressourcen (*resources*), Zeitmodellen (*time*) und Wegenetzen (*roadnet*) implementiert. Außerdem wurden Klassen zur Dokumentation von geodätischen Messungen (*doc*, *plot*), zur Durchführung von Transformationen (*transform*) und zur Berechnung von einfachen Statistiken (*stats*) entwickelt.

Zur Verwaltung der tachymetrischen Netzmessung wurden das Klassenpaket *network* erstellt. Es besteht aus den Paketen zur Modellierung und Optimierung der Netzmessung (*cpn*), Ein- und Ausgaberoutinen für tachymetrische Netzmessungen (*io*), zur Lageausgleichung tachymetrischer Netze (*adjust*) und zur Verarbeitung von GPS-Tracks (*gpstrack*).

Im dem Klassenpaket *simplenet* wurde die grafische Benutzeroberfläche (*gui*) implementiert. *main* beinhaltet die ausführbaren Dateien des Programms.

Im Folgenden wird die in SimPle-Net implementierte Modellierung und Simulation der tachymetrischen Netzmessung mittels eines farbigen Petri-Netzes erläutert. Anschließend wird auf die simulationsbasierte Optimierung der Abläufe mit GA eingegangen. Die hierfür benötigten Input-Objekte sowie die Dokumentation der Ergebnisse werden detailliert beschrieben. In Abschnitt 4.6 werden die erzielten Ergebnisse umfangreicher Parameterstudien vorgestellt.

Das Graphical User Interface (GUI) des entwickelten Programms SimPle-Net wird im Anhang in Abschnitt A.1 gezeigt. Der Datenimport erfolgt über eine XML-Datei (XML: Extensible Markup Language). Ein Beispiel für den Aufbau der XML-Datei wird in Abbildung A.7 gezeigt. In den Tabellen in Abschnitt A.2 werden die XML-Schemata für das Netz *Wilhelm Busch Museum* gezeigt, welches mehrfach als Beispiel in dieser Arbeit dient.

## 4.3 Modellierung und Simulation der Netzmessung

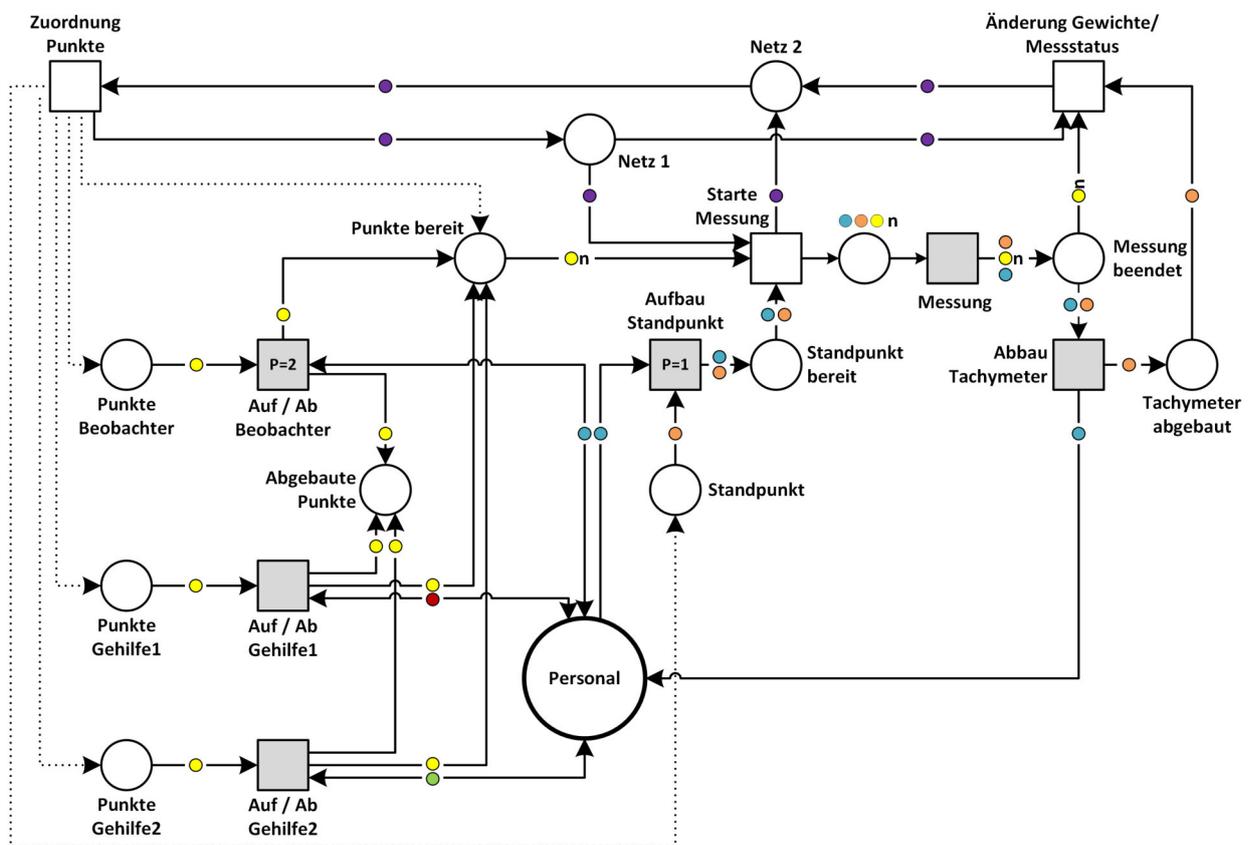
### 4.3.1 Petri-Netz der Netzmessung

Die tachymetrische Netzmessung wurde als farbiges Petri-Netz modelliert. Die Verwendung farbiger Marken bietet den Vorteil, dass den Marken verschiedene Eigenschaften zugeordnet werden können, die durch das Netz von Transition zu Transition transportiert werden. In Abbildung 4.1 ist der modellierte Ablauf der Messung dargestellt.

Im Zentrum des Modells ist die Stelle *Personal* zu finden. Hierin werden alle verfügbaren Personen abgespeichert. Jede Person wird dabei als eine Marke mit ihren spezifischen Eigenschaften

wie Name, Position, Fortbewegungsmittel oder Stundenlohn abgespeichert. Der Beobachter wird als blaue Marke, der Gehilfe1 als rote Marke und der Gehilfe2 (falls vorhanden) als grüne Marke abgespeichert. Ihnen werden während der Netzmessung unterschiedliche Aufgaben zugewiesen. Die Modellierung sieht genau einen Beobachter sowie einen oder zwei Gehilfen vor. Von der Stelle *Personal* führen Pfeile zu den Transitionen *Auf/Ab Beobachter*, *Auf/Ab Gehilfe1*, *Auf/Ab Gehilfe2* und *Aufbau Standpunkt*.

In der Transition *Auf/Ab Person<sub>i</sub>* ( $Person_i = \text{Beobachter, Gehilfe1, Gehilfe2}$ ) werden nach und nach alle Punkte auf- bzw. abgebaut, die auf der Stelle *Punkte Person<sub>i</sub>* liegen. Die Punkte werden als gelbe Marken definiert. Hierin sind die spezifischen Eigenschaften der Punkte abgespeichert, wie Punktnummer, Koordinaten, Art der Vermarkung, Zustand des Aufbaus oder Ausrichtung des Punktes. Der Transition *Auf/Ab Beobachter* wurde eine Priorität ( $P = 2$ ) zugeordnet. Hiermit wird ein möglicher Wettbewerbskonflikt zwischen dieser Transition und der Transition *Aufbau Standpunkt* ( $P = 1$ ) gelöst, die beide die Beobachter-Marke von der Stelle *Personal* beziehen wollen. Es



#### Legende

- Zeitabhängige Transition
- Zeitunabhängige Transition ( $\tau=0$ )
- P=2 Priorität der Transition bei einem Wettbewerbskonflikt
- Gehilfe1 (Name, Position, Fortbewegungsmittel, Stundenlohn)
- Gehilfe2 (Name, Position, Fortbewegungsmittel, Stundenlohn)
- Beobachter (Name, Position, Fortbewegungsmittel, Stundenlohn)
- Punkt (Punktnummer, Punktart, Koordinaten, Art der Vermarkung, Zustand des Aufbaus, Ausrichtung)
- Standpunkt (Punktnummer, Koordinaten, Art der Vermarkung, Zustand des Aufbaus, Ausrichtung)
- Netzinfo (Art der Messung, Status der Messung, Reihenfolge der Standpunkte, zugehörige Zielpunkte, Wegenetz, verfügbares Personal)

Abbildung 4.1: Farbiges Petri-Netz der tachymetrischen Netzmessung

wird festgelegt, dass die Transition mit der höchsten Priorität als erstes schaltet. Der Aufbau der Zielpunkte ist zunächst wichtiger als der Aufbau des Standpunktes und erhält deshalb die höhere Priorität.

Alle Punkte, die aufgebaut und zum richtigen Ziel ausgerichtet wurden, werden auf der Stelle *Punkte bereit* abgespeichert, was über den Pfeil von *Auf/Ab Person<sub>i</sub>* zu *Punkte bereit* symbolisiert wird. Alle Punkte, die abgebaut wurden, werden auf der Stelle *Abgebaute Punkte* gespeichert. Die Regelung, ob eine Punkt-Marke auf der Stelle *Punkte bereit* oder *Abgebaute Punkte* abgelegt wird, erfolgt über eine Abfrage des Punktstatus. Punkte, die abzubauen sind, erhalten den Punktstatus 2, während noch nicht aufgebaute Punkte den Status 0 und bereits aufgebaute Punkte, die umzubauen bzw. zu drehen sind, den Status 1 besitzen. Außerdem existiert ein Pfeil von *Auf/Ab Person<sub>i</sub>* zu *Personal*, so dass sich die Person, die mit dem Aufbau fertig ist, wieder auf der Stelle *Personal* befindet und weitere Aufgaben erledigen kann.

In der Transition *Aufbau Standpunkt* wird der aktuelle Standpunkt aufgebaut. Welcher Standpunkt aufzubauen ist, wird über die Marke auf der Stelle *Standpunkt* geregelt. Zusätzlich zum Markentyp Punkt wurde ein Markentyp Standpunkt definiert, der dieselben Eigenschaften wie Punkt besitzt. Über die Kante zwischen *Personal* und *Aufbau Standpunkt* können nur Marken vom Typ Beobachter fließen. Nach Beendigung des Aufbaus fließt die Standpunktmarke zur Stelle *Standpunkt bereit*. Die Beobachter-Marke wird nach dem Ende des Aufbaus nicht wieder auf die Stelle *Personal* gelegt. Sie wird auch auf der Stelle *Standpunkt bereit* abgelegt und die Transition *Starte Messung* schaltet dann direkt, wenn alle Zielpunkte aufgebaut sind und auf der Stelle *Punkte bereit* liegen.

Über das Kantengewicht ( $n$  gelbe Marken) zwischen *Punkte bereit* und *Starte Messung* wird geregelt, dass erst  $n$  Punkte auf der Stelle *Punkte bereit* liegen müssen, bevor die Transition *Starte Messung* schalten kann. Der Wert für  $n$  variiert von Standpunkt zu Standpunkt und muss für jeden Standpunkt angepasst werden.

Diese Anpassung der Kantengewichte erfolgt beim Schalten der zeitunabhängigen Transition *Änderung Gewichte/Messstatus*. Diese Transition hat mit dem Messablauf selbst nichts zu tun, ist aber für den wiederholten Durchlauf der Marken durch das Petri-Netz notwendig.

Die Transition *Zuordnung Punkte* gehört ebenfalls in die Kategorie der zeitunabhängigen Transitionen. In dieser Transition werden die entsprechenden Marken auf die Stellen *Zielpunkte*, *Standpunkt* und *Punkte Abbau* verteilt. Außerdem wird ermittelt, welche Punkte, die für den nächsten Standpunkt benötigt werden, bereits aufgebaut und richtig ausgerichtet sind. Die Marken dieser Punkte werden direkt auf der Stelle *Punkte bereit* abgelegt.

Zum Transport der Informationen bezüglich des Messgebiets und des Messablaufs durch das Petri-Netz, wurde der Markentyp Info eingeführt (lila). In dem Markentyp Info werden der Status der Messung, die Reihenfolge der Standpunkte, die dazugehörigen Zielpunkte, das Wegenetz und die verfügbaren Personen abgespeichert. Außerdem werden alle Punkte des Netzes mit ihrem aktuellen Status darin verwaltet. Sie werden nach der Messung von der Transition *Änderung Gewichte/Messstatus* aufgenommen und von der Transition *Zuordnung Punkte* zurück ins Netz gespeist.

Die zeitunabhängige Transition *Starte Messung* wird benötigt, um den Status der Messung auf „aktiv“ zu setzen. Dadurch wird verhindert, dass die aktuell verwendeten Punkte abgebaut oder gedreht werden. Außerdem wird eine Marke vom Typ Info auf der Stelle *Netz 2* abgelegt. Daraufhin kann die Transition *Zuordnung Punkte* schalten und ermitteln, welche Punkte für den nächsten Standpunkt schon aufgebaut bzw. gedreht werden können und welche Punkte bereits abgebaut werden können, weil sie nicht mehr benötigt werden.

Parallel dazu schaltet die Transition *Messung*. Nach Beendigung der Messung werden die Marken des Beobachters, des Standpunktes und der  $n$  Punkte auf der Stelle *Messung beendet* abgelegt. Die

Punktmarken wandern beim Schalten der Transition *Änderung Gewichte/Messstatus* zurück in die Punktliste der Marke Info. Außerdem wird der Status der Messung auf „nicht aktiv“ gesetzt, so dass jetzt alle an der Messung beteiligten Punkte gedreht oder abgebaut werden dürften. Im nächsten Schritt erfolgt die *Zuordnung der Punkte* für den nächsten Standpunkt auf die Stellen *Zielpunkte*, *Standpunkt*, *Punkte bereit* und *Punkte Abbau*.

Die Beobachter- und die Standpunktmarke auf der Stelle *Messung beendet* aktivieren die Transition *Abbau Tachymeter*. Beim Schalten dieser Transition baut der Beobachter das Instrument ab, setzt einen Reflektor auf den Punkt und richtet ihn zum nächsten Standpunkt aus, von dem aus der Punkt als nächstes angezielt wird. Dabei muss es sich nicht unbedingt um den direkt nachfolgenden Standpunkt handeln. Falls der Punkt für keine weiteren Messungen mehr benötigt wird, baut der Beobachter den Punkt ab. Am Ende des Schaltvorgangs wandert die Beobachtermarke auf die Stelle *Personal* und die Standpunktmarke wird auf der Stelle *Tachymeter abgebaut* abgelegt. Diese Marke wird beim nächsten Schalten der Transition *Änderung Gewichte/Messstatus* wieder in die Punktliste des Markentyps Info aufgenommen.

Die Transition *Abbau Punkt* wird aufgrund der geringen Priorität nur ausgeführt, wenn die Transitionen *Aufbau Zielpunkt* oder *Aufbau Standpunkt* nicht schaltfähig sind. Wenn keine anderen Aufgaben zu erledigen sind, werden zwischendurch Punkte abgebaut, falls auf der Stelle *Abbau Punkt* schon Marken liegen. Ansonsten wird diese Transition erst am Ende der Messung ausgeführt.

**Tabelle 4.1:** Laufzeitmodell zur tachymetrischen Netzmessung

Modul	Transition	Tätigkeit	$\tau$ [Sek.]	Verteilung	$\omega$ [Sek.]
Tachymetrische Netzmessung	Aufbau Anschlusspunkt	Weg	var.	deterministisch	
		Punkt freilegen	180	Abgeschn. NV	60
		Equipment aufbauen	60	Abgeschn. NV	20
		Horizontieren	30	Abgeschn. NV	10
		Zentrieren	90	Abgeschn. NV	40
		Höhe messen	60	Abgeschn. NV	30
		Reflektor ausrichten	10	deterministisch	
	Abbau Anschlusspunkt / Tachymeter	Weg	var.	deterministisch	
		Equipment abbauen	120	Abgeschn. NV	30
		Punkt verdecken	30	Abgeschn. NV	10
	Aufbau Standpunkt	Weg	var.	deterministisch	
		Punkt freilegen	180	Abgeschn. NV	60
		Equipment aufbauen	60	Abgeschn. NV	20
		Horizontieren	30	Abgeschn. NV	10
		Zentrieren	90	Abgeschn. NV	40
		Höhe messen	60	Abgeschn. NV	30
		Messinstrument vorbereiten	240	Abgeschn. NV	120
	Messung	Eingabe Punktdaten	10	deterministisch	
		Punkt einstellen (von Hand)	50	Abgeschn. NV	20
		Punkt einstellen (automatisch)	5	deterministisch	
Richtungs- und Streckenmessung		10	deterministisch		

### 4.3.2 Simulation der Netzmessung

Die Simulation eines Lösungsvorschlags zur Messung des Netzes wird mittels Markendurchlauf durch das Petri-Netz realisiert. In dem Markentyp Info werden die Reihenfolge der Standpunkte, die dazugehörigen Zielpunkte, das Wegenetz und die verfügbaren Personen des Lösungsvorschlags abgespeichert. Die verfügbaren Personen werden als farbige Marken mit ihren Eigenschaften auf

der Stelle *Personal* abgelegt. Die erste Transition, die schalten muss, ist die Transition *Änderung Gewichte/Messstatus*. Darin werden die Kantengewichte des Petri-Netzes für den ersten Standpunkt festgelegt. Damit die Transition schalten kann, müssen Marken auf den Stellen *Messung beendet*, *Tachymeter abgebaut* und *Netz 1* liegen. Auf der Stelle *Netz 1* wird eine Marke vom Typ Info abgelegt. Auf der Stelle *Messung beendet* wird eine Marke vom Typ Punkt und auf der Stelle *Tachymeter abgebaut* werden zwei Marken vom Typ Standpunkt als Anfangsmarkierung abgelegt. Diese zu Beginn benötigten Punkt-Marken haben Dummy-Eigenschaften, während die Info-Marke schon über die Informationen des Lösungsvorschlags verfügt.

Als Laufzeitmodell für die Optimierung der Netzmessung wird ein Modell mit deterministischen Zeiten für die einzelnen Tätigkeiten verwendet (s. Tabelle 4.1). Die Zeit, die beim Schalten einer Transition vergeht, ist davon abhängig, welche einzelnen Schritte während der Ausführung der Transition durchgeführt werden (s. Abschnitt 2.4.2.3). Im Anschluss an die Optimierung kann die zeitliche Variation dieser Variante unter Verwendung der Verteilungsfunktionen berechnet werden. So wie es in Abschnitt 2.4.4 in Abbildung 2.25 gezeigt wurde.

Das Petri-Netz ist so lange lebendig (schaltfähig), bis keine Standpunkte mehr zu messen sind und alle Punkte abgebaut wurden. Danach ist keine der Transitionen mehr schaltfähig. Als Ergebnis der Simulation wird der zeitliche Ablauf der Messung unter anderem in einem Ablauf-Diagramm dargestellt, in dem zu erkennen ist, wann welche Person welche Tätigkeit durchführt und wann Wartezeiten für die Person entstehen. Außerdem werden die Gesamtdauer des Prozesses, die zurückgelegte Entfernung aller Personen und die Gesamtkosten ausgegeben. Weitere Informationen zur Dokumentation der Simulationsergebnisse folgen in Abschnitt 4.5.

## 4.4 Optimierung der Netzmessung

Bei der Optimierung der Netzmessung handelt es sich um ein erweitertes Traveling Salesman Problem (TSP). Wird die Optimierung der Standpunktreihenfolge für sich betrachtet, hätte man es mit einem klassischen TSP zu tun (i.d.R. allerdings ohne Rückkehr zum Ausgangspunkt). Hierbei wäre nur die kürzeste Entfernung zwischen den Standpunkten von Interesse. Bei der Netzmessung ist jedoch auch die Dauer, die für den Aufbau, den Umbau, die Messung und den Abbau benötigt wird, von Bedeutung. Diese Tätigkeiten sollen so gut aufeinander abgestimmt sein, dass möglichst wenig Wartezeiten zwischen den einzelnen Tätigkeiten entstehen. Um dieses Problem zu lösen, werden verschiedene Lösungen mithilfe des Petri-Netzes in Abbildung 4.1 simuliert. Da der Lösungsraum schnell so groß wird, dass keine BF-Lösung mehr berechnet werden kann, wird die Netzmessung mit GA (vgl. Abschnitt 3.4) optimiert. Die Variablen der Optimierung sind in diesem Fall die Standpunktreihenfolge, die Anzahl der Personen (2 oder 3) und die Aufteilung und Reihenfolge des Aufbaus, Umbaus und Abbaus der Zielpunkte.

### 4.4.1 Input-Objekte

Für die Optimierung der Netzmessung mit GA sind eine Reihe von Stellgrößen und Personalattributen einzustellen. Außerdem müssen das Beobachtungsnetz und das Wegenetz festgelegt werden. Das Beobachtungsnetz besteht aus Messpunkten und Beobachtungen. Das Wegenetz besteht aus Punkten (Wegepunkte oder Messpunkte) und Wegekanten.

Die Eingaben können über die grafische Benutzeroberfläche (GUI) in SimPle-Net (s. Abbildung 4.2) oder über eine XML-Datei erfolgen. Bei einer Festlegung der Eingabewerte im GUI ist eine anschließende Speicherung in einer XML-Datei möglich. Ein Beispiel für den Aufbau der XML-Datei wird in Abbildung A.7 gezeigt. Die Tabellen in Abschnitt A.2 zeigen die XML-Schemata für das Netz *Wilhelm Busch Museum*.

## Stellgrößen in den genetischen Algorithmen

Abbildung 4.2 (links) zeigt, welche Stellgrößen für die Netzoptimierung mit GA einstellbar sind. Zunächst ist das Optimierungsziel festzulegen. Hier können entweder die *Dauer* oder die *Kosten* gewählt werden. Die Individuenanzahl *numI* und Generationenanzahl *numG* sind frei wählbar. Die *Mutations-* und die *Crossoverwahrscheinlichkeit* liegen zwischen 0 und 1. Als Selektionsverfahren kann zwischen der *Turnierselektion*, der *Rouletteselektion* und der *rangbasierten Selektion* gewählt werden. Je nach Auswahl kann noch eine *Selektionsfunktion* und ein *Selektionsparameter* gewählt werden. Wird zum Beispiel die Turnierselektion gewählt, kann über den Selektionsparameter die Turniergröße *n* festgelegt werden. Wird eine 0 eingegeben, berechnet sich die Turniergröße proportional zur Anzahl der Individuen:  $n = \lfloor \text{numI}/10 \rfloor$ , wobei  $n \geq 2$  sein soll. Bei der rangbasierten Selektion wird über die Selektionsfunktion festgelegt, ob mit einer linearen Funktion, der Abschneideselektion oder dem Verfahren Greedy Overselection selektiert wird. Für die Abschneideselektion oder Greedy Overselection wird über den Selektionsparameter der Schwellwert (Bsp. 70 = 70%) für die Selektion festgelegt. Für die lineare Funktion ist kein Selektionsparameter einzustellen.

Der Nutzer kann außerdem einstellen, ob der Beobachter zusätzlich zu seinen Standpunkten auch Anschlusspunkte aufbauen und drehen soll. Wird hier *false* gewählt, beteiligt er sich nicht am Aufbau. Auf den Abbau hat diese Einstellung keinen Einfluss. Hieran beteiligt sich der Beobachter immer. Bei der Einstellmöglichkeit *Vorsortierung der Standpunkte* kann der Nutzer festlegen, ob die Reihenfolge der Standpunkte mit einem klassischen TSP vorsortiert werden sollen. Hier gibt es die Auswahl zwischen *a) kein Individuum vorsortieren (PRESORT = 0 in XML-Datei)*, *b) ein Individuum vorsortieren (1)*, *c) ein Individuum vorsortieren, Rest mutieren (2)* und *d) alle Individuen vorsortieren (3)*. Die Einstellung hat Einfluss auf die Vielfalt der Anfangspopulation. In Abschnitt 4.6 wird die Auswirkung der Einstellmöglichkeiten auf die Güte der Lösung untersucht.

Über den Parameter *Tag unterbrechen nach x Stunden* kann festgelegt werden, nach wie vielen Stunden der Tag unterbrochen werden soll. Die Messung wird dann am nächsten Tag mit den noch fehlenden Standpunkten fortgesetzt. In der Optimierung wird dann berücksichtigt, dass am Ende des Arbeitstages alle Punkte abgebaut werden und zu Beginn des nächsten Tages alle dann benötigten Punkte aufgebaut werden. Wenn für den Tag z. B. 8 Arbeitsstunden erlaubt sein sollen, sollte je nach Netzgröße noch etwas Zeitpuffer für den Abbau eingeplant werden. Daher ist bei diesem Parameter eher ein Wert von 6.5 oder 7 Stunden einzustellen.

## Personen und Fahrzeuge

Als Personalattribute (s. Abbildung 4.2 (2. von links) und Abbildung A.7) können ein Beobachter und zwei Gehilfen ausgewählt werden. Für jede Person wird der *Stundenlohn* festgelegt sowie das *Fortbewegungsmittel*. Hier sind die Auswahlmöglichkeiten *zu Fuß*, *Fahrrad* oder *Auto* gegeben. Für ein Auto sind die *Kosten pro km* anzugeben. Voreingestellt sind hier 0.30 Euro/km.

Über das Attribut *# Personal* kann festgelegt werden, ob auch die Anzahl der Personen in die Optimierung mit einbezogen werden soll. Wird die Option 2 – 2 gewählt, wird jedes Individuum mit dem Zusatzattribut 2 erzeugt. Die Anzahl der Personen wird dann nicht optimiert. Wird die Option 2 – 3 gewählt, werden Individuen mit dem Zusatzattribut 2 oder 3 erzeugt. Im Laufe des Optimierungsprozesses pflanzen sich die Individuen mit den besseren Fitnesswerten fort. Wenn das Individuum, das am Ende der Optimierung den besten Fitnesswert aufweist, als Zusatzattribut die 2 hat, sollte die Messung mit zwei Personen (einem Beobachter und einem Gehilfen) durchgeführt werden. Besitzt es die 3, sollte die Messung mit einem Beobachter und zwei Gehilfen durchgeführt werden, damit sie möglichst effizient ist.

The image shows a screenshot of the SimPle-Net GUI with four main panels:

- Stellgrößen:** Includes sliders for 'Optimierungsziel' (Dauer), '# Individuen' (24), '# Generationen' (100), 'Mutationsrate' (1), and 'Crossoverrate' (0,6). It also has dropdowns for 'Selektionsverfahren' (Turnierselektion), 'Selektionsfunktion' (Abschneideselektion), 'Selektionsparameter' (5), 'Beobachter baut Zielpunkte auf/um' (false), 'Vorsortierung der Standpunkte' (alle Individuen vorsortieren), 'Tag unterbrechen nach' (6,5 h), and 'Iterationen' (1).
- Personal:** Features checkboxes for 'Beobachter' and 'Gehilfe 1' (checked), and a checkbox for 'Gehilfe 2'. It includes input fields for 'Stundenlohn' (60 €/h, 30 €/h, 30 €/h) and 'km-Kosten' (0 €/km, 0 €/km, 0,3 €/km) for each role. A dropdown for 'zu Fuss' is present. At the bottom, '# Personal' is set to 2.
- Punkt zeichnen:** Contains dropdowns for 'Punktart' (Messpunkt) and 'Punktinfo' (Datumspunkt). It has input fields for 'Punktnummer' (P8), 'Höhe [m]' (50), 'Aufbauart' (Stativ (Punkt tief)), and 'Öffnungswinkel [gon]' (15). It also includes sliders for 'sX [m]', 'sY [m]', and 'sZ [m]' (all set to 0).
- Kante zeichnen:** Includes a dropdown for 'Beobachtung', a checked checkbox for 'ungerichtet', and input fields for 'Mittlere Geschwindigkeit' (5 km/h), 'Streckenmessgenauigkeit' (1 mm + 1 ppm), and 'Winkelmessgenauigkeit' (0,3 mgon).

**Abbildung 4.2:** Einstellbare Parameter und Attribute in SimPle-Net  
Zusammenstellung der Optionenbereiche des GUI (vgl. Abbildung 4.3), je nach Wahl der Steuerelemente in der Werkzeugleiste

## Beobachtungsnetz

Das Beobachtungsnetz, bestehend aus Messpunkten und Beobachtungen, kann über die XML-Datei eingegeben werden oder über die grafische Benutzeroberfläche in SimPle-Net (s. Abbildung 4.3) erzeugt oder verändert werden. Zur Orientierung können verschiedene Kartenhintergründe oder ein Luftbild gewählt werden.

Die Attribute eines Messpunktes sind die *Punktnummer*, eine *PunktID* und die Koordinaten  $X$ ,  $Y$  und  $Z$  in Metern (s. Tabelle A.2 in Anhang A). Die PunktID wird bei Verwendung des GUI automatisch ermittelt. Die  $X$ - und die  $Y$ -Koordinate werden über die geklickte Position im Bild berechnet. Außerdem wird eine *Aufbauart* angegeben, die für die Berechnung der Aufbauzeit wichtig ist (vgl. Abschnitt 2.4.2.3). Es kann zwischen den Aufbauarten *Pfeiler* (in XML-Datei *ZW* für *Zwangszentrierung*), *Konsole* (*ZW*), *Stativ* (*ST*), *Stativ (Punkt tief)* (*STU*) und *Basis* (*BAS*) gewählt werden. Die Aufbauart *Basis* kennzeichnet keinen Messpunkt, sondern die Basis, von der aus die Messung gestartet wird. Wird keine Basis festgelegt, legt der Algorithmus fest, von wo aus die Messung gestartet wird.

Über den *Öffnungswinkel* wird eingestellt, welchen Öffnungswinkel das verwendete Prisma hat. Für ein Rundprisma wird hier beispielsweise 15 gon und für ein 360°-Prisma 400 gon eingestellt. In Horst und von Gösseln (2013) wurde die Auswirkung der Nutzung eines automatisch rotierenden Prismas auf die Ergebnisse der Optimierung getestet. Wird ein solche Prisma verwendet, kann für den Öffnungswinkel 400 gon eingestellt werden, da dann keine Person zum Drehen des Prismas benötigt wird. Das ist insbesondere für schwer erreichbare Punkte mit langer Anfahrt von Vorteil. Sie müssen dann lediglich auf- und abgebaut werden.

Für den Fall, dass eine Prognoseausgleichung durchgeführt werden soll, sind noch Attribute für die Ausgleichung anzugeben. Es kann eingestellt werden, ob es sich bei dem Punkt um einen *Neupunkt* (*NPT*), einen *Datumspunkt* (*DPT*), einen *stochastischen Festpunkt* (*FPS*) oder einen *Festpunkt* (*FPA*) handelt. Für stochastische Festpunkte können die Standardabweichungen der Koordinaten  $sX$ ,  $sY$ , und  $sZ$  in Metern angegeben werden.

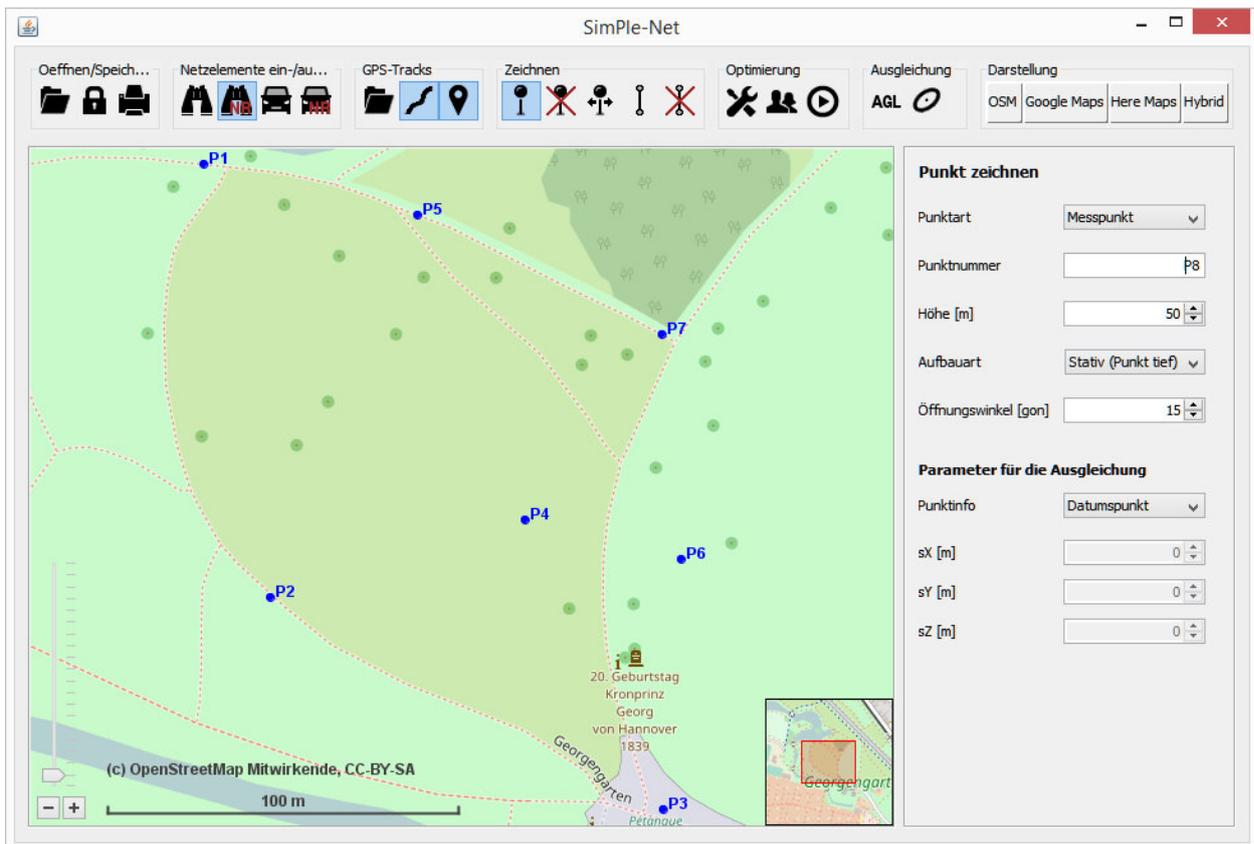


Abbildung 4.3: SimPle-Net GUI mit den Attributen eines Messpunktes

Die Attribute einer tachymetrischen Beobachtung sind die Information, von welchem zu welchem Punkt die Beobachtung getätigt wird (s. Tabelle A.3). Im GUI wird dafür eine Linie zwischen den beiden Punkten gezogen. Vorher kann ausgewählt werden, ob die Beobachtung *ungerichtet* ist, d. h. in beide Richtungen durchgeführt wird oder ob sie einseitig beobachtet wird. Für den Fall, dass eine Prognoseausgleichung durchgeführt werden soll, sind die Attribute für die Ausgleichung anzugeben. Hierfür sind die *Strecken-* und die *Winkelmessgenauigkeiten* als Standardabweichungen des verwendeten Messinstruments anzugeben (*DIST\_ERROR* in mm, *DIST\_PPM* in ppm und *DIRECTION\_ERROR* in mgon).

## Wegenetz

Ein Wegenetz besteht aus Punkten und Wegekanten. Bei den Punkten handelt es sich um Messpunkte oder um Wegepunkte. Die Eingabe der Daten kann über die XML-Datei oder über das GUI erfolgen. Ein Wegepunkt (s. Tabelle A.1) besitzt die Attribute *Punktnummer*, *X-*, *Y-* und *Z-* Koordinate. Erfolgt die Eingabe der Wegepunkte über das GUI, wird im Einstellfenster *Punkt zeichnen* (s. Abbildung A.3) bei der *Punktart* ein *Wegepunkt* ausgewählt. Anschließend wird die Punktnummer eingegeben und die Höhe des Punktes (*Z*) eingestellt. Über das Klicken des Punktes im Bild werden die *X-* und die *Y-*Koordinate des Punktes festgelegt.

Die Wegekante (s. Tabelle A.4) besitzt die Attribute von welchem zu welchem Punkt die Wegekante führt. Außerdem wird noch die *Dauer* für das Zurücklegen der Strecke, die *Streckenlänge* und die *mittlere Geschwindigkeit*, mit der die Strecke zurückgelegt wird, angegeben. Erfolgt die Eingabe über das GUI (s. Abbildung A.4) wird im Einstellfenster *Kante zeichnen* die *Wegekante* ausgewählt. Auch hier kann gewählt werden, ob es sich um eine gerichtete oder ungerichtete Kante handelt. Für die Kante wird dann die mittlere Geschwindigkeit angegeben. Die Streckenlänge und die Dauer für das Zurücklegen der Strecke lassen sich aus den Punktkoordinaten und der mittleren Geschwindigkeit berechnen.

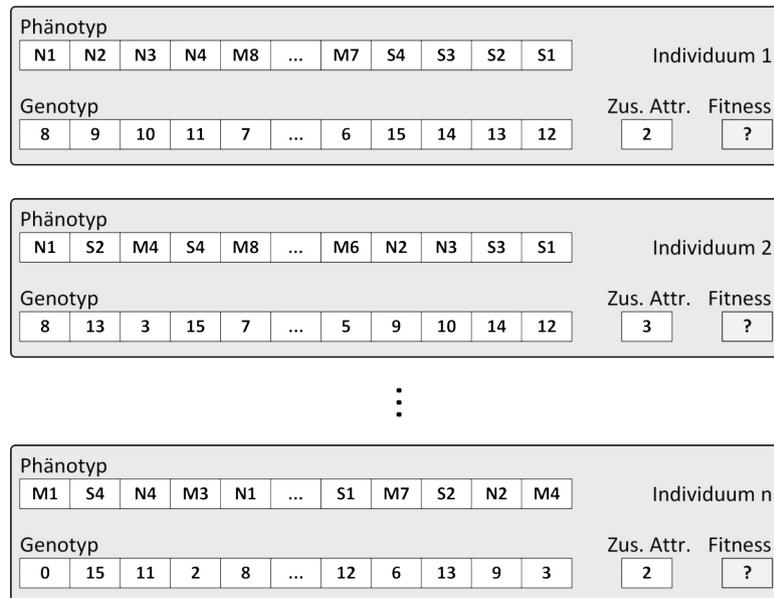


Abbildung 4.4: Individuen zur Optimierung der Standpunktreihenfolge und der Personenzahl

#### 4.4.2 Optimierung der Standpunktreihenfolge

Zu Beginn der Effizienzoptimierung mit GA wird eine Population erzeugt, die Individuen mit verschiedenen Standpunktreihenfolgen und, falls gewünscht, einer zufällig erzeugten Anzahl von Personen (2 oder 3) zur Durchführung der Netzmessung besitzt (s. Abbildung 4.4). Die Personenanzahl wird als zusätzliches Attribut eingeführt.

Die Standpunktreihenfolge kann zufällig erzeugt werden oder über die Lösung eines klassischen TSP (ohne Rückkehr zum Ausgangspunkt) vorsortiert werden, um die Anzahl der Individuen und die Anzahl der Generationen der nachfolgenden Optimierung möglichst gering zu halten. Diese Vorgehensweise bietet sich besonders bei sehr großen Netzen an, da ohne eine Vorsortierung viele Lösungen berechnet werden, die völlig abwegig sind und dadurch unnötig Rechenzeit beanspruchen. Die so gefundenen Lösungen bilden die Basis für die Standpunktreihenfolge. Ihre permutationscodierten Genotypen werden für die Erzeugung der Individuen (inkl. Anzahl der Personen) nach Abbildung 4.4 verwendet. Die Punktnummern im Phänotyp des Individuums stammen aus dem Beispielnetz Elbinsel (s. Abbildung 4.12). Jeder Messpunkt besitzt eine eindeutige ID, die den Punkt im Genotypen des Individuums repräsentiert.

Die so erzeugten Individuen stellen die initiale Population dar. Mit ihnen wird die Optimierung für die Planung der tachymetrischen Netzmessung durchgeführt. Innerhalb der Optimierung wird für jedes Individuum der Population ein Fitnesswert berechnet. Die Berechnung der Fitness erfolgt über die Petri-Netz-Simulation nach Abbildung 4.1.

#### 4.4.3 Optimierung der Punktaufteilung und -reihenfolge

Nach der Auswahl des aktuellen Standpunktes aus der Liste der Standpunkte (z. B. M5 in Abbildung 4.5), werden die Zielpunkte dieses Standpunktes den Personen zum Aufbauen bzw. Umbau zugeordnet.

##### Punktaufteilung

Die Punktaufteilung erfolgt entweder mit GA oder BF. Bei einer Person erübrigt sich die Aufteilung. Für die Entscheidung, ob die BF-Variante oder die GA-Variante gewählt wird, wurde ein Schwellwert festgelegt. Dieser Schwellwert hängt von der Anzahl der BF-Lösungsmöglichkeiten  $l_{BF}$

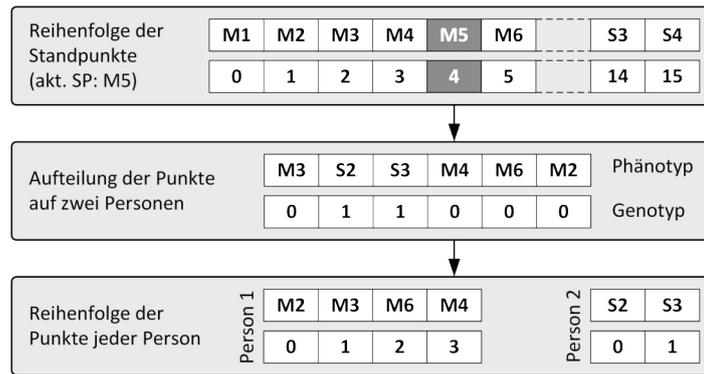


Abbildung 4.5: Punktaufteilung und -reihenfolge

und damit von der Anzahl der Personen  $s$  und der Anzahl der aufzuteilenden Punkte  $n$  ab. Falls die Aufteilung mit GA erfolgt, wird nur ein Teil des Lösungsraums berechnet. Die Anzahl der dann auszuwertenden Lösungen  $l_{GA}$  hängt von der Komplexität des Problems ab. Je mehr Punkte auf verschiedene Personen verteilt werden müssen, umso höher ist die Komplexität. Um dies zu berücksichtigen wurde die Individuenanzahl  $numI$  und die Generationenanzahl  $numG$  bei der Optimierung der Punktaufteilung an die Anzahl der Personen und die Anzahl der Punkte gekoppelt:

$$l_{BF} = s^n \tag{4.1}$$

$$l_{GA} = numI \cdot numG = 2sn \cdot sn = 2 \cdot n^2 \cdot s^2$$

In Abbildung 4.6 werden die zu berechnenden Lösungen für  $l_{BF}$  und  $l_{GA}$  nach Gleichung 4.1 in Abhängigkeit der Punktanzahl und der Personenanzahl dargestellt. In der Abbildung sind die Schnittpunkte der hellen (GA) und der dunklen (BF) Kurven zu erkennen. Für zwei Personen ( $s = 2$ ) schneiden sich die BF-Kurve und die GA-Kurve bei  $n = 9.49$ . Daraus ergibt sich, dass für  $n < 10$  mit der BF-Variante weniger Lösungen ausgewertet werden müssen als mit der GA-Variante. Erst bei  $n \geq 10$  ist die Berechnung der BF-Variante aufwändiger, da die Anzahl der möglichen Lösungen stark ansteigt. In diesem Fall wird die Aufteilung der Punkte mit der GA-Variante realisiert.

Für die Punktaufteilung auf drei Personen ( $s = 3$ ) schneiden sich die Kurven bereits bei  $n = 5.85$ , daher wird bei  $n < 6$  die BF-Variante und für  $n \geq 6$  die GA-Variante gewählt.

Der Genotyp wird Integer-codiert und kann die Werte (0, 1, 2) annehmen (vgl. Abbildung 4.5 - Mitte). 0 steht für Person 1, 1 für Person 2 und 2 für Person 3. Über die Werte im Genotyp wird geregelt, welche Punkte welcher Person zugeordnet werden. Dabei kann es vorkommen, dass eine

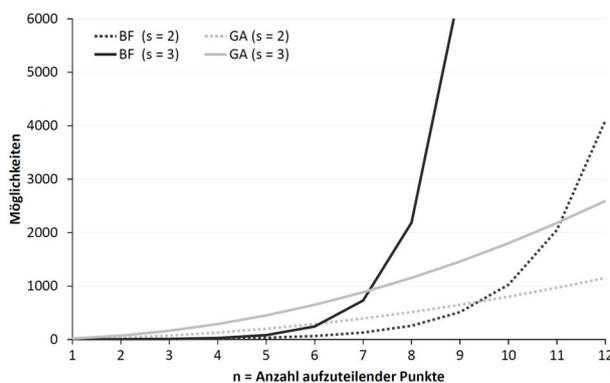


Abbildung 4.6: Punktaufteilung

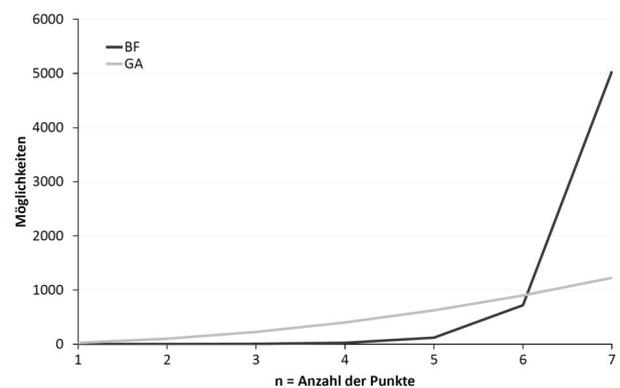


Abbildung 4.7: Punktreihenfolge

Person sehr viele oder sogar alle Punkte zugeordnet bekommt. Das kann der Fall sein, wenn sich alle Punkte in der Nähe der Person befinden und sehr dicht beieinander liegen. Die andere Person baut dann nur wenige oder gar keine Punkte auf.

### Punktreihenfolge

Die Punkte, die einer Person zugeordnet werden, sollen in einer effizienten Reihenfolge angeordnet werden. Bei dieser Anordnung handelt es sich wieder um ein klassisches TSP (ohne Rundreise), in dem die Genotypen permutationscodiert sind. Es ist zu berücksichtigen, dass sich jede Person auf einer anderen Position im Messgebiet befindet.

Für wenige Punkte ist eine BF-Lösung sinnvoller. Für viele Punkte werden, wie zuvor bei der Punktaufteilung, GA verwendet. Die Individuen- und Generationenanzahl wird, wie bei der Punktaufteilung, in Abhängigkeit von der Punktanzahl festgelegt, um den größer werdenden Lösungsraum bei steigender Punktanzahl zu berücksichtigen:

$$\begin{aligned} l_{BF} &= n! \\ l_{GA} &= \text{numI} \cdot \text{numG} = 5n \cdot 5n = 25 \cdot n^2 \end{aligned} \quad (4.2)$$

Die Vorgehensweise bei der Wahl der BF-Variante bzw. der GA-Variante erfolgt wie bei der Aufteilung der Punkte. Der Schnittpunkt der beiden Kurven liegt bei  $n = 6.14$  (vgl. Abbildung 4.7). Daraus, ergibt sich, dass die BF-Variante gewählt wird, wenn  $n < 7$  und die GA-Variante, wenn  $n \geq 7$ .

Um bewerten zu können, welche Punktaufteilung am effizientesten ist, muss neben Zeiten für das Zurücklegen der Wege auch die Verweildauer an den Punkten berücksichtigt werden. Diese Zeiten variieren je nach Tätigkeit (Aufbau/Umbau/Abbau). Insgesamt wird die Zeit der Person als Dauer für den Vergleich verschiedener Punktaufteilungen verwendet, die am längsten für die Erledigung ihrer Aufgaben benötigt. Über dieses Verfahren wird erreicht, dass alle aufzubauenden Punkte gut auf die Personen verteilt werden und dass die Personen möglichst die Punkte in der Nähe ihrer Position aufbauen. Die beste Aufteilung und Kombination der Punkte liefert schließlich die geringste Gesamtdauer. Das Individuum mit der geringsten Gesamtdauer wird damit als Ergebnis der Optimierung der Aufbaureihenfolge der Zielpunkte zurückgegeben und geht in die Gesamtberechnung der Optimierung der Standpunktreihenfolge als Teilprozess ein.

Abbildung 4.5 (unten) zeigt die permutationscodierten Individuen. Bei der Berechnung der Fitness wird zuerst das TSP für jede Person gelöst und anschließend die jeweilige Verweildauer pro Punkt dazu addiert. Daraus ergibt sich eine Zeit  $t_{Person1}$ ,  $t_{Person2}$  und ggf.  $t_{Person3}$ . Der Fitnesswert des Individuums ergibt sich schließlich aus

$$f_{\text{Aufteilung}} = \max(t_{Person1}, t_{Person2}, t_{Person3}). \quad (4.3)$$

## 4.5 Dokumentation der Ergebnisse

Zum Abschluss der Optimierung werden die Ergebnisse dokumentiert. Zum einen wird eine Text-Datei mit den Optimierungsergebnissen ausgegeben (s. Abbildung 4.8). Hierin sind die Stellgrößen der Optimierung und deren Ergebnisse aufgeführt. Es wird angegeben, in welcher Standpunktreihenfolge die Messung durchgeführt werden soll, welche Kosten entstehen, wie lange die Messung dauert und welche Entfernung das eingesetzte Personal im Rahmen der Messung zurücklegt. Außerdem wird angegeben, welche Personen die Messung durchführen. Falls der Personalparameter *Anzahl Personal* auf 2 bis 3 eingestellt wurde, kann über die hier aufgeführten Personen erkannt werden, ob die Messung mit zwei oder drei Personen durchgeführt werden soll.

```

# Netzoptimierung für das Netz <wilhelmbuschGK>

# Stellgrößen für die Optimierung der Standpunktfolgenfolge:
Optimierungsziel: Dauer
Anzahl Individuen: 24
Anzahl Generationen: 100
Mutationswahrscheinlichkeit: 1.0
Crossoverwahrscheinlichkeit: 0.6
Selektion: Turnier-Selektion (Turniergroesse: 5)
Vorsortierung der Stdpkte: Die Standpunkte aller
                          Individuen werden vorsortiert

Personal (Minimum): 2
Personal (Maximum): 2
Beobachter baut ZP auf: nein
Unterbrechung nach: 6.5 Stunden

# Ergebnisse der Optimierung
* Reihenfolge der Standpunkte:
P1 P2 P5 P6 P4 P7 P3

Kosten [Euro]:    275.0
Dauer [Std]:      3.055
Entfernung [km]:  3.69

* Personal: 1 Beobachter und 1 Gehilfe(n)
- Beobachter (Lohn: 60.0 Euro/h)
  zu Fuß (0.0 Euro/h, 5.0 km/h)
- Gehilfe 1 (Lohn: 30.0 Euro/h)
  zu Fuß (0.0 Euro/h, 5.0 km/h)

```

**Abbildung 4.8:** Zusammenstellung der Optimierungsergebnisse

Für jede Person wird ein Ablaufplan der Tätigkeiten erzeugt. Der Ablaufplan für einen Beobachter ist in Tabelle A.5 und der Ablaufplan für einen Gehilfen ist in Tabelle A.6 dargestellt. Es handelt sich hierbei um die Ablaufpläne des Beispielnetzes *Wilhelm Busch Museum* (Abbildung 4.10). Für jede Tätigkeit wird die Start- und die Endzeit in Minuten angegeben. In der dritten und vierten Spalte ist angegeben, von welchem zu welchem Punkt sich die Person bewegt. *Außen* bedeutet, dass in diesem Fall keine Basis angegeben wurde, von der aus die Messung gestartet wird. Daher ist der erste Punkt, der in die Distanz- und Zeitberechnung einbezogen wird, der erste Aufbaupunkt. Die Entfernung ist entsprechend 0. Als Tätigkeiten gibt es die Optionen Aufbau SP, Aufbau, Messung, Umbau SP, Umbau, Drehen, Abbau (vgl. Abbildung 4.9). Beim Aufbau eines Anschlusspunktes (Aufbau, Umbau, Drehen) wird der Punkt angegeben zu dem der Punkt auszurichten ist. Für die Tätigkeit Messung wird angegeben, welche Punkte von dem Standpunkt aus angemessen werden sollen.

Zur Verdeutlichung der Abhängigkeiten und der dadurch entstehenden Wartezeiten wird ein Ablauf-Diagramm wie in Abbildung A.8 ausgegeben. Es ist zu erkennen, dass der Beobachter vor dem Beginn der Messung warten muss, bis die drei Anschlusspunkte P4, P5 und P2 aufgebaut wurden. Für den Gehilfen entstehen i. d. R. Wartezeiten, wenn die Messung des Beobachters noch läuft.

Erstreckt sich die Messung über mehrere Messtage, wird für jeden Messtag ein Ablauf-Diagramm ausgegeben. Bei der Simulation der Messung ist dann zu berücksichtigen, dass am Ende des Messtages alle Punkte abgebaut werden müssen. Am nächsten Tag müssen die Anschlusspunkte für den ersten Standpunkt wieder neu aufgebaut werden.

Beobachter	Gehilfe
<b>Aufbau SP</b> kompletter Aufbau eines SP	<b>Aufbau</b> kompletter Aufbau eines AP
<b>Umbau SP</b> Umbau von AP auf SP	<b>Drehen</b> Reflektor neu ausrichten
<b>Umbau</b> Umbau von SP auf AP	<b>Abbau</b> Abbau eines AP
<b>Messung</b> Durchführung der Satzmessung	
<b>Abbau</b> Abbau eines SP oder eines AP	
<b>Aufbau (nur wenn Beob baut AP auf = true)</b> kompletter Aufbau eines AP	
<b>Drehen (nur wenn Beob baut AP auf = true)</b> Reflektor neu ausrichten	

Abbildung 4.9: Tätigkeiten der Personen während der Netzmessung

## 4.6 Anwendung und Evaluation des entwickelten Verfahrens

### 4.6.1 Beispielnetze

Es wurden drei verschiedene Beispielnetze zur Evaluation des entwickelten Verfahrens zur Optimierung der tachymetrischen Netzmessung berechnet. Sie unterscheiden sich durch ihre Punktzahl und Besonderheiten hinsichtlich des Wegenetzes.

#### Wilhelm Busch Museum - 7 Punkte

Das Beispielnetz *Wilhelm Busch Museum* (s. Abbildung 4.10 und Abschnitt A.4.1) ist ein einfaches kleines Netz bestehend aus sieben Messpunkten. Alle Messpunkte sind Beobachtungspunkte und die eingezeichneten Beobachtungen sind allesamt ungerichtet. Es werden 28 Beobachtungen durchgeführt. Die Wege werden zu Fuß zurückgelegt. Das Wegenetz für dieses Beispiel ist in den Tabellen A.1, A.4, A.7, A.8 und A.9 zu finden. Da keine *Basis* festgelegt wurde, von der aus das Messteam startet, beginnt der Prozess für jede Person an dem ersten aufzubauenden Punkt.

#### Prinzengarten - 13 Punkte

Das Beispielnetz *Prinzengarten* (s. Abbildung 4.11 und Abschnitt A.4.2) ist ein einfaches Netz bestehend aus 13 Messpunkten, in dem alle Messpunkte Beobachtungspunkte sind und alle eingezeichneten Beobachtungen ungerichtet durchgeführt werden. Es werden 48 Beobachtungen durchgeführt. Die Koordinaten der Messpunkte und die Distanzmatrizen des Wegenetzes Prinzengarten sind in Abschnitt A.4.2 zu finden. Für dieses Netz wurde eine *Basis* eingezeichnet, an der alle an der Messung beteiligten Personen starten. Das bedeutet, dass der Weg und die Dauer, den die Personen von der Basis zum ersten Punkt zurücklegen müssen, bereits zum Messprozess dazu zählen.

#### Elbinsel - 16 Punkte

Das Beispielnetz *Elbinsel* (s. Abbildung 4.12 und Abschnitt A.4.3) besteht aus 16 Messpunkten, von denen alle Punkte Beobachtungspunkte sind und alle eingezeichneten Beobachtungen ungerichtet durchgeführt werden. Damit ergeben sich 82 Beobachtungen. Das Netz hat die Besonderheit, dass es aus drei Teilen (Nord, Mitte und Süd) besteht, die über eine Brücke im Osten miteinander verbunden sind. Dadurch ergeben sich logistisch betrachtet besondere Herausforderungen. Die Wege

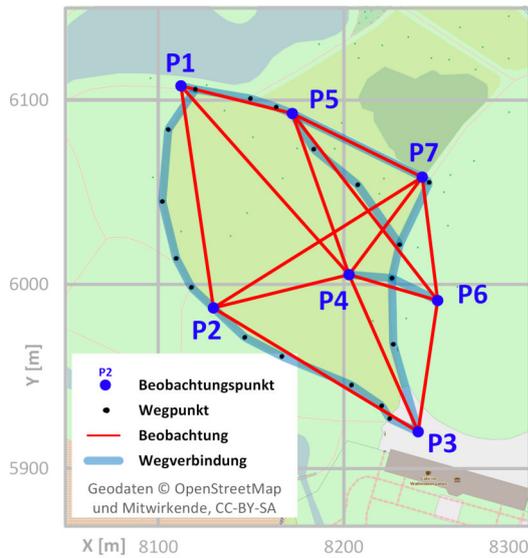


Abbildung 4.10: Beispielnetz Wilhelm Busch Museum

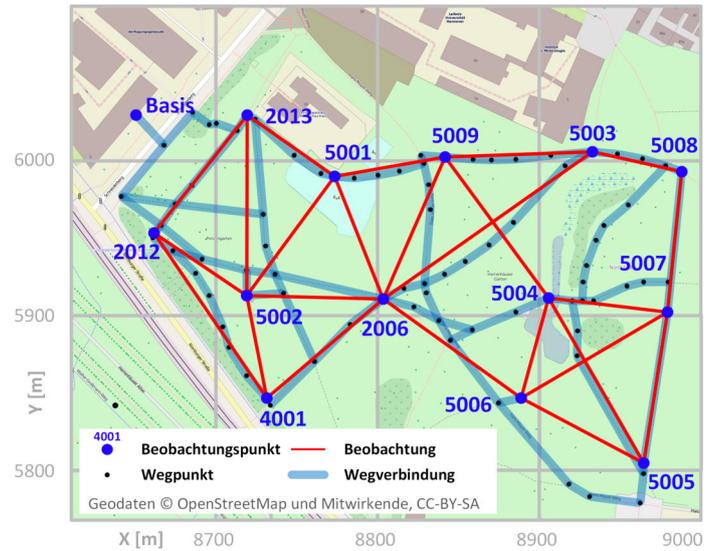


Abbildung 4.11: Beispielnetz Prinzensgarten

Tabelle 4.2: Tachymetrische Netzmessung: Ausschnitt der Berechnungsszenarien für die Parameterstudien (Szenariengruppe S01-S09)

Szenario	Vorsortierung der SP	Anzahl Individuen	Anzahl Generationen	Mutationswahrscheinlichkeit	Crossoverwahrscheinlichkeit	Selektionsverfahren
S01	keine	24	100	0.8	0.2	Turnier (Gr. 5)
S02	keine	48	100	0.8	0.2	Turnier (Gr. 5)
S03	keine	96	100	0.8	0.2	Turnier (Gr. 5)
S04	keine	192	100	0.8	0.2	Turnier (Gr. 5)
S05	keine	24	200	0.8	0.2	Turnier (Gr. 5)
S06	keine	48	200	0.8	0.2	Turnier (Gr. 5)
S07	keine	96	200	0.8	0.2	Turnier (Gr. 5)
S08	keine	192	200	0.8	0.2	Turnier (Gr. 5)
S09	keine	192	400	0.8	0.2	Turnier (Gr. 5)

werden mit dem Auto zurückgelegt. Die Koordinaten der Messpunkte und die Distanzmatrizen sind in Abschnitt A.4.3 zu finden. Für dieses Netz wurde keine gemeinsame *Basis* zum Start der Messung festgelegt.

#### 4.6.2 Parameterstudien

Zur Evaluation der entwickelten Methodik wurden die Parameterstudien, die in Tabelle A.16 im Anhang gezeigt werden, durchgeführt. Zur besseren Übersicht ist ein Ausschnitt der Tabelle A.16 in Tabelle 4.2 dargestellt. Hierin ist zu erkennen, welche Stellgrößen angegeben und variiert werden. Als eine Szenariengruppe wird eine Gruppe bezeichnet, in der außer der Individuenanzahl und der Generationenanzahl alle Stellgrößen identisch sind. Zum einen soll anhand der Ergebnisse der Parameterstudien eine Empfehlung zur Einstellung der Stellgrößen der GA abgeleitet werden und zum anderen soll eine Bewertung des Verfahrens erfolgen. Innerhalb der Parameterstudien werden drei verschiedene Selektionsverfahren getestet. Des Weiteren werden die Individuenanzahl, die Generationenanzahl sowie die Mutations- und Crossoverwahrscheinlichkeit verändert. Zum Schluss wird getestet, ob eine Vorsortierung der Standpunkte zur Erzeugung der initialen Population sinnvoll ist.

In einem ersten Schritt wurden die Szenarien S01-S81 berechnet. Aufgrund der erzielten Ergebnisse wurden im Anschluss noch die Szenarien S82-S90 ausgewertet, die mit den Stellgrößen durchge-

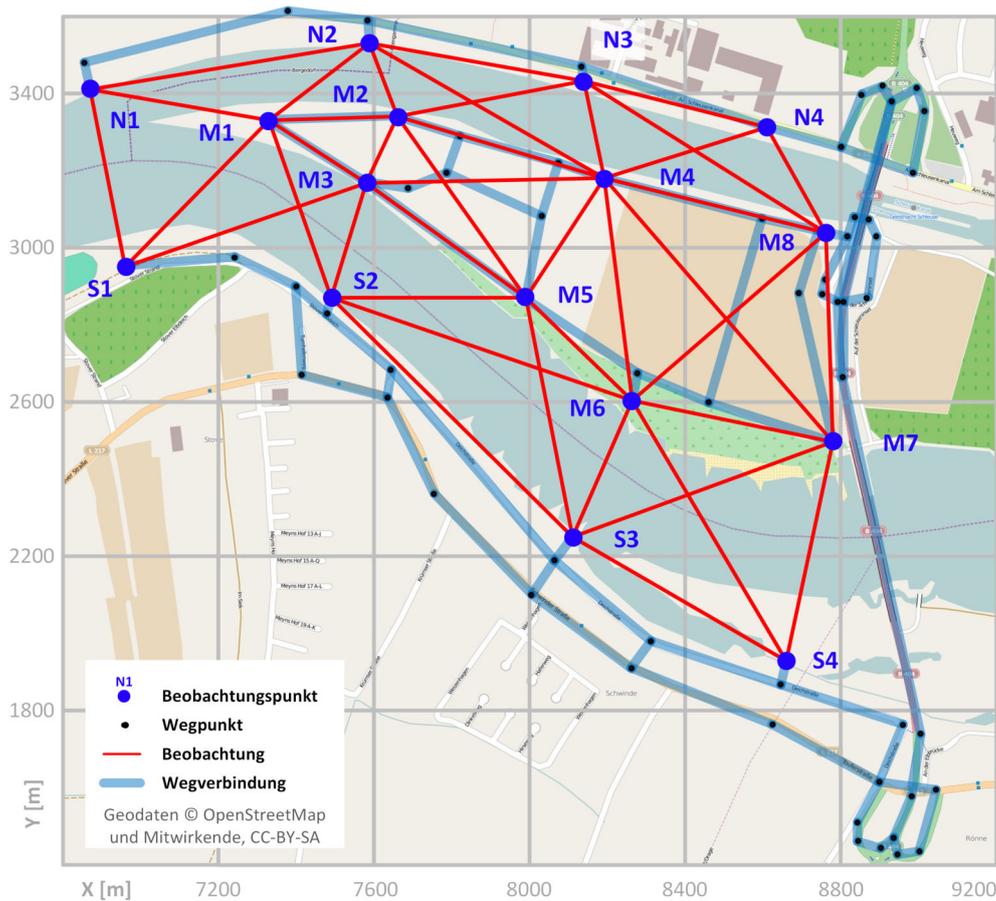


Abbildung 4.12: Beispielnetz Elbinsel

führt wurden, die bis dahin die besten Ergebnisse geliefert haben. Für alle Szenarien wird als Optimierungsziel eine möglichst geringe *Dauer* des Messprozesses festgelegt. Außerdem wird die Personenzahl für alle Beispielnetze auf *zwei Personen* festgesetzt, also ein Beobachter und ein Gehilfe. Im Vorfeld der Parameterstudien wurde für alle Netze getestet, ob es kosteneffizienter ist, mit einem oder mit zwei Gehilfen zu arbeiten. Für alle Netze wurde festgestellt, dass die Variante mit einem Gehilfen kostengünstiger ist. Außerdem wurde festgestellt, dass der Beobachter keine Anschlusspunkte aufbauen soll. Auch hier wurden im Vorfeld der Parameterstudien Tests durchgeführt, wobei festgestellt wurde, dass sich die Prozessdauern nicht wesentlich unterscheiden, der Gehilfe aber mehr Wartezeiten hat, wenn der Beobachter zusätzlich auch noch Anschlusspunkte aufbaut und dreht. Da eine Anfälligkeit für Störungen eher bei der Messung als beim Aufbau gesehen wird, wurde die Variante *Beobachter baut keine Anschlusspunkte auf* gewählt.

Die Berechnungen wurden auf zwei Rechnern des GIH und auf dem Clustersystem der Leibniz Universität IT-Services (LUIS) durchgeführt. Die Rechner weisen die Spezifikationen aus Tabelle 4.3 auf. Das entwickelte Programm SimPle-Net für die Optimierung der tachymetrischen Netzmessung ist so konzipiert, dass auf allen angeforderten Prozessorkernen Berechnungen durchgeführt werden. Die auszuwertenden Individuen einer Generation werden zu Beginn der Evaluation auf die Prozessorkerne aufgeteilt. Das bedeutet, dass die Berechnung schneller ist, je mehr Prozessorkerne zur Verfügung stehen. Es ist jedoch nicht notwendig, mehr Prozessorkerne als Individuen anzufordern. Außerdem ist es sinnvoll, wenn die Anzahl der Individuen glatt durch die Anzahl der Prozessorkerne teilbar ist. Dann werden alle Kerne optimal ausgelastet.

Alle Ergebnisse der Parameterstudien werden in Tabelle A.17, Tabelle A.18 und Tabelle A.19 im Anhang dargestellt. In den Tabellen wird neben der minimalen, der mittleren, der maximalen Mess-

**Tabelle 4.3:** Spezifikationen der Rechner auf denen die Testberechnungen für die Parameterstudien durchgeführt wurden. Angaben der Cluster-Rechner aus Scientific Computing Group (2016)

Name	Prozessor	Berechnung auf x Kernen	Arbeitsspeicher (angefordert)
GIH-lokal	Intel Core i7-3770 (4-cores, 3.40 GHz)	8	8
GIH-Workstation	Intel Xeon E5-1650 v2 (6-cores, 3.50 GHz)	12	10
Cluster-Lena	2x Intel Haswell Xeon E5-2630 v3 (8-cores, 2.40 GHz, 20 MB Cache, 85W)	12	16
Cluster-Tane	2x Intel Westmere-EP Xeon X5670 (6-cores, 2.93 GHz, 12 MB Cache, 95W)	12	16
Cluster-Taurus	2x Intel Westmere-EP Xeon X5650 (6-cores, 2.67 GHz, 12 MB Cache, 95W)	12	16
Cluster-SMP	4x Intel Westmere-EX Xeon E7-4830 (8-cores, 2.13 GHz, 24 MB Cache, 105W)	12	16
	4x Intel Backton Xeon E7540 (6-cores, 2.00 GHz, 18 MB Cache, 105W)	12	16
	4x Intel Westmere-EX Xeon E7-4830 (8-cores, 2.13 GHz, 24 MB Cache, 105W)	12	16

dauer und der Standardabweichung aus  $it = 100$  Iterationen auch gezeigt, in wie viel Prozent der Fälle die beste Lösung erreicht wurde. Die zusätzlich aufgeführte maximale prozentuale Abweichung berechnet sich wie folgt:

$$pa_{max} = \frac{(d_{max} - d_{best}) \cdot 100}{d_{best}} \quad (4.4)$$

mit  $d_{best}$  : beste Lösung und  $d_{max}$  : maximale Messdauer aus  $it$  Iterationen.

Die mittlere prozentuale Abweichung ergibt sich aus:

$$pa_{mttl} = \frac{(d_{mttl} - d_{best}) \cdot 100}{d_{best}} \quad (4.5)$$

mit  $d_{best}$  : beste Lösung und  $d_{mttl}$  : mittlere Messdauer aus  $it$  Iterationen.

Für das Netz *Wilhelm Busch Museum* konnte die beste Lösung  $d_{best}$  mit einer BF-Optimierung ermittelt werden. Bei den beiden anderen Beispielen handelt es sich um die beste jemals erzielte Lösung.

Zur Bewertung der Wahl der Stellgrößen wurden die Ergebnisse anschließend sinnvoll gruppiert. Dadurch können Rückschlüsse auf die Wahl der einzelnen Stellgrößen gezogen werden. Für alle Bewertungen wird außerdem die mittlere Online- und Offline-Performance (vgl. Abschnitt 3.4.5) der einzelnen Szenarien aus jeweils 100 Iterationen gebildet.

Da für das Beispiel *Wilhelm Busch Museum* bereits nach 100 Generationen zu 100% die beste Lösung mit wenigen Individuen erreicht wurde, wurden die Szenarien in diesem Fall nicht mit 200 und 400 Generationen berechnet. Auch für die Bewertung der Stellgrößen in den genetischen Algorithmen werden im Wesentlichen die Optimierungsergebnisse von den Beispielnetzen *Prinzengarten* und *Elbinsel* herangezogen.

**Tabelle 4.4:** Erreichte Lösungen gruppiert nach Szenariengruppen  
Beste Lösung Prinzengarten: 5.02 Std., Elbinsel: 7.41 Std.

Szenariengruppe	Selektionsverfahren	Mutation $p_m$	Crossover $p_c$	Vorsortierung	Prinzengarten		Elbinsel	
					Beste Lsg. erreicht	Mittlere Messdauer [Std.]	Beste Lsg. erreicht	Mittlere Messdauer [Std.]
S01-S09	Turnier (Gr. 5)	0.8	0.2	keine	24%	5.038	22%	7.504
S10-S18	Turnier (Gr. ind)	0.8	0.2	keine	17%	5.042	16%	7.521
S19-S27	Greedy (60%)	0.8	0.2	keine	14%	5.049	6%	7.559
S28-S36	Roulette	0.8	0.2	keine	7%	5.059	3%	7.610
S37-S45	Turnier (Gr. 5)	0.8	0.6	keine	21%	5.039	21%	7.500
S46-S54	Turnier (Gr. 5)	0.4	0.6	keine	13%	5.049	11%	7.553
S55-S63	Turnier (Gr. 5)	0.4	0.2	keine	11%	5.050	11%	7.554
S64-S72	Turnier (Gr. 5)	0.8	0.2	1	20%	5.040	17%	7.482
S73-S81	Turnier (Gr. 5)	0.8	0.2	alle	24%	5.041	29%	7.455
S82-S90	Turnier (Gr. 5)	1.0	0.6	alle	43%	5.034	34%	7.450

### Variation des Selektionsverfahrens

Die Wahl des Selektionsverfahrens beeinflusst den Selektionsdruck und damit einen Verlust der Vielfaltigkeit der Population. Über den Vergleich der drei Selektionsverfahren Turniersélection, Greedy Overselection und Rouletteselektion (vgl. Abschnitt 3.4.3) soll für das Beispiel der tachymetrischen Netzmessung getestet werden, welches Selektionsverfahren sich am besten für die Optimierung eignet.

Abbildung 4.13 zeigt die Entwicklung der Online- und Offline-Performance der drei ausgewählten Szenarien S8 (Turniersélection mit der Turniergröße 5), S26 (Greedy Overselection 60%) und S35 (Rouletteselektion) für die Beispielnetze Prinzengarten und Elbinsel. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Turniersélection die beste Performance besitzt. Die Kurven der Online- und Offline-Performance fallen bei der Turniersélection deutlich schneller ab als bei der Rouletteselektion und der Greedy Overselection. Die Online-Performance zeigt, wie sich die Fitnesswerte der gesamten Population über die Zeit entwickeln. Bei der Rouletteselektion verbessern sich die Werte kaum, während sie sich bei der Turniersélection sehr schnell verbessern. Auch die Kurve der Offline-Performance, die ein Mittelwert der besten Fitnesswerte bis zur jeweiligen Generationen ist, fällt bei der Turniersélection am stärksten ab und erreicht auch den niedrigsten Endwert nach 200 Generationen. Das bedeutet, dass mit diesem Selektionsverfahren für dieses Beispiel schneller gute Lösungen erreicht werden, als mit den anderen getesteten Selektionsverfahren. Eine Variation der Turniergröße in Abhängigkeit der Individuenanzahl, wie es in den Szenarien S10 bis S18 getestet wurde, hat sich nicht als vorteilhaft herausgestellt. Bei der Rouletteselektion ist es im Gegensatz zur Turniersélection und der Greedy Overselection besser, mit wenigen Individuen zu arbeiten und dafür mehr Generationen zu berechnen.

In Tabelle 4.4 werden die erreichten *besten Lösungen in %* und die *mittlere Messdauer* für die einzelnen Szenariengruppen dargestellt. Beim Vergleich der ersten vier Szenariengruppen, bei der die Mutationswahrscheinlichkeit, die Crossoverwahrscheinlichkeit und die Vorsortierung unverändert bleiben, schneidet die Turniersélection mit einer Turniergröße von fünf Individuen am besten ab.

### Variation der Individuen- und Generationenanzahl

Durch die Variation der Individuen- und Generationenanzahl wird die Anzahl der ausgewerteten Lösungen für das Netz gesteuert. Wird eine relativ kleine Individuenanzahl verwendet, gibt es nur wenige Lösungen, die von Generation zu Generation fortgepflanzt werden. Die Vielfalt an Lösungen ist daher recht gering. Wird die Individuenanzahl groß gewählt, gibt es zu Beginn der Optimierung eine große Vielfalt, die dann von Generation zu Generation verringert wird. Dadurch werden

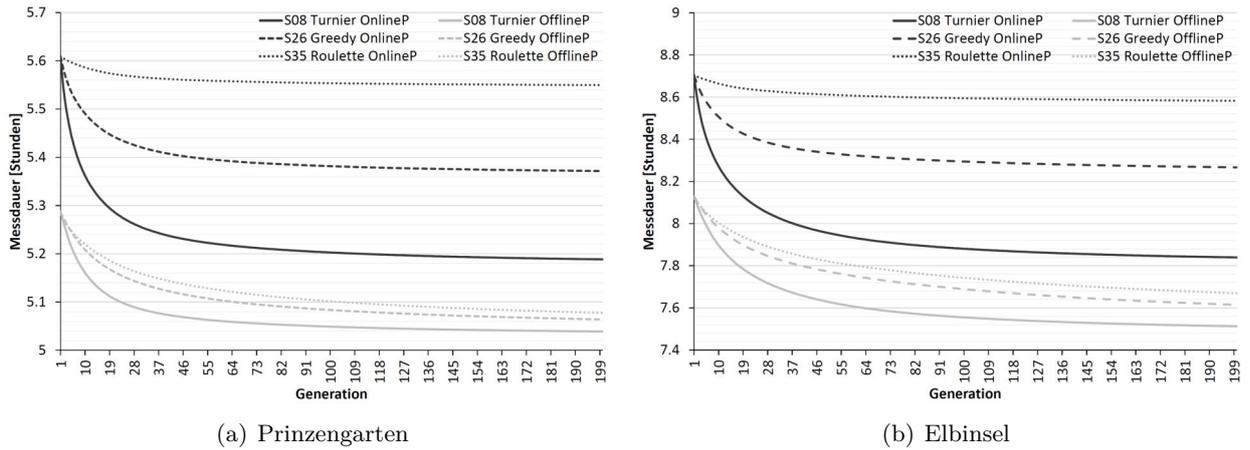


Abbildung 4.13: Vergleich der Online- und Offline-Performance bei Variation der Selektion

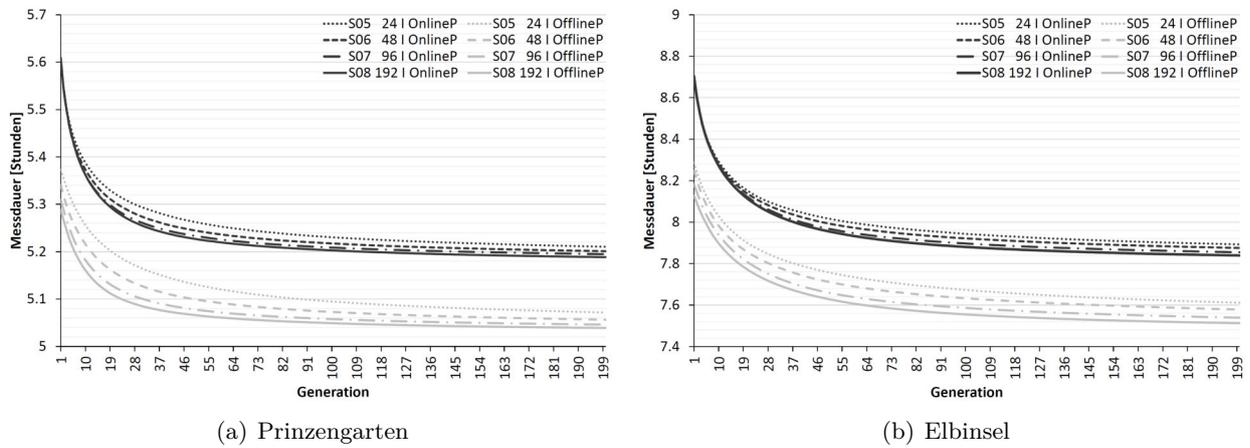


Abbildung 4.14: Vergleich der Online- und Offline-Performance bei Variation der Individuenanzahl

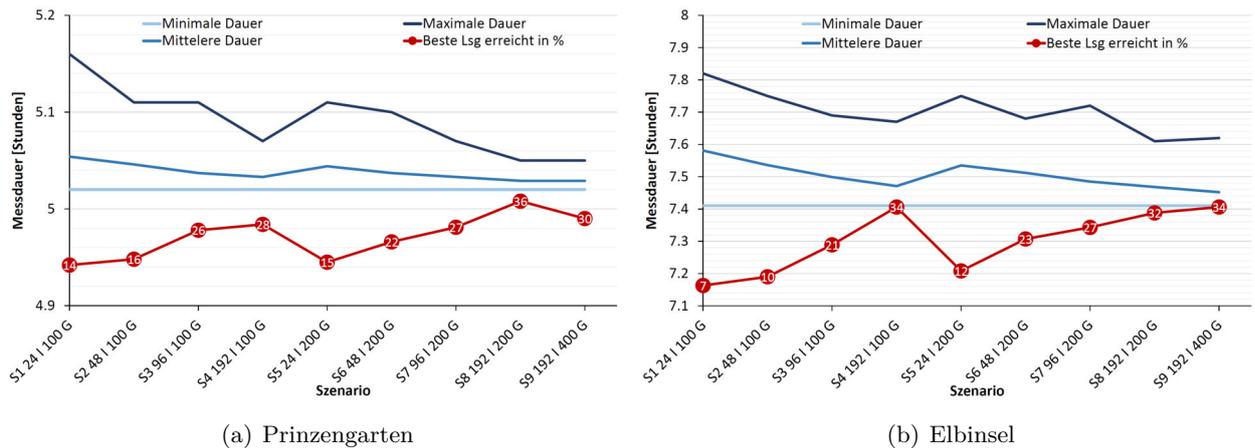


Abbildung 4.15: Ergebnisse bei Variation der Individuen- und Generationenanzahl

in der Regel bessere Ergebnisse erzielt. Um in einer akzeptablen Rechenzeit möglichst viele Individuen, aber auch Generationen auswerten zu können, soll geprüft werden, wie sich die Variation der Individuen- und Generationenanzahl auf die Wiederholbarkeit der Optimierungsergebnisse auswirkt.

**Tabelle 4.5:** Erreichte Lösungen gruppiert nach Individuen- und Generationenanzahl

Gruppiert nach nach	Stell- größe	Prinzengarten		Elbinsel	
		Beste Lsg. erreicht	Mittlere Messdauer [Std.]	Beste Lsg. erreicht	Mittlere Messdauer [Std.]
numI	24	10%	5.055	6%	7.566
	48	14%	5.048	12%	7.530
	96	21%	5.041	19%	7.512
	192	28%	5.036	26%	7.484
numG	100	16%	5.049	13%	7.540
	200	20%	5.042	17%	7.510
	400	32%	5.033	30%	7.471

Tabelle 4.5 zeigt die Lösungen aus Tabelle A.18 gruppiert nach Individuen- und Generationenanzahl. Für die Anzahl der Individuen wurden alle berechneten Lösungen mit 24, 48, 96 und 192 Individuen gemittelt, egal welche sonstigen Stellgrößen verwendet wurden. Es zeigt sich, dass insgesamt mit 192 Individuen am häufigsten die beste Lösung sowie die geringste mittlere Messdauer erzielt wird. In Abbildung 4.14 lässt sich auch anhand der Online- und Offline-Performance erkennen, dass eine hohe Individuenanzahl zu bevorzugen ist. An den Kurven der Offline-Performance lässt sich ablesen, dass bei einer großen Individuenanzahl schon nach wenigen Generationen eine gute Lösung erreicht wird.

Bei der Betrachtung der Ergebnisse zur Variation der Generationenanzahl in Tabelle 4.5 ist erkennbar, dass bei der Verwendung einer größeren Generationenanzahl in der Regel ein besseres Ergebnis erreicht wird. Hier zeigt das Mittel aus allen Szenarien mit 400 Generationen, dass damit in den meisten Fällen die beste Lösung und die geringste mittlere Messdauer erreicht wird. Allerdings ist anzumerken, dass bei der Berechnung mit 400 Generationen auch nur eine hohe Individuenanzahl von 192 verwendet wurde.

In Abbildung 4.15 werden die Ergebnisse der Szenarien S1 bis S9 geplottet. Es werden die minimale, die mittlere und die maximale Messdauer aus 100 Iterationen gezeigt, sowie die prozentuale Angabe, wie oft die beste Lösung innerhalb der 100 Iterationen erreicht wurde. Es ist erkennbar, dass bei einer geringen Individuenanzahl mit einer größeren Generationenanzahl bessere Ergebnisse erzielt werden. Die Werte für die mittlere und maximale Messdauer sind bei einer hohen Generationenanzahl geringer. Außerdem ist die Prozentzahl, in der die beste Lösung erreicht wird, größer. Bei einer hohen Individuenanzahl von 192 sind die Unterschiede dagegen gering.

### Vorsortierung der Standpunkte

Folgende Vorsortierungsmöglichkeiten der Standpunkte wurden getestet:

- *keine* Vorsortierung der Standpunkte, d.h. alle Individuen werden zufällig erzeugt
- *eins* Die Standpunkte eines Individuums werden vorsortiert, die restlichen Individuen werden zufällig generiert
- *alle* Standpunkte werden vorsortiert

Durch eine Vorsortierung der Standpunkte soll erreicht werden, dass gleich zu Beginn der Optimierung (in der initialen Population) eine bzw. mehrere gute Lösungen enthalten sind. Dabei wird davon ausgegangen, dass kurze Wege zwischen den Standpunkten die Dauer des Messprozesses positiv beeinflussen.

In Abbildung 4.16 ist der Einfluss der Vorsortierung auf die Online- und Offline-Performance zu erkennen. Hierfür wurden jeweils die drei Szenarien S08, S71 und S80 mit 192 Individuen und 200

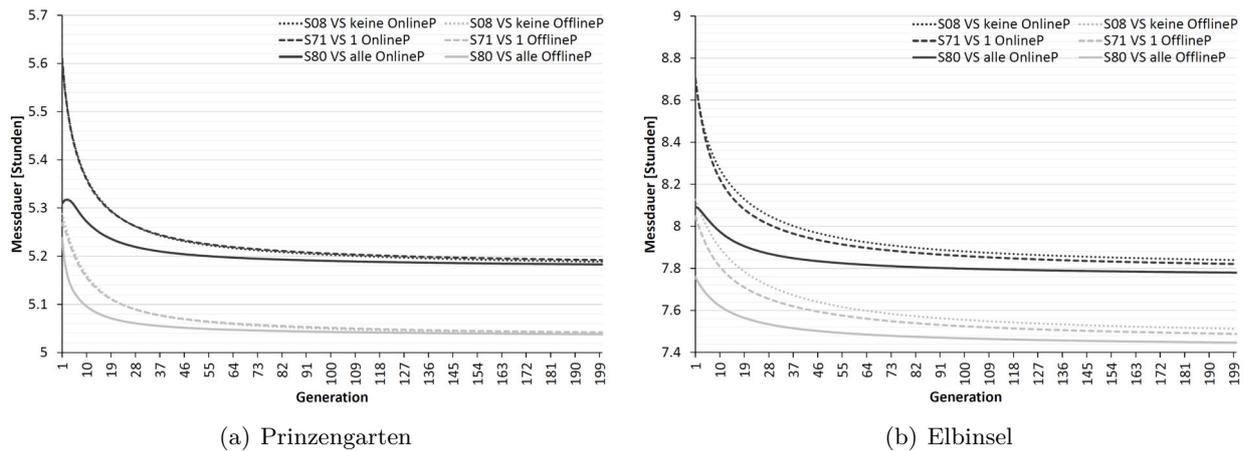


Abbildung 4.16: Vergleich der Online- und Offline-Performance bei Variation der Vorsortierung

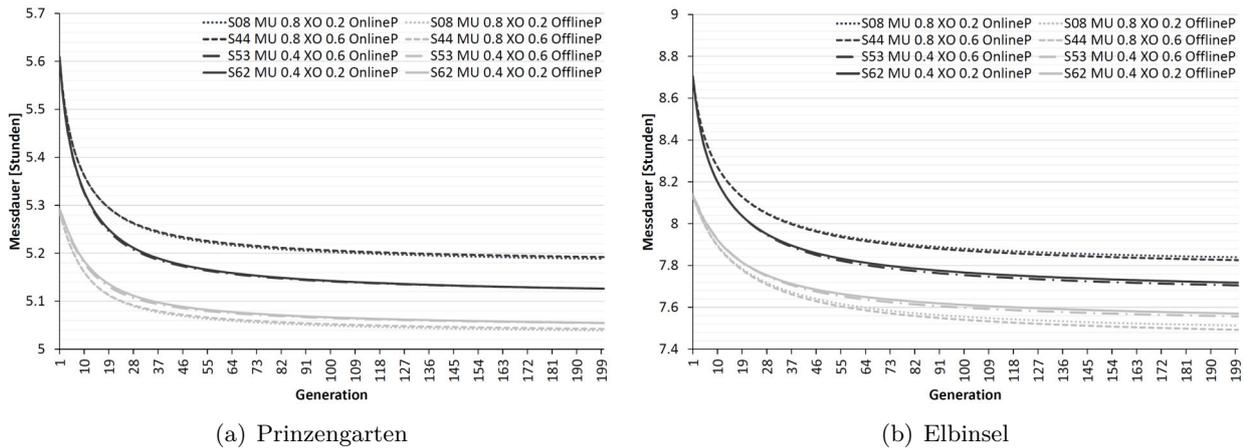
Generationen ausgewählt. Für das Beispiel *Prinzengarten* wirkt sich eine einzelne Vorsortierung der Standpunkte kaum auf die Performance aus, während beim Beispiel *Elbinsel* sowohl die Online- als auch die Offline-Performance bei einer Vorsortierung von einem Standpunkt geringer ist. Werden alle Standpunkte vorsortiert, ist der Einfluss auf die Performance für beide Beispiele deutlich sichtbar. Die Online-Performance zeigt, dass die Vielfalt der Lösungen innerhalb der Population bei einer Vorsortierung aller Individuen deutlich geringer ist als ohne Vorsortierung. Bei dem Beispiel *Elbinsel* sind auch die Endwerte der Online- und Offline-Performance nach 200 Generationen geringer als bei den Szenarien ohne und mit einer Vorsortierung. Beim Beispiel *Prinzengarten* ist der Unterschied zwischen den Endwerten marginal. Daraus lässt sich schließen, dass bei diesem Beispiel nicht unbedingt die Kürze der Wege zwischen den Standpunkten ausschlaggebend für eine geringe Prozessdauer ist, während das beim Beispiel *Elbinsel* durchaus der Fall ist.

Eine Vorsortierung der Standpunkte kann sich bei Netzen mit markantem Wegenetz positiv auswirken. Da sich die Vorsortierung in beiden Beispielen nicht negativ auf die Optimierungsergebnisse auswirkt, ist sie ein Mittel, um schneller zu guten Optimierungsergebnissen zu kommen.

### Variation der Mutations- und Crossoverwahrscheinlichkeit

Über die Variation der Mutations- und Crossoverwahrscheinlichkeit lässt sich im Selektionsprozess die Vielfalt der Population steuern. Die Ergebnisse in Tabelle 4.4 und Abbildung 4.17 zeigen, dass eine Veränderung der Crossoverwahrscheinlichkeit von 0.2 auf 0.6 kaum Einfluss auf die Ergebnisse der Optimierung hat. Beim Vergleich der Szenariengruppe S01-S09 mit S37-S45 weichen die erreichten besten Lösungen für beide Beispiele nur um wenige Prozentpunkte voneinander ab. Auch die mittlere Messdauer der Lösungen unterscheiden sich kaum. Gleiches gilt für den Vergleich der Szenariengruppe S46-S54 mit S55-S63. Die erzielten Ergebnisse dieser Gruppen mit einer Mutationswahrscheinlichkeit von 0.4 sind jedoch deutlich schlechter, als die der beiden ersten Gruppen mit einer Mutationswahrscheinlichkeit von 0.8. Die Wahl der Mutationswahrscheinlichkeit hat damit einen großen Einfluss auf die erzielten Ergebnisse. Eine große Mutationswahrscheinlichkeit ist hierbei zu bevorzugen.

In Abbildung 4.17 sind die Online- und Offline-Performance für vier ausgewählte Szenarien zur Bewertung des Einflusses der Mutations- und Crossoverwahrscheinlichkeit auf die Ergebnisse dargestellt. Es wurde jeweils das Szenario mit einer Individuenanzahl von 192 und einer Generationenanzahl von 200 ausgewählt. Es ist zu erkennen, dass die Kurve der Online-Performance, die eine Aussage über die Vielfalt in der Population liefert, bei einer Mutationswahrscheinlichkeit von 0.4 (S53 und S62) schneller abfällt und einen geringeren Endwert erreicht als bei einer Mutationswahr-



**Abbildung 4.17:** Vergleich der Online- und Offline-Performance bei Variation der Mutations- und Crossoverwahrscheinlichkeit

scheinlichkeit von 0.8 (S08 und S44). Die Vielfalt der Gesamtpopulation sinkt bei einer geringen Mutationswahrscheinlichkeit also schneller. Das hat in diesem Fall zur Folge, dass weniger häufig die beste Lösung gefunden wurde und die Offline-Performance für eine geringere Mutationswahrscheinlichkeit schlechter ausfällt als für eine höhere Mutationswahrscheinlichkeit. Für die Szenarien mit der höheren Mutationswahrscheinlichkeit (S08 und S44) fallen die Kurven schneller ab und erreichen auch einen geringeren Endwert nach 200 Generationen.

Im Gegensatz zu allen anderen Vergleichen von Online- und Offline-Performance (Selektionsverfahren, Individuenanzahl, Vorsortierung) ist hier eine geringe Online-Performance nicht an eine geringe Offline-Performance gebunden. In diesem Vergleich verhält es sich genau umgekehrt. Eine Erklärung dafür ist, dass die Population durch eine geringe Mutationswahrscheinlichkeit homogener wird. Bei einer hohen Mutationswahrscheinlichkeit werden die Individuen mit einer größeren Wahrscheinlichkeit mutiert. Dadurch werden häufiger Individuen kreiert, die eine schlechtere Lösung liefern, als die Individuen aus der vorhergehenden Generation.

Anhand der größeren Offline-Performance ist erkennbar, dass es in der Population insgesamt eine größere Vielfalt gibt, wodurch eine Konvergenz zu einem lokalen Minimum unwahrscheinlicher ist. Bei einer geringen Mutationswahrscheinlichkeit konvergiert die Lösung hingegen häufiger zu einem lokalen Minimum, statt ein globales Minimum zu erreichen. Dies lässt sich aus dem Verlauf der Online-Performance-Kurven schließen.

#### 4.6.3 Empfehlung zur Einstellung der Stellgrößen

Aufgrund der Ergebnisse der Szenarien S01-S81 wurde noch eine weitere Szenariengruppe hinzugefügt. In der Gruppe S82-S90 wurde die Mutationswahrscheinlichkeit auf 1.0 und die Crossoverwahrscheinlichkeit auf 0.6 gesetzt. Als Selektionsverfahren wurde die Turniertelektion mit einer Turniergröße von 5 gewählt. Außerdem wurden aufgrund der guten Ergebnisse in Szenariengruppe S73-S81 alle Standpunkte vorsortiert.

Die Ergebnisse, die in dieser Szenariengruppe erzielt wurden, sind nochmal deutlich besser als die der Szenariengruppe S73-S81. Für den *Prinzengarten* konnte mit einer Individuenanzahl von 192 in über 70% der Fälle die beste Lösung erreicht werden. Für die *Elbinsel* waren es immerhin noch über 40% (vgl. Abbildung 4.19). Die Rechenzeit für die einzelnen Szenarien beziehen sich auf den Rechner GIH-lokal, auf dem die Optimierung mit acht Prozessorkernen durchgeführt wurden.

Abbildung 4.18 zeigt die Online- und Offline- Performance der Szenarien S86-S89 mit jeweils 200

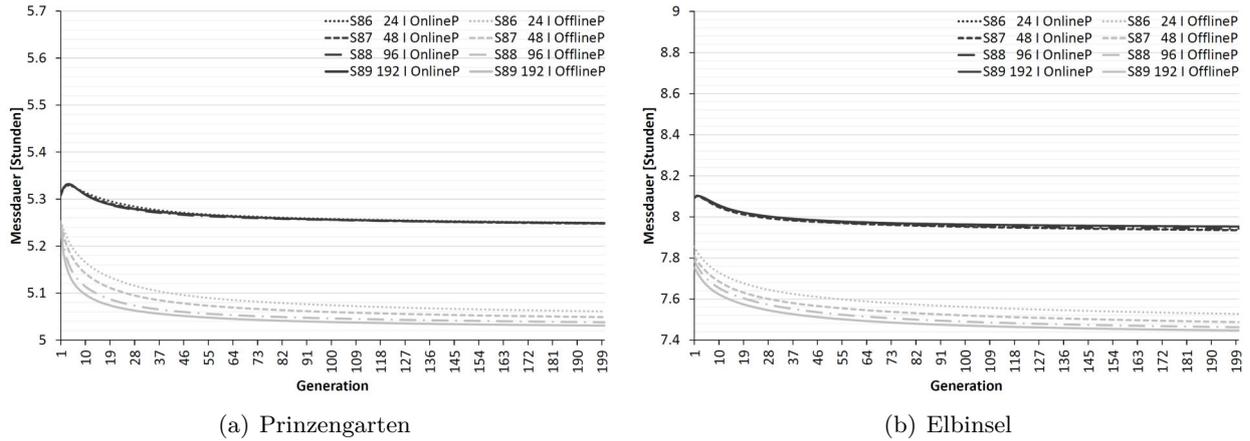


Abbildung 4.18: Vergleich der Online- und Offline-Performance der Szenarien S86 bis S89

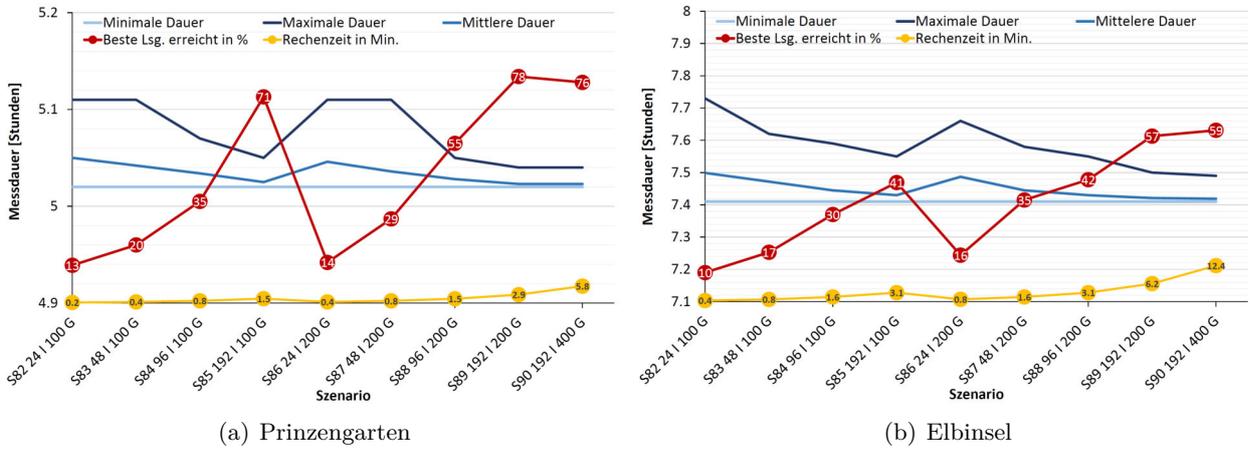


Abbildung 4.19: Ergebnisse der Szenarien S82 bis S90

Generationen. Die Online-Performance unterscheidet sich durch die Vorsortierung der Standpunkte kaum. Bei der Offline-Performance fällt die Kurve mit 192 am stärksten ab, d.h. hier kann schon eine geringe Anzahl von Generationen ausreichen, um ein gutes Ergebnis zu erzielen.

In Abbildung 4.19 ist zu erkennen, dass sich die Ergebnisse bei verschiedenen Netzgrößen unterscheiden. Bei größeren Netzen (hier: *Elbinsel*) mit vielen Punkten und Beobachtungen wird seltener die beste Lösung erreicht. Die Individuen- und Generationenanzahl sollte daher in Abhängigkeit von der Punkt- und Beobachtungsanzahl ( $n_{Pkte}$ ,  $n_{Beo}$ ) gewählt werden. Anhand der erzielten Ergebnisse werden folgende Formeln zur Berechnung der Individuen- und Generationenanzahl vorgeschlagen:

$$\begin{aligned} numI &= 2 \cdot (n_{Pkte} + n_{Beo}) \\ numG &= 3 \cdot (n_{Pkte} + n_{Beo}) \end{aligned} \tag{4.6}$$

Tabelle 4.6 zeigt die vorgeschlagene Individuen- und Generationenanzahl für die drei Beispiele. Die Individuenanzahl wird an den verwendeten Prozessor (hier: *GIH-lokal* mit acht Kernen und 3.40 GHz) angepasst, so dass alle Prozessorkerne optimal ausgelastet sind. In dem Beispiel handelt es sich um acht Kerne. Die Anzahl  $numI$  der abgestimmten Individuen sollte daher glatt durch acht teilbar sein. Die Anzahl  $numG$  der abgestimmten Generationen ergibt sich dann aus dem Quotienten aus Anzahl  $n_{Lös}$  der Lösungen und Anzahl  $numI$  der abgestimmten Individuen.

**Tabelle 4.6:** *Empfohlene Anzahl von Individuen und Generationen für die Optimierung einer tachymetrischen Netzmessung (Szenario S100)*

Netz	n <sub>Pkte</sub>	n <sub>Beo</sub>	numl	numG	n <sub>Lös</sub>	numl abgestimmt auf Prozessor hier: 8 Kerne	numG	Rechenzeit [Min.]
<b>Wilhelm Busch Museum</b>	7	28	70	105	7350	<b>72</b>	<b>102</b>	0.2
<b>Prinzengarten</b>	13	48	122	183	22326	<b>120</b>	<b>186</b>	2
<b>Elbinsel</b>	16	82	196	294	57624	<b>192</b>	<b>300</b>	9

**Tabelle 4.7:** *Empfohlene Stellgrößen für die Optimierung einer tachymetrischen Netzmessung mit genetischen Algorithmen*

Stellgrößen	Empfohlene Einstellung
Optimierungsziel	hier: Dauer (alternativ: Kosten, Entfernung)
Vorsortierung SP	alle Individuen
Anzahl Individuen	2 · (n <sub>Pkte</sub> + n <sub>Beo</sub> )
Anzahl Generationen	3 · (n <sub>Pkte</sub> + n <sub>Beo</sub> )
Mutationswahrscheinlichkeit	1.0
Crossoverwahrscheinlichkeit	0.6
Selektionsverfahren	Turnierselektion (Turniergröße: 5)
Beobachter baut AP auf	hier: false (alternativ: true)
Tag unterbrechen nach	hier: 6.5 Std.

Alle drei Beispiele wurden im Anschluss an die Parameterstudien mit den empfohlenen Stellgrößen aus Tabelle 4.7 in 100 Iterationen optimiert (Szenario S100). Die Rechenzeit für das Netz *Wilhelm Busch Museum* beträgt dann bei einer Berechnung auf *GIH-lokal* ca. 12 Sekunden. Für dieses Beispiel wird zu 100% die beste Lösung erreicht. Die Rechenzeit für den *Prinzengarten* liegt bei ca. 2 Minuten. Hier wird in 55% die beste Lösung erreicht. Für die *Elbinsel* beträgt die Rechenzeit ca. 9 Minuten. Mit den empfohlenen Stellgrößen wird in 52% der Fälle die beste Lösung erzielt. In Abbildung 4.21 ist zu erkennen, dass auch die Varianten, die nicht die kürzeste Messzeit erreichen, nur geringfügig längere Messdauern besitzen.

Falls die Rechenzeit für die Vorbereitung einer Messung nicht kritisch ist, können mehrere Iterationen berechnet werden. Die Rechenzeit, die für eine Lösung benötigt wird, summiert sich mit jeder weiteren Iteration auf. Bereits aus wenigen Iterationen (z. B.  $it = 10$ ) kann die Streuung der Lösungen berechnet werden. Daraus lässt sich ableiten, wie gut die Optimierung des Netzes mit den verwendeten Stellgrößen ist. Zur Beurteilung der Streuung können die Standardabweichung sowie die maximale und mittlere prozentuale Abweichung  $pa_{max}$  und  $pa_{mttl}$  (vgl. Gleichung 4.4 und Gleichung 4.5 auf S. 83) berechnet werden. Für die gezeigten Beispiele konnte mit den empfohlenen Stellgrößen aus Tabelle 4.7 eine maximale prozentuale Abweichung  $pa_{max} = 1.1\%$  für das Beispiel *Elbinsel*,  $pa_{max} = 0.7\%$  für den *Prinzengarten* und  $pa_{max} = 0.0\%$  für das *Wilhelm Busch Museum* erreicht werden. Die mittlere prozentuale Abweichung  $pa_{mttl}$  lag für die *Elbinsel* und den *Prinzengarten* bei 0.1%. Sollte die maximale prozentuale Abweichung größer als  $pa_{max} = 5\%$  sein, sollten die Individuen- und die Generationenanzahl erhöht werden und eine erneute Optimierung berechnet werden.

#### 4.6.4 Bewertung der erzielten Ergebnisse

##### Richtigkeit

Die Richtigkeit der Lösung, d.h. ob wirklich die optimale Lösung für das Netz gefunden wurde, lässt sich nur für kleine Netze, wie das Beispiel *Wilhelm Busch Museum*, prüfen. Hier kann eine Brute-Force-Berechnung aller Lösungsvarianten erfolgen. In Tabelle A.20 ist ein Ausschnitt der Varianten bei der Anordnung der Standpunkte gezeigt. Die Ergebnisse der Brute-Force-Berechnung werden

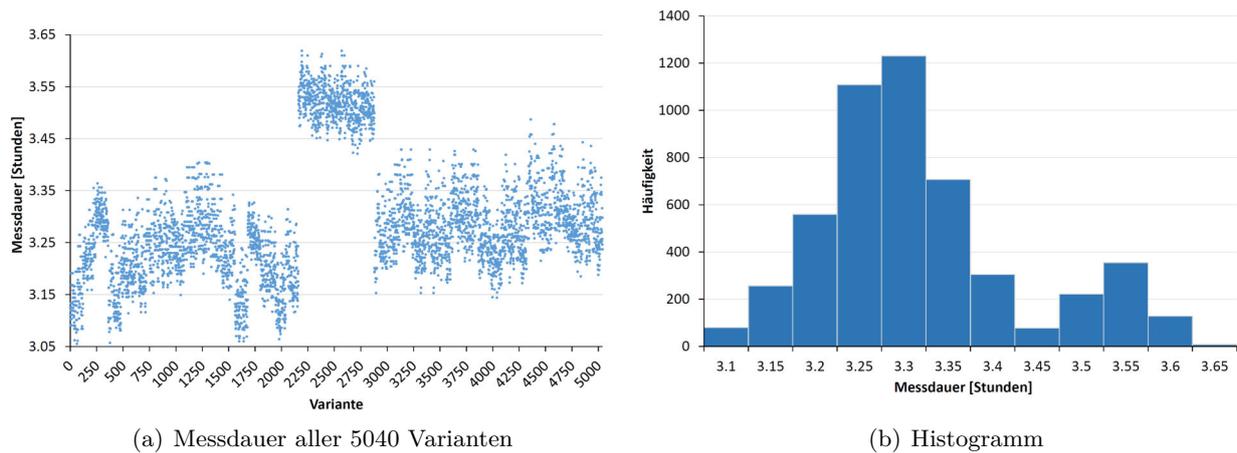


Abbildung 4.20: *Wilhelm Busch Museum: Zusammenstellung aller Varianten für die BF-Berechnung*

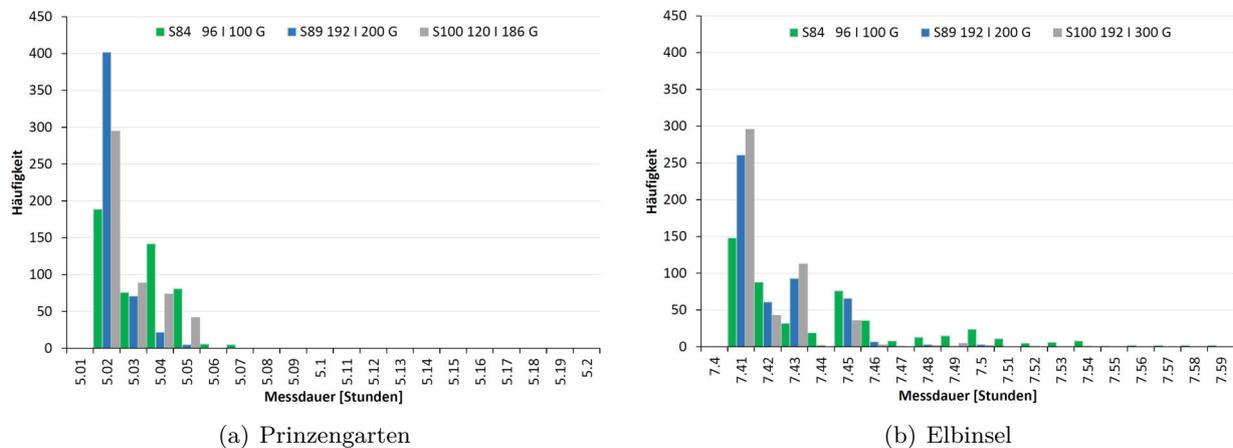


Abbildung 4.21: *Beispiel für die Wiederholbarkeit der Ergebnisse (je 500 Iterationen)*

in Abbildung 4.20 dargestellt. Das beste Ergebnis liefert Variante 64 mit einer Messdauer von 3.055 Stunden mit einer Standpunktreihenfolge von P1 P2 P5 P6 P4 P7 P3. Das schlechteste Ergebnis liefert Variante 2571 mit einer Messdauer von 3.619 Stunden mit einer Standpunktreihenfolge von P4 P5 P3 P1 P6 P2 P7.

Für größere Netze wie den *Prinzengarten* oder die *Elbinsel* ist die Berechnung aller Lösungen nicht in einer akzeptablen Rechenzeit möglich, da der Lösungsraum viel zu groß ist. Durch die große Zahl an Wiederholungsberechnungen (je 90 Szenarien mit 100 Iterationen = 9000 Berechnungen), die für diese beiden Beispielnetze berechnet wurden, ist die Wahrscheinlichkeit jedoch hoch, dass die beste Lösung gefunden wurde. In der Praxis, wenn nur wenige Durchläufe berechnet werden, ist diese Gewissheit allerdings nicht vorhanden. Anhand der Ergebnisse der Beispielnetze zeigt sich jedoch, dass die Streuung der berechneten Lösungen nicht besonders groß ist und in den meisten Fällen eine gute, wenn auch nicht die beste Lösung erzielt wird.

### Wiederholbarkeit der Ergebnisse

Zur Darstellung der Wiederholbarkeit der Ergebnisse dienen die Histogramme in Abbildung 4.21. Es werden drei Szenarien für die beiden Beispielnetze *Prinzengarten* und *Elbinsel* gezeigt. Szenario S84 mit 96 Individuen und 100 Generationen, Szenario S89 mit 192 Individuen und 200 Generationen sowie Szenario S100 mit den empfohlenen Stellgrößen. Alle Szenarien wurden in 500 Iterationen

berechnet. Es ist zu erkennen, dass die Ergebnisse des Szenarios S89 in beiden Beispielen eine deutlich höhere Wiederholbarkeit als die des Szenarios S84 aufweisen. Insbesondere für das Beispiel *Prinzengarten* wird in 402 Fällen (80%) das beste Ergebnis erreicht. Die Streuung der Ergebnisse ist für beide Beispiele bei S89 sehr gering. Selbst wenn als Optimierungsergebnis bei einmaliger Iteration das schlechteste aller erzielten Ergebnisse erreicht werden würde, würde die Zeit nur um 1.8 Minuten (*Prinzengarten*) bzw. um 5.4 Minuten (*Elbinsel*) von der besten Lösung abweichen. Für das Szenario S84 ist die Streuung der Ergebnisse insbesondere beim Beispiel *Elbinsel* größer. Im schlechtesten Fall ergibt sich bei einmaliger Iteration eine Lösung, die um knapp 11 Minuten von der besten Lösung abweicht. Bei einer Gesamtprozessdauer von mehr als 7 Stunden, ist diese Abweichung von der besten Lösung jedoch akzeptabel.

Für das Szenario S100 wird die Wiederholbarkeit für das Beispiel *Elbinsel* nochmal gesteigert. Statt 200 Generationen (wie in S89) werden hier 300 Generationen berechnet. In 59% der Berechnungen wird das beste Ergebnis erzielt. Beim Beispiel *Prinzengarten* werden in Szenario S100 weniger Lösungen ausgewertet als in Szenario S89. Das zeigt sich auch bei der Wiederholbarkeit der Lösungen. In 59% der Fälle wird die beste Lösung erreicht. Die Streuung der Werte ist aber ebenfalls sehr gering und beträgt weniger als 2 Minuten.

### Vergleich mit einer intuitiv gewählten Standpunktreihenfolge

Im nächsten Schritt wird das beste Ergebnis aus der Optimierung mit einer intuitiv gewählten Standpunktreihenfolge verglichen. Die intuitive Standpunktreihenfolge wurde so gewählt, dass die Wege für den Beobachter zwischen den einzelnen Beobachtungspunkten möglichst kurz sind. Tabelle 4.8 zeigt die Ergebnisse der intuitiven Standpunktreihenfolge und die der besten Lösung aus der Optimierung. Für das kleine Beispiel *Wilhelm Busch Museum* sind die Unterschiede sehr gering. Beim Beispielnetz *Prinzengarten* beträgt die Zeitersparnis knapp 20 Minuten. Für das Beispielnetz *Elbinsel* liegt die Zeitersparnis im Vergleich zum ersten intuitiven Lösungsvorschlag bei knapp 53 Minuten und im Vergleich zum zweiten Lösungsvorschlag bei knapp 30 Minuten.

Beim Vergleich der Ablauf-Diagramme fällt auf, dass der Beobachter bei der intuitiven Variante häufiger Wartezeiten hat. Diese Wartezeiten werden durch die Optimierung für alle Personen auf ein Minimum reduziert. Bei den Beispielen *Prinzengarten* und *Elbinsel* kommt noch dazu, dass auch die zurückgelegte Entfernung für alle Personen bei den optimierten Varianten geringer ist, als bei den intuitiven Varianten. Beim Beispiel *Wilhelm Busch Museum* unterscheiden sich die zurückgelegten Entfernungen kaum.

**Tabelle 4.8:** Gegenüberstellung der Ergebnisse der intuitiven Lösungen mit denen der besten Lösungen aus der Optimierung

Beispiel	Lösungsfindung	Reihenfolge der Standpunkte	Messdauer [Stunden]	Kosten [Euro]	Entfernung [km]
Wilhelm Busch Museum	intuitiv	P1-P2-P3-P4-P6-P7-P5	3.09	278.2	3.58
	Optimierung	P1-P2-P5-P6-P4-P7-P3	3.06	275.0	3.69
Prinzengarten	intuitiv	2012-5002-4001-2006-5006-5004-5005-5007-5008-5003-5009-5001-2013	5.33	480.0	9.51
	Optimierung	5008-5003-5009-5001-2013-2012-5002-2006-4001-5006-5004-5007-5005	5.02	452.2	8.85
Elbinsel	intuitiv 1	N1-N2-N3-N4-M8-M4-M2-M1-M3-M5-M6-M7-S4-S3-S2-S1	8.29	795.1	162.01
	intuitiv 2	S1-S2-S3-S4-M8-M4-M2-M1-M3-M5-M6-M7-N4-N3-N2-N1	7.89	761.4	171.03
	Optimierung	S4-S3-S2-S1-M8-M2-M1-M4-M6-M5-M3-M7-N2-N1-N3-N4	7.41	715.7	161.64

### 4.6.5 Praktikabilität

Aufgrund der grafischen Oberfläche des Programms SimPle-Net ist die Erzeugung von Beobachtungs- und Wegenetzen recht einfach (vgl. Abbildung 4.3 und A.1 bis A.6). Als Hintergründe können die Karten von Open Street Map, Google Maps oder Here Maps verwendet werden. Außerdem ist eine hybride Ansicht mit dem Material von Google Maps möglich. Die Kartendaten werden beim Aufruf des Programms automatisch aus dem Internet geladen. Demzufolge ist eine Verbindung mit dem Internet notwendig. Der Vorteil ist, dass immer die aktuellsten Karten zur Verfügung stehen. Über die Zeichenwerkzeuge ist ein Erzeugen, Löschen und Verschieben von Punkten und Linien möglich. Wurde ein Beobachtungs- und Wegenetz erzeugt, sollte es für die spätere Wiederverwendbarkeit als XML-Datei abgespeichert werden. Es kann dann jederzeit wieder ins GUI geladen werden.

Für die Planung der Messung im Vorfeld im Büro ist das Programm SimPle-Net im aktuellen Entwicklungsstadium sehr gut geeignet. Es wird ein leistungsstärkerer Rechner benötigt, wie der GIH-lokal mit den Spezifikationen in Tabelle 4.3, der die Optimierung der Netzmessung für kleine bis mittelgroße Netze mit einer guten Wiederholbarkeit der Ergebnisse in einer kurzen Rechenzeit berechnen kann. Für Netze mit einer größeren Standpunktanzahl kann die Rechenzeit sehr lang werden, bis eine gute Lösung erreicht wird. Für die Optimierung von großen Netzen sollte daher mehr Zeit eingeplant werden.

Im Außendienst kann der Ablaufplan (Tabelle A.5 und A.6) mit den detailliert aufgelisteten Arbeitsschritten sehr hilfreich sein, auch wenn nicht immer exakt die geplanten Zeiten eingehalten werden können. Der Beobachter muss dem Gehilfen nicht erklären, welche Punkte er als nächstes besetzen möchte und welche Punkte dafür auf- bzw. umgebaut werden müssen. Dadurch kann er sich nur auf die Durchführung der Messung konzentrieren.

Beim Auftreten von größeren Störungen während der Messung ist das Verfahren zur Zeit noch unflexibel. Es ist keine Neuberechnung möglich, bei der die bereits durchgeführten Beobachtungen automatisch aus der Optimierung herausgenommen werden. Sollten einzelne Beobachtungen nicht möglich sein, müssten diese von Hand gelöscht werden. Die bereits durchgeführten Beobachtungen müssten ebenfalls händisch gelöscht werden. Die Neuberechnung des editierten Netzes kann zudem im Außendienst sehr lange dauern, wenn kein leistungsstarker Rechner zur Verfügung steht.

Mit dem Ansatz zur Entwicklung eines elektronischen Feldbuchs in der Bachelorarbeit von Leßmann (2012), welches die optimierte Netzmessung einliest und die Nutzer durch die Messung leitet, wurde ein erster Entwicklungsschritt gemacht, um die bereits durchgeführten Messungen zu dokumentieren. Diese Informationen könnten dann für eine Neuberechnung der Netzoptimierung im Feld genutzt werden.

### 4.6.6 Zusammenfassung des Verfahrens zur Effizienzoptimierung von tachymetrischen Netzmessungen

Das entwickelte Verfahren der simulationsbasierten Optimierung mit den Petri-Netzen als Modellierungsverfahren und den GA als Optimierungsverfahren ist als Planungswerkzeug gut für die Effizienzoptimierung von tachymetrischen Netzmessungen geeignet.

Das Petri-Netz-Modell ließ sich mit etwas Übung gut für den Prozess der Netzmessung aufstellen. Der Nutzer des Programms kommt mit dem zugrundeliegenden Prozessmodell nicht in Kontakt, wodurch eine Einarbeitung in die Prozessmodellierung nicht erforderlich ist. Die Dauer des Prozesses konnte durch die Simulation mit den Petri-Netzen realistisch abgebildet werden, da Abhängigkeiten und Wartezeiten berücksichtigt werden. Auch eine Simulation mit stochastischen Werten für die Dauer der Tätigkeiten ist möglich (vgl. Abschnitt 2.4.4). Hierbei ist jedoch zuerst die Optimierung und daran anschließend die Berechnung mit stochastischen Dauern durchzuführen, da das Optimierungsergebnis sonst unter Umständen stark durch die Zufallszahlen beeinflusst wird.

Auch das Prinzip der farbigen Marken eignet sich sehr gut, um die Personen- und Punktinformationen (wie Position im Netz oder Aufbaustatus) in das Prozessmodell einzuführen. Für eine spätere Anpassung der Methodik zur besseren Reaktion auf Störungen während des Messprozesses, ist es sehr hilfreich, dass die Informationen in den Marken gespeichert werden, da diese dann sofort ohne aufwändige Abfragen in die neue Prozessoptimierung übernommen werden können.

Die genetischen Algorithmen eignen sich sehr gut für die Optimierung der tachymetrischen Netzmessung, da diese sehr komplex ist. Für kleine Messaufgaben und kleinere Netze wäre sicherlich auch ein anderes ggf. auch ein exaktes Optimierungsverfahren geeignet. Hier könnte die Implementierung von anderen Verfahren als der BF-Methode zu einer Verkürzung der Rechenzeit führen. Dieses Verfahren könnte dann auch für die Aufteilung der Punkte bei mehreren Personen eingesetzt werden. Anhand der erzielten Ergebnisse ist aber zu erkennen, dass die Optimierung mit den GA für die Beispielnetze eine gute Wiederholbarkeit der Ergebnisse liefert und Vorteile gegenüber der intuitiven Lösung bietet.

Für sehr große Netze ist die Vielfalt an möglichen Lösungen sehr groß, was eine Wiederholbarkeit der Ergebnisse in einer akzeptablen Rechenzeit nahezu unmöglich macht. Mit den empfohlenen Stellgrößen in Tabelle 4.7 werden in einer entsprechend längeren Rechenzeit aber dennoch gute Ergebnisse erzielt.

Die Ergebnisse der Optimierung hängen außerdem sehr stark von dem verwendeten Laufzeitmodell ab. Werden diese Zeiten verändert, verändert sich auch das Ergebnis der Optimierung. Es ist deshalb wichtig, ein möglichst passendes Laufzeitmodell für das zu optimierende Netz zu verwenden. Hier ist es sinnvoll sich weitere Erfassungsmöglichkeiten zur Ableitung der Tätigkeitsdauern zu überlegen.

# 5 Zusammenfassung und Ausblick

## 5.1 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde ein Verfahren zur simulationsbasierten Effizienzoptimierung von Messprozessen entwickelt. Ein besonderer Fokus wurde auf die tachymetrische Netzmessung gelegt, da sie ein sehr komplexer Messprozess ist, der bisher nicht durch andere Verfahren abgebildet werden konnte.

Es wurden verschiedene Messprozesse mithilfe von Petri-Netzen modelliert. Unter Verwendung des aufgestellten Laufzeitmodells kann eine Simulation der Prozessdauer erfolgen. Das Laufzeitmodell ist so angelegt, dass sowohl deterministische als auch stochastische Werte für die Tätigkeitsdauern berücksichtigt werden können. Aus der Prozessdauer können mithilfe des Kostenmodells die Prozesskosten abgeleitet werden.

Durch die realitätsnahe Modellierung und Simulation der Messprozesse eröffnet sich die Möglichkeit einer Integration in übergeordnete Prozesse (z. B. Bauprozesse). In dem DFG-Projekt EQuIP (Effizienzoptimierung und Qualitätssicherung ingenieurgeodätischer Prozesse im Bauwesen) mit der Fördernummer KU 1250/10-1/2 wurde diese Vorgehensweise erfolgreich umgesetzt (Rinke u. a. (2012); Kochkine u. a. (2012); Rinke u. a. (2017)).

Des Weiteren ist eine Optimierung der Abläufe möglich. Für die Effizienzoptimierung von tachymetrischen Netzmessungen wurde das Programm SimPle-Net entwickelt. In der Simulation können die Parameter der Standpunktfolgenfolge, der Auf- und Abbaureihenfolge sowie die Personenanzahl und die Aufteilung der Punkte auf die einzelnen Personen variiert werden. Über einen Vergleich der Prozessdauer oder der Prozesskosten wird mithilfe eines Optimierungsverfahrens die beste zeitliche Anordnung der Tätigkeiten ermittelt.

Aufgrund der Komplexität der tachymetrischen Netzmessung werden genetische Algorithmen (GA) verwendet. Die Komplexität erhöht sich rapide mit steigender Anzahl von Beobachtungspunkten. Daraus folgt auch eine längere Rechenzeit für die Durchführung der Optimierung und eine geringere Wiederholbarkeit der Ergebnisse. Das zeigt sich auch in den durchgeführten Parameterstudien. Für das kleine Beispiel mit sieben Punkten konnte eine sehr gute Wiederholbarkeit beim Erreichen der optimalen Lösung festgestellt werden. Für die Beispiele mit 13 und 16 Punkten werden ebenfalls gute Ergebnisse erzielt, allerdings müssen die Individuen- und Generationenanzahl auf die Punktzahl des Beobachtungsnetzes angepasst werden. Hierfür werden auf Grundlage der umfangreichen Parameterstudien Werte zur Einstellung der Stellgrößen in den genetischen Algorithmen vorgeschlagen. Die maximale Netzgröße, die bisher mit dem entwickelten Verfahren optimiert wurde, liegt bei 20 Beobachtungspunkten.

Verglichen mit eigenen intuitiv erstellten Messvarianten wurde eine Verringerung der Prozessdauer erreicht. Dabei zeigt sich, dass nicht unbedingt die kürzesten Wege des Beobachters zwischen den Messpunkten entscheidend sind. Vielmehr ist es wichtig, dass die Tätigkeiten gut aufeinander abgestimmt sind und möglichst wenig Wartezeiten für alle Personen entstehen. Positiv hervorzuheben ist außerdem die gute Dokumentation der Ergebnisse. Durch die Erstellung von detaillierten Ablaufplänen wissen alle an der Messung beteiligten Personen, was wann zu tun ist. Die Messzeit verlängert sich dann nicht durch Zeiten, die für die Absprache der nächsten Schritte benötigt werden.

Obwohl das entwickelte Verfahren zur Optimierung der Netzmessung für große Netze sehr rechenintensiv ist, lässt es sich als Planungswerkzeug sehr gut nutzen. Bei der Planung im Vorfeld der Messung ist es in der Regel nicht entscheidend, dass die Ablaufplanung innerhalb weniger Minuten zur Verfügung steht. Dadurch, dass das Anlegen des Netzes in SimPle-Net mit dem GUI in relativ kurzer Zeit möglich ist und die Optimierung automatisch abläuft, muss lediglich ein aktueller Computer mit einem guten Prozessor mit mindestens vier Kernen zur Verfügung stehen.

Das neu entwickelte Verfahren zur Optimierung der tachymetrischen Netzmessung trägt dazu bei, dass erstmalig umfangreiche a-priori Analysen der Messung durchgeführt werden können. Dadurch ist eine bessere Anordnung der Tätigkeiten sowie eine bessere Abstimmung der Personenanzahl auf die Netzgröße möglich. In Verbindung mit den detaillierten Ablaufplänen ist ein kosteneffizientes Arbeiten möglich.

## 5.2 Ausblick

Wie bereits erwähnt, hängen die Ergebnisse der Optimierung stark vom verwendeten Laufzeitmodell ab. Zur optimalen Nutzung der Netzoptimierung ist daher ein möglichst zutreffendes Laufzeitmodell aufzustellen, welches auch von Netz zu Netz variieren kann. Bei Netzen, die häufiger gemessen werden, wie z. B. Überwachungsmessungen an Staumauern oder ähnlichen Bauwerken, könnte sich der Aufwand für die Erfassung eines speziellen Laufzeitmodells lohnen. Hierfür ist eine möglichst automatische Erfassung und Auswertung der Verweildauern an den einzelnen Messpunkten anzustreben. In von Gösseln (2012) wird ein Vorschlag zur Ableitung der Tätigkeitsdauern und der Attribute für die Wegekanten mit GPS-Loggern gemacht. Damit die Ableitung der Tätigkeitsdauern aus der GPS-Trajektorie der einzelnen Personen möglich ist, müssen weitere methodische Entwicklungen erfolgen. Zur Ableitung der durchgeführten Tätigkeiten einer Person, müssen zusätzliche Informationen in den Analyseprozess integriert werden. Wie diese Integration erfolgen kann, muss noch herausgearbeitet werden. Eine weitere Möglichkeit zur Erfassung des Laufzeitmodells könnte eine Expertenbefragung mit möglichst vielen Experten sein.

Ein anderer wichtiger Punkt für die Erweiterung des entwickelten Ansatzes ist die Reaktionsfähigkeit auf Störungen bei der Messung im Feld. Gerade auf Baustellen mit Bautätigkeit kommt es vor, dass einzelne Sichten kurzfristig nicht möglich sind oder Punkte zeitweise nicht besetzt werden können. Eine Reaktion auf solche Gegebenheiten ist im aktuellen Entwicklungsstand nicht möglich. Hierauf wurde bereits im Abschnitt 4.6.5 auf S. 93 eingegangen. Für eine praktikable Neuberechnung der Netzoptimierung im Feld müssen die bereits durchgeführten Messungen dokumentiert werden. Diese Informationen können dann für eine Neuoptimierung genutzt werden, indem nur noch der Teil des Netzes optimiert wird, der gemessen werden muss. Für einige Messprozesse bietet sich eine Modularisierung und Hierarchisierung des Prozesses an, wie es in Abschnitt 2.3.4 vorgeschlagen wurde. Erste Ansätze dazu werden in Rinke u. a. (2012) und Rinke u. a. (2017) für die Integration „einfacher“ Messprozesse in Bauprozesse gezeigt. Ob eine Modularisierung und Hierarchisierung des Prozessmodells für eine tachymetrische Netzmessung ebenfalls in Frage kommt, muss in Zukunft genauer analysiert werden.

Unter Umständen können auch einzelne Beobachtungen weggelassen werden, ohne die Qualität (Genauigkeit, Zuverlässigkeit) des Netzes entscheidend zu beeinflussen. Um das im Feld beurteilen zu können, müssen die Qualitätsparameter mit in den Optimierungsprozess einbezogen werden. Dann könnte der Beobachtungsplan verändert werden und eine Neuberechnung der Qualitätsparameter zeigt dem Beobachter an, ob seine Anforderungen mit dem neuen Beobachtungsplan eingehalten werden kann. Hierfür bedarf es der Integration einer Nutzerinteraktion in das Programm SimPle-Net, damit der Beobachter letztendlich entscheiden kann, welchen der empfohlenen Wege er wählt. Falls es sich nur um eine kurzfristige Störung handelt, würde er ggf. eine kurze Wartezeit in Kauf nehmen, ohne den Ablaufplan neu zu berechnen oder auf die Beobachtung verzichten.

Aufgrund der ohnehin schon sehr großen Komplexität des Optimierungsproblems wird zunächst davon abgesehen, eine grundsätzliche Erzeugung des Beobachtungsplans mit SimPle-Net unter Einbeziehung der Qualitätsanforderungen vorzunehmen. Vorstellbar ist allerdings, dass verschiedene Messverfahren gegenübergestellt werden. Bei der Netzmessung können das GNSS und Tachymetrie sein. Hier kann überprüft werden, ob die Qualitätsanforderungen mit beiden Messverfahren (und den jeweils eingegebenen Beobachtungsplänen) eingehalten werden. Mithilfe der simulationsbasierten Optimierung können dann die Messkosten und die Messdauer berechnet werden und eine Bewertung der beiden Verfahren erfolgen. Hierfür muss ein Petri-Netz-Modell der GNSS-Netzmessung aufgestellt werden und eine Integration der Qualitätsparameter implementiert werden.

Die GA haben sich als passendes Optimierungsverfahren zur Effizienzoptimierung der tachymetrischen Netzmessung erwiesen. Da außer dem Simulated Annealing und der BF-Methode aber keine weiteren Optimierungsverfahren eingehend für die Optimierung dieses Messprozesses getestet wurden, könnte dies in Zukunft erfolgen.

Weitere Entwicklungsmöglichkeiten des vorgestellten Ansatzes zur tachymetrischen Netzmessung werden bei der Berücksichtigung von Sonderfällen gesehen. Folgende Szenarien sind hier denkbar:

- Clustern von Teilnetzen für die Messung an mehreren Tagen oder mit mehreren Trupps.
- Berücksichtigung, dass dem Beobachter kein Auto zur Verfügung steht. In dem Fall kann er Strecken zu Fuß gehen oder wird bei weiten Strecken vom Gehilfen gefahren.
- Bei hochgenauen Netzmessungen erfolgt zu Beginn des Messtages eine Instrumentenkalibrierung, welche in den Ablaufplan integriert werden könnte.



# A Anhang

## A.1 GUI des entwickelten Programms SimPle-Net

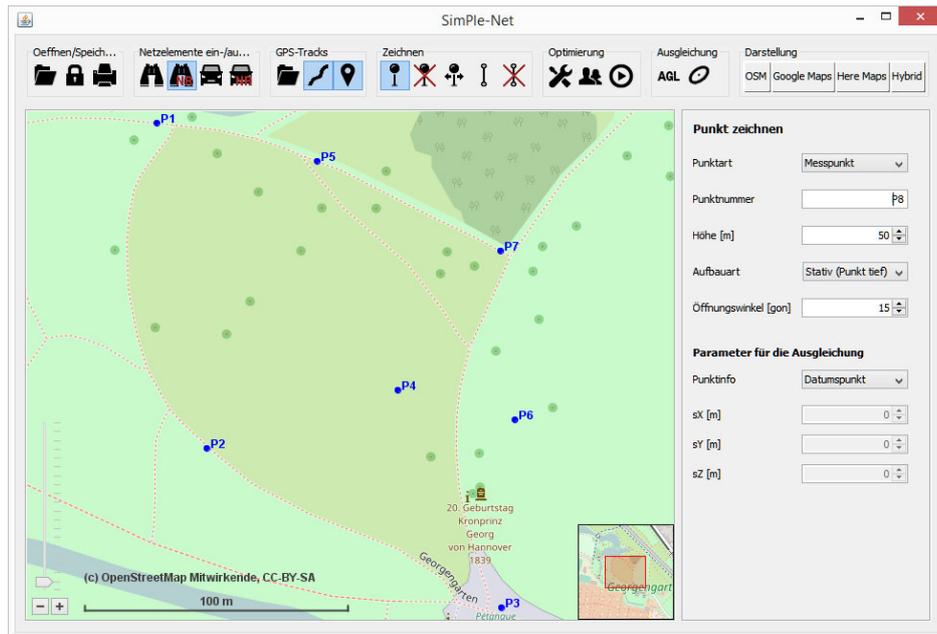


Abbildung A.1: Eingabe der Messpunkte

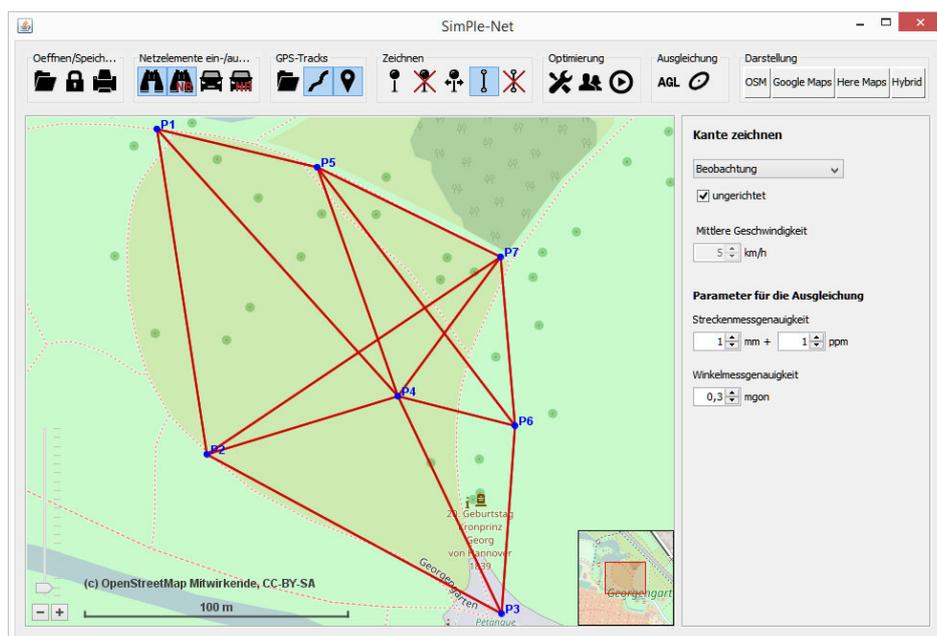


Abbildung A.2: Eingabe der Beobachtungen

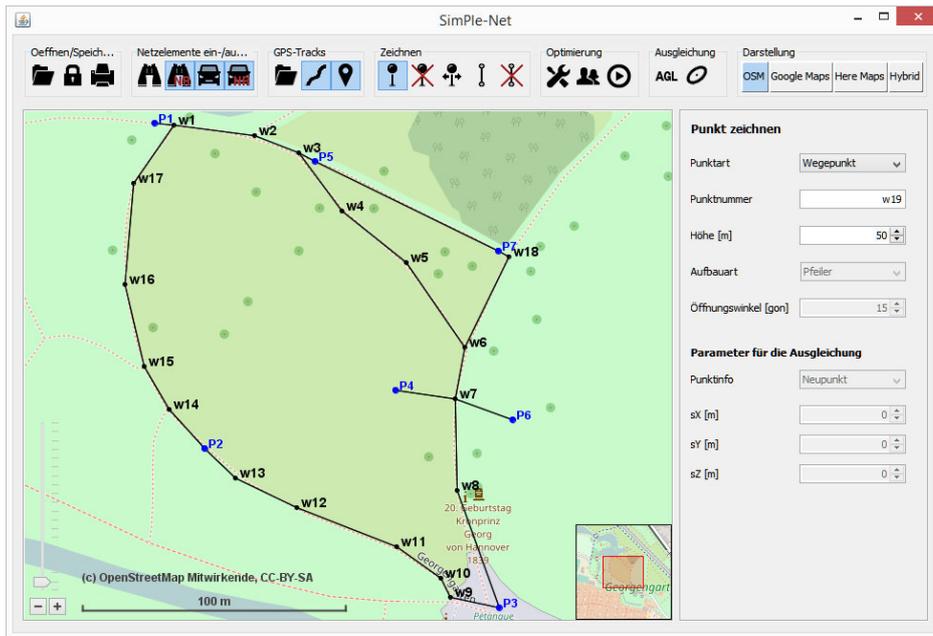


Abbildung A.3: Eingabe der Wegpunkte

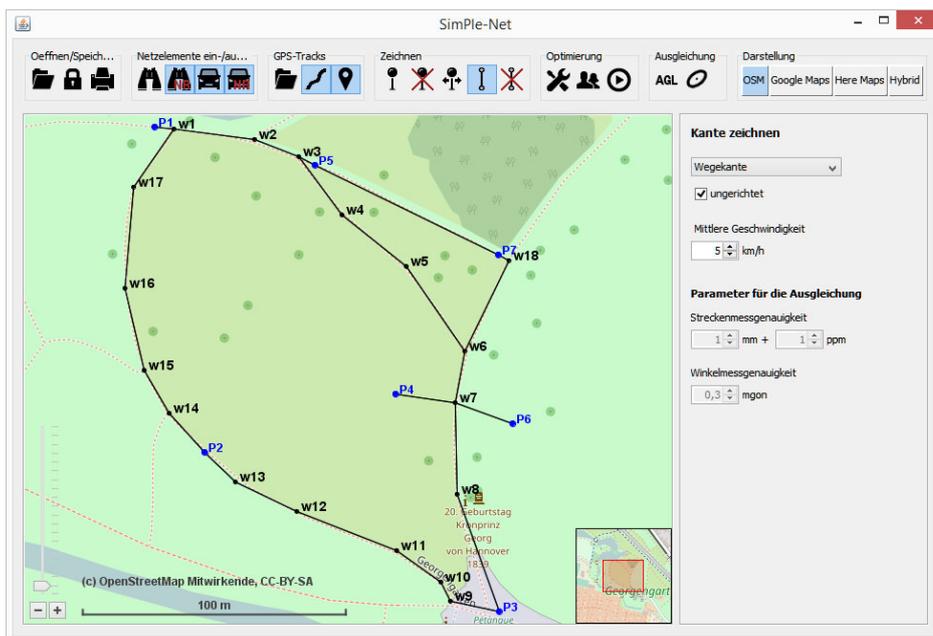


Abbildung A.4: Eingabe der Wegekanten

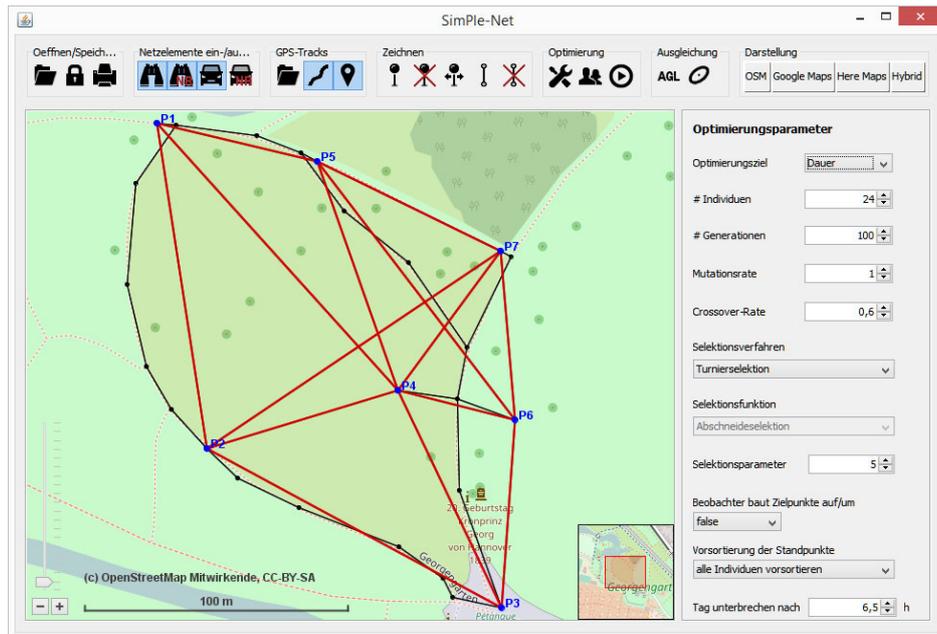


Abbildung A.5: Eingabe der Optimierungsparameter

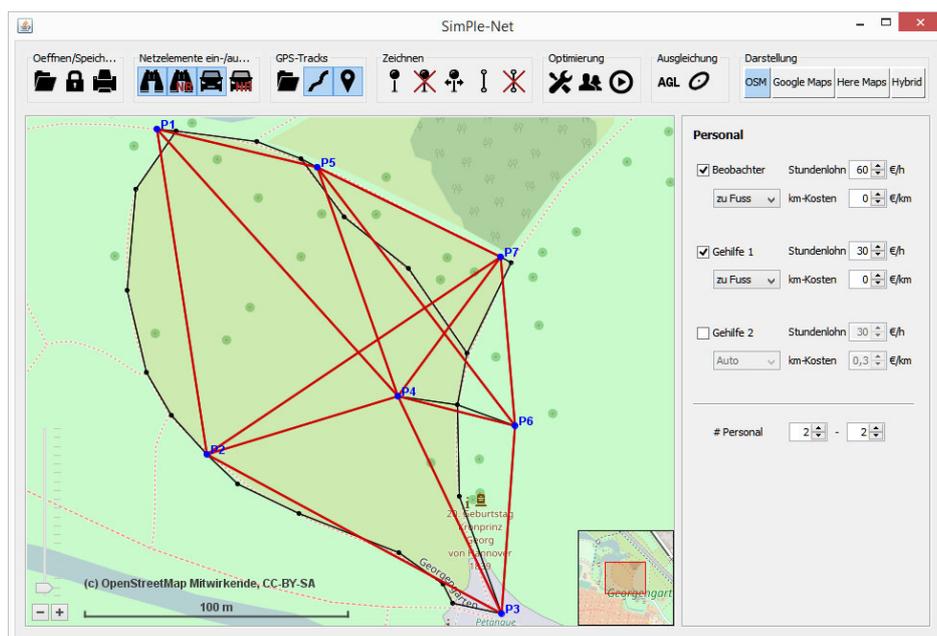


Abbildung A.6: Eingabe der Personendaten

## A.2 XML-Schemata

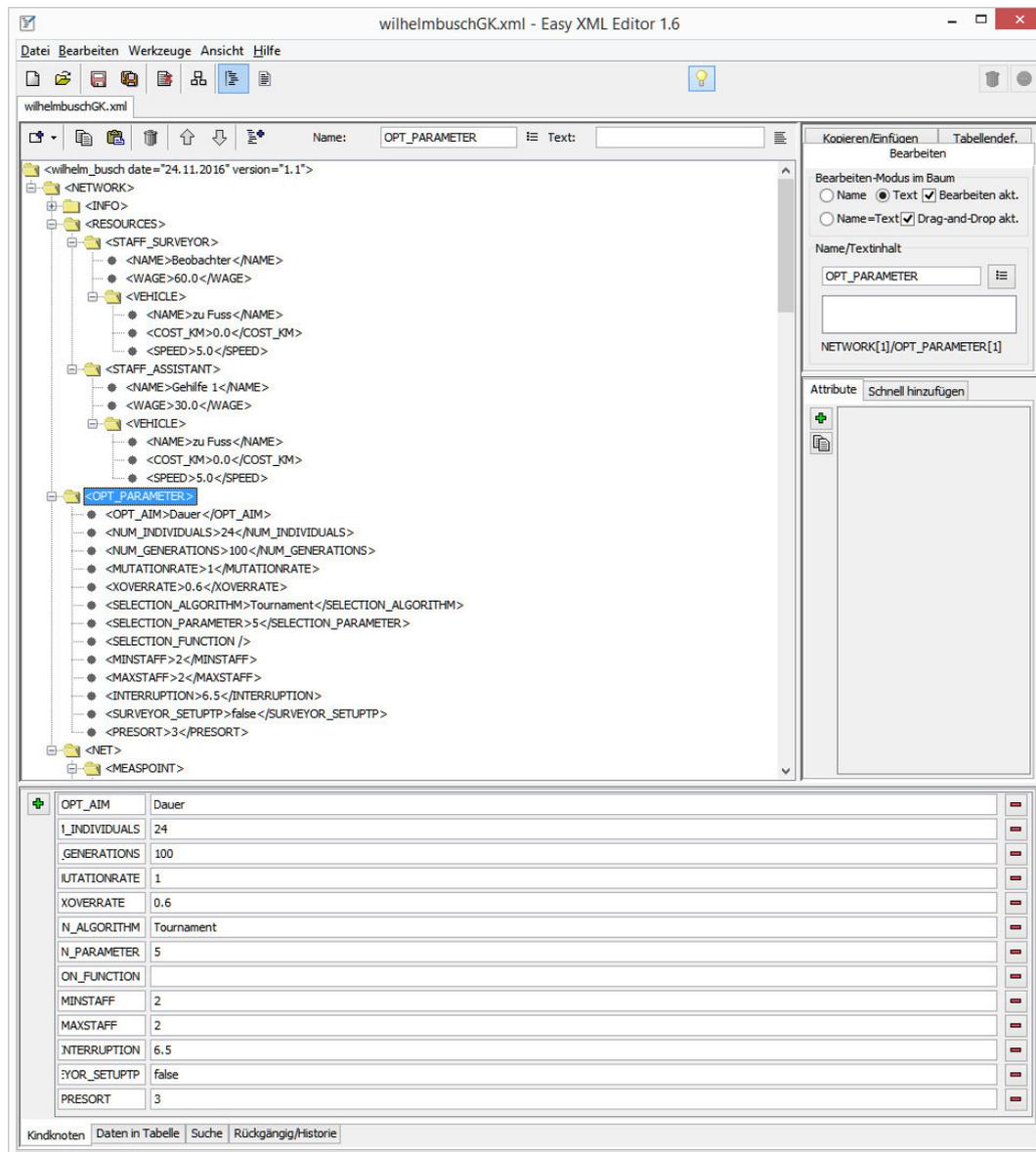


Abbildung A.7: Wilhelm Busch Museum: Speicherung der Netzdaten in einer XML-Datei (hier: Personendaten und Optimierungsparameter)

Tabelle A.1: Wilhelm Busch Museum: Attribute der Wegepunkte in der XML-Datei

PATHNODE							
PNO	X	Y	Z	PNO	X	Y	Z
	[m]	[m]	[m]		[m]	[m]	[m]
w11	3548206.56	5805947.22	50.0	w15	3548109.83	5806014.78	50.0
w10	3548223.12	5805935.00	50.0	w4	3548184.49	5806074.90	50.0
w7	3548228.29	5806003.55	50.0	w5	3548208.79	5806055.82	50.0
w14	3548119.49	5805998.48	50.0	w18	3548247.85	5806058.39	50.0
w12	3548168.43	5805961.43	50.0	w1	3548119.89	5806107.42	50.0
w13	3548144.58	5805972.85	50.0	w2	3548150.61	5806103.71	50.0
w3	3548167.48	5806096.96	50.0	w16	3548102.22	5806046.04	50.0
w9	3548227.20	5805928.11	50.0	w8	3548229.00	5805968.94	50.0
w6	3548231.75	5806023.26	50.0	w17	3548105.13	5806085.05	50.0

Tabelle A.2: Wilhelm Busch Museum: Attribute der Messpunkte in der XML-Datei

MEASPOINT										
PNO	PID	X [m]	Y [m]	Z [m]	SETUP TYPE	APERTURE _ANGLE[gon]	PINFO	sX [m]	sY [m]	sZ [m]
P1	0	3548112.94	5806108.08	50.0	US	15	DPT	0	0	0
P6	1	3548250.28	5805996.11	50.0	US	15	DPT	0	0	0
P7	2	3548244.17	5806060.54	50.0	US	15	DPT	0	0	0
P2	3	3548133.15	5805983.85	50.0	US	15	DPT	0	0	0
P3	4	3548245.87	5805924.29	50.0	US	15	DPT	0	0	0
P4	5	3548205.61	5806006.97	50.0	US	15	DPT	0	0	0
P5	6	3548173.71	5806094.10	50.0	US	15	DPT	0	0	0

Tabelle A.3: Wilhelm Busch Museum: Attribute der Beobachtungen in der XML-Datei

TSOBSERVATION									
FROM	TO	DIST _ERROR [mm]	DIST _PPM [mm/km]	DIRECTION _ERROR [mgon]	FROM	TO	DIST _ERROR [mm]	DIST _PPM [mm/km]	DIRECTION _ERROR [mgon]
P6	P5	1	1	0.3	P4	P3	1	1	0.3
P1	P4	1	1	0.3	P6	P4	1	1	0.3
P7	P6	1	1	0.3	P1	P5	1	1	0.3
P3	P2	1	1	0.3	P2	P3	1	1	0.3
P3	P4	1	1	0.3	P1	P2	1	1	0.3
P2	P1	1	1	0.3	P5	P6	1	1	0.3
P2	P4	1	1	0.3	P4	P5	1	1	0.3
P4	P7	1	1	0.3	P4	P2	1	1	0.3
P5	P4	1	1	0.3	P2	P7	1	1	0.3
P7	P2	1	1	0.3	P4	P1	1	1	0.3
P7	P4	1	1	0.3	P6	P3	1	1	0.3
P6	P7	1	1	0.3	P5	P7	1	1	0.3
P5	P1	1	1	0.3	P4	P6	1	1	0.3
P3	P6	1	1	0.3	P7	P5	1	1	0.3

Tabelle A.4: Wilhelm Busch Museum: Attribute der Wegekanten in der XML-Datei

EDGE									
FROM	TO	DURATION [Min]	DISTANCE [m]	KMH [km/h]	FROM	TO	DURATION [Min]	DISTANCE [m]	KMH [km/h]
P5	P7	0.9	78	5	w4	w3	0.3	27.9	5
w13	P2	0.2	15.9	5	w1	w2	0.4	30.9	5
P3	w9	0.2	19.1	5	w11	w10	0.2	20.6	5
w9	w10	0.1	8	5	w12	w11	0.5	40.7	5
w18	P7	0.1	4.3	5	P2	w13	0.2	15.9	5
w10	w11	0.2	20.6	5	w5	w4	0.4	30.9	5
w6	w5	0.5	39.8	5	w4	w5	0.4	30.9	5
w18	w6	0.5	38.6	5	w14	P2	0.2	20	5
w8	P3	0.6	47.7	5	w6	w18	0.5	38.6	5
w7	w8	0.4	34.6	5	w2	w1	0.4	30.9	5
w15	w14	0.2	18.9	5	P3	w8	0.6	47.7	5
w17	w1	0.3	26.8	5	P1	w1	0.1	7	5
w1	w17	0.3	26.8	5	w3	w2	0.2	18.2	5
P6	w7	0.3	23.2	5	w16	w17	0.5	39.1	5
P5	w3	0.1	6.9	5	P7	w18	0.1	4.3	5
w9	P3	0.2	19.1	5	w13	w12	0.3	26.4	5
w7	w6	0.2	20	5	w12	w13	0.3	26.4	5
w1	P1	0.1	7	5	w7	P6	0.3	23.2	5
w10	w9	0.1	8	5	w15	w16	0.4	32.2	5
w7	P4	0.3	22.9	5	P7	P5	0.9	78	5
P4	w7	0.3	22.9	5	w14	w15	0.2	18.9	5
w3	w4	0.3	27.9	5	w17	w16	0.5	39.1	5
w6	w7	0.2	20	5	w5	w6	0.5	39.8	5
w8	w7	0.4	34.6	5	w11	w12	0.5	40.7	5
P2	w14	0.2	20	5	w16	w15	0.4	32.2	5
w2	w3	0.2	18.2	5	w3	P5	0.1	6.9	5

### A.3 Dokumentation der Netzoptimierung

**Tabelle A.5:** *Wilhelm Busch Museum: Ablaufplan für den Beobachter*

Start [Min]	Ende [Min]	von Punkt	nach Punkt	Entfernung [m]	Tätigkeit	Ausrichtung zu	Messpunkte
0.0	11.0	Außen	P1	0	Aufbau SP		
25.6	32.8	P1	P1	0	Messung		P4, P5, P2
32.8	37.0	P1	P1	0	Umbau	P2	
37.0	47.2	P1	P2	144	Umbau SP		
47.2	56.9	P2	P2	0	Messung		P1, P3, P7, P4
56.9	61.1	P2	P2	0	Umbau	P4	
61.1	71.9	P2	P5	193	Umbau SP		
71.9	81.6	P5	P5	0	Messung		P6, P4, P7, P1
81.6	85.7	P5	P5	0	Umbau	P6	
85.7	96.0	P5	P6	148.7	Umbau SP		
96.0	105.7	P6	P6	0	Messung		P3, P5, P4, P7
105.7	109.8	P6	P6	0	Umbau	P4	
109.8	118.9	P6	P4	46.1	Umbau SP		
118.9	133.4	P4	P4	0	Messung		P2, P1, P6, P5, P7, P3
133.4	137.6	P4	P4	0	Umbau	P7	
137.6	147.1	P4	P7	85.9	Umbau SP		
147.1	156.8	P7	P7	0	Messung		P4, P6, P5, P2
156.8	159.3	P7	P7	0	Abbau		
159.3	169.5	P7	P3	145.3	Umbau SP		
169.5	176.8	P3	P3	0	Messung		P2, P4, P6
176.8	179.3	P3	P3	0	Abbau		
179.3	183.3	P3	P2	130.6	Abbau		

**Tabelle A.6:** *Wilhelm Busch Museum: Ablaufplan für den Gehilfen*

Start [Min]	Ende [Min]	von Punkt	nach Punkt	Entfernung [m]	Tätigkeit	Ausrichtung zu
0.0	7.2	Außen	P4	0	Aufbau	P1
7.2	16.1	P4	P5	148.4	Aufbau	P1
16.1	25.6	P5	P2	193	Aufbau	P1
25.6	34.3	P2	P3	130.6	Aufbau	P2
34.3	43.2	P3	P7	145.3	Aufbau	P2
43.2	44.4	P7	P4	85.9	Drehen	P2
47.2	55.0	P4	P6	46.1	Aufbau	P5
56.9	57.6	P6	P4	46.1	Drehen	P5
57.6	58.8	P4	P7	85.9	Drehen	P5
58.8	60.7	P7	P1	141	Drehen	P5
71.9	75.1	P1	P3	257	Drehen	P6
81.6	83.0	P3	P4	105.3	Drehen	P6
83.0	84.2	P4	P7	85.9	Drehen	P6
96.0	97.9	P7	P1	141	Drehen	P4
105.7	106.6	P1	P5	63	Drehen	P4
106.6	107.7	P5	P7	78	Drehen	P4
107.7	109.6	P7	P3	145.3	Drehen	P4
133.4	134.8	P3	P6	105.6	Drehen	P7
134.8	136.8	P6	P5	148.7	Drehen	P7
136.8	140.0	P5	P1	63	Abbau	
140.0	141.9	P1	P2	144	Drehen	P7
156.8	156.9	P2	P2	0	Drehen	P3
156.9	161.8	P2	P5	193	Abbau	
161.8	163.7	P5	P4	148.4	Drehen	P3
163.7	164.4	P4	P6	46.1	Drehen	P3
176.8	179.3	P6	P6	0	Abbau	
179.3	182.3	P6	P4	46.1	Abbau	



Abbildung A.8: Wilhelm Busch Museum: Ablauf-Diagramm der Tätigkeiten

## A.4 Koordinaten und Wegenetze der Beispiele

### A.4.1 Beispiel Wilhelm Busch Museum

Tabelle A.7: *Wilhelm Busch Museum: Distanzmatrix - Dauer [Minuten]*

	P1	P6	P7	P2	P3	P4	P5
P1	0	2.4	1.7	1.7	3.1	2.4	0.8
P6	2.4	0	1.0	2.8	1.3	0.6	1.8
P7	1.7	1.0	0	3.3	1.7	1.0	0.9
P2	1.7	2.8	3.3	0	1.6	2.8	2.3
P3	3.1	1.3	1.7	1.6	0	1.3	2.5
P4	2.4	0.6	1.0	2.8	1.3	0	1.8
P5	0.8	1.8	0.9	2.3	2.5	1.8	0

Tabelle A.8: *Wilhelm Busch Museum: Distanzmatrix - Entfernung [Meter]*

	P1	P6	P7	P2	P3	P4	P5
P1	0	197.9	141.0	144.0	257.0	197.6	62.9
P6	197.9	0	86.1	236.2	105.6	46.2	148.7
P7	141.0	86.1	0	271.1	145.2	85.9	78.0
P2	144.0	236.2	271.1	0	130.6	235.9	193.0
P3	257.0	105.6	145.2	130.6	0	105.3	207.8
P4	197.6	46.2	85.9	235.9	105.3	0	148.4
P5	62.9	148.7	78.0	193.0	207.8	148.4	0

Tabelle A.9: *Wilhelm Busch Museum: Routen*

	P1	P6	P7	P2	P3	P4	P5
P1	P1	P1-w1-w2-w3-w4-w5-w6-w7-P6	P1-w1-w2-w3-P5-P7	P1-w1-w17-w16-w15-w14-P2	P1-w1-w2-w3-w4-w5-w6-w7-w8-P3	P1-w1-w2-w3-w4-w5-w6-w7-P4	P1-w1-w2-w3-P5
P6	P6-w7-w6-w5-w4-w3-w2-w1-P1	P6	P6-w7-w6-w18-P7	P6-w7-w8-P3-w9-w10-w11-w12-w13-P2	P6-w7-w8-P3	P6-w7-P4	P6-w7-w6-w5-w4-w3-P5
P7	P7-P5-w3-w2-w1-P1	P7-w18-w6-w7-P6	P7	P7-P5-w3-w2-w1-w17-w16-w15-w14-P2	P7-w18-w6-w7-w8-P3	P7-w18-w6-w7-P4	P7-P5
P2	P2-w14-w15-w16-w17-w1-P1	P2-w13-w12-w11-w10-w9-P3-w8-w7-P6	P2-w14-w15-w16-w17-w1-w2-w3-P5-P7	P2	P2-w13-w12-w11-w10-w9-P3	P2-w13-w12-w11-w10-w9-P3-w8-w7-P4	P2-w14-w15-w16-w17-w1-w2-w3-P5
P3	P3-w8-w7-w6-w5-w4-w3-w2-w1-P1	P3-w8-w7-P6	P3-w8-w7-w6-w18-P7	P3-w9-w10-w11-w12-w13-P2	P3	P3-w8-w7-P4	P3-w8-w7-w6-w5-w4-w3-P5
P4	P4-w7-w6-w5-w4-w3-w2-w1-P1	P4-w7-P6	P4-w7-w6-w18-P7	P4-w7-w8-P3-w9-w10-w11-w12-w13-P2	P4-w7-w8-P3	P4	P4-w7-w6-w5-w4-w3-P5
P5	P5-w3-w2-w1-P1	P5-w3-w4-w5-w6-w7-P6	P5-P7	P5-w3-w2-w1-w17-w16-w15-w14-P2	P5-w3-w4-w5-w6-w7-w8-P3	P5-w3-w4-w5-w6-w7-P4	P5

## A.4.2 Beispiel Prinzengarten

Tabelle A.10: Prinzengarten: Attribute der Messpunkte in der XML-Datei

MEASPOINT										
PNO	PID	X [m]	Y [m]	Z [m]	SETUP TYPE	APERTURE _ANGLE[gon]	PINFO	sX [m]	sY [m]	sZ [m]
5001	1	3548764.9	5805982.8	50	US	15	DPT	0	0	0
2006	2	3548795.3	5805905.5	50	US	15	DPT	0	0	0
5006	3	3548885.6	5805842.8	50	ST	15	DPT	0	0	0
2023	4	3548750.9	5805865.5	50	US	15	DPT	0	0	0
5002	5	3548710.7	5805907.2	50	US	15	DPT	0	0	0
5004	6	3548901.3	5805907.4	50	ST	15	DPT	0	0	0
3003	7	3548696.4	5805887.7	50	US	15	DPT	0	0	0
2013	8	3548708.1	5806022.1	50	US	15	DPT	0	0	0
5008	9	3548984.9	5805989.1	50	ST	15	DPT	0	0	0
2012	10	3548648.7	5805946.6	50	US	15	DPT	0	0	0
5009	11	3548834.0	5805996.9	50	ST	15	DPT	0	0	0
2011	12	3548696.2	5806003.4	50	US	15	DPT	0	0	0
5003	13	3548929.3	5806002.8	50	ST	15	DPT	0	0	0
Basis	14	3548638.0	5806021.1	50	XX	15	BAS	0	0	0
4001	15	3548725.4	5805841.6	50	US	15	DPT	0	0	0
3002	16	3548717.1	5805926.7	50	US	15	DPT	0	0	0
5005	17	3548963.4	5805803.8	50	ST	15	DPT	0	0	0
5007	18	3548977.4	5805900.2	50	ST	15	DPT	0	0	0

Tabelle A.11: Prinzengarten: Distanzmatrix - Dauer [Minuten]

	5001	2006	5006	5002	5004	2013	5008	2012	5007	5009	5003	Basis	4001	5005
5001	0	2.0	2.9	2.4	2.8	0.9	2.7	2.1	3.8	0.9	2.0	2.0	3.2	4.4
2006	2.0	0	1.5	1.3	1.4	2.2	2.7	1.9	2.4	1.5	2.0	3.1	1.2	3.0
5006	2.9	1.5	0	2.7	1.6	3.6	3.3	3.3	2.7	2.4	2.9	4.4	2.7	1.9
5002	2.4	1.3	2.7	0	2.6	1.7	4.0	1.0	3.7	2.7	3.3	2.1	1.4	4.2
5004	2.8	1.4	1.6	2.6	0	3.5	1.7	3.2	1.1	2.3	2.1	4.4	2.6	1.7
2013	0.9	2.2	3.6	1.7	3.5	0	3.6	1.2	4.6	1.7	2.9	1.2	2.6	5.1
5008	2.7	2.7	3.3	4.0	1.7	3.6	0	4.6	1.1	1.9	0.7	4.7	4.0	2.2
2012	2.1	1.9	3.3	1.0	3.2	1.2	4.6	0	4.3	3.0	3.9	1.3	1.7	4.8
5007	3.8	2.4	2.7	3.7	1.1	4.6	1.1	4.3	0	2.9	1.8	5.4	3.7	1.2
5009	0.9	1.5	2.4	2.7	2.3	1.7	1.9	3.0	2.9	0	1.2	2.9	2.7	3.9
5003	2.0	2.0	2.9	3.3	2.1	2.9	0.7	3.9	1.8	1.2	0	4.0	3.2	2.9
Basis	2.0	3.1	4.4	2.1	4.4	1.2	4.7	1.3	5.4	2.9	4.0	0	2.9	6.0
4001	3.2	1.2	2.7	1.4	2.6	2.6	4.0	1.7	3.7	2.7	3.2	2.9	0	4.2
5005	4.4	3.0	1.9	4.2	1.7	5.1	2.2	4.8	1.2	3.9	2.9	6.0	4.2	0

Tabelle A.12: Prinzengarten: Distanzmatrix - Entfernung [Meter]

	5001	2006	5006	5002	5004	2013	5008	2012	5007	5009	5003	Basis	4001	5005
5001	0	164.1	240.4	199.5	234.5	72.5	227.0	174.8	316.3	72.6	168.5	168.7	266.1	369.5
2006	164.1	0	120.9	110.6	115.1	184.8	227.4	160.8	202.9	122.6	168.8	255.8	101.9	250.1
5006	240.4	120.9	0	224.2	133.8	298.5	275.0	274.5	221.6	198.9	245.1	369.5	222.9	160.4
5002	199.5	110.6	224.2	0	218.4	144.2	330.7	82.7	306.2	225.9	272.1	177.8	113.6	353.4
5004	234.5	115.1	133.8	218.4	0	292.6	141.2	268.6	87.9	193.0	177.3	363.7	217.0	145.3
2013	72.5	184.8	298.5	144.2	292.6	0	299.5	102.3	380.5	145.1	241.0	96.2	213.8	427.6
5008	227.0	227.4	275.0	330.7	141.2	299.5	0	381.0	89.3	154.4	58.5	395.7	329.3	186.6
2012	174.8	160.8	274.5	82.7	268.6	102.3	381.0	0	356.5	247.3	322.4	112.0	140.5	403.7
5007	316.3	202.9	221.6	306.2	87.9	380.5	89.3	356.5	0	243.7	147.8	451.5	304.9	97.3
5009	72.6	122.6	198.9	225.9	193.0	145.1	154.4	247.3	243.7	0	95.9	241.3	224.6	328.0
5003	168.5	168.8	245.1	272.1	177.3	241.0	58.5	322.4	147.8	95.9	0	337.2	270.8	245.2
Basis	168.7	255.8	369.5	177.8	363.7	96.2	395.7	112.0	451.5	241.3	337.2	0	245.5	498.7
4001	266.1	101.9	222.9	113.6	217.0	213.8	329.3	140.5	304.9	224.6	270.8	245.5	0	352.0
5005	369.5	250.1	160.4	353.4	145.3	427.6	186.6	403.7	97.3	328.0	245.2	498.7	352.0	0

### A.4.3 Beispiel Elbinsel

Tabelle A.13: *Elbinsel: Attribute der Messpunkte in der XML-Datei*

MEASPOINT										
PNO	PID	X [m]	Y [m]	Z [m]	SETUP TYPE	APERTURE _ANGLE[gon]	PINFO	sX [m]	sY [m]	sZ [m]
M1	0	3587192.2	5923329.4	1	ZW	15	DPT	0	0	0
M2	1	3587659.1	5923342.2	1	ZW	15	DPT	0	0	0
M3	2	3587586.6	5923174.4	1	ZW	15	DPT	0	0	0
M4	3	3588206.4	5923195.9	1	ZW	15	DPT	0	0	0
M5	4	3587992.7	5922853.2	1	ZW	15	DPT	0	0	0
M6	5	3588259.0	5922596.0	1	ZW	15	DPT	0	0	0
M7	6	3588763.7	5922477.5	1	ZW	15	DPT	0	0	0
M8	7	3588769.3	5923056.2	1	ZW	15	DPT	0	0	0
N1	8	3586881.6	5923387.7	1	ZW	15	DPT	0	0	0
N2	9	3587588.8	5923517.4	1	ZW	15	DPT	0	0	0
N3	10	3588130.6	5923416.4	1	ZW	15	DPT	0	0	0
N4	11	3588610.2	5923326.5	1	ZW	15	DPT	0	0	0
S1	12	3586958.6	5922996.3	1	ZW	15	DPT	0	0	0
S2	13	3587496.5	5922875.1	1	ZW	15	DPT	0	0	0
S3	14	3588116.9	5922253.6	1	ZW	15	DPT	0	0	0
S4	15	3588661.0	5921932.2	1	ZW	15	DPT	0	0	0

Tabelle A.14: *Elbinsel: Distanzmatrix - Dauer [Minuten]*

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	N1	N2	N3	N4	S1	S2	S3	S4
M1	0	0.8	0.7	1.8	1.7	3.3	3.4	3.0	8.4	7.2	6.4	5.4	11.3	9.4	8.9	7.3
M2	0.8	0	0.9	1.0	1.4	2.9	3.1	2.2	7.6	6.4	5.6	4.6	10.5	8.6	8.1	6.5
M3	0.7	0.9	0	1.3	1.0	2.6	2.7	2.5	7.9	6.6	5.8	4.8	10.7	8.8	8.4	6.8
M4	1.8	1.0	1.3	0	0.9	2.4	2.2	1.2	6.6	5.4	4.6	3.6	9.5	7.6	7.1	5.5
M5	1.7	1.4	1.0	0.9	0	1.5	1.6	2.0	7.4	6.2	5.4	4.4	10.3	8.4	7.9	6.4
M6	3.3	2.9	2.6	2.4	1.5	0	2.0	2.7	8.1	6.9	6.1	5.1	11.0	9.1	8.6	7.0
M7	3.4	3.1	2.7	2.2	1.6	2.0	0	1.1	6.4	5.2	4.4	3.4	9.3	7.4	6.9	5.4
M8	3.0	2.2	2.5	1.2	2.0	2.7	1.1	0	5.4	4.2	3.4	2.4	8.3	6.4	5.9	4.3
N1	8.1	7.3	7.6	6.3	7.1	7.8	6.1	5.1	0	2.2	2.8	3.0	12.0	10.1	9.7	8.1
N2	6.9	6.1	6.3	5.1	5.9	6.6	4.9	3.9	2.2	0	1.6	1.8	10.8	8.9	8.4	6.8
N3	6.1	5.3	5.5	4.3	5.1	5.8	4.1	3.1	2.8	1.6	0	1.0	10.0	8.1	7.6	6.0
N4	5.1	4.3	4.5	3.3	4.1	4.8	3.1	2.1	3.0	1.8	1.0	0	9.0	7.1	6.6	5.1
S1	11.5	10.7	10.9	9.7	10.5	11.2	9.5	8.5	12.5	11.2	10.4	9.4	0	4.0	5.4	6.4
S2	9.6	8.8	9.1	7.8	8.6	9.3	7.6	6.6	10.6	9.3	8.5	7.6	4.0	0	3.3	4.3
S3	9.1	8.3	8.6	7.3	8.2	8.8	7.2	6.1	10.1	8.9	8.1	7.1	5.4	3.3	0	2.3
S4	7.6	6.7	7.0	5.7	6.6	7.2	5.6	4.5	8.5	7.3	6.5	5.5	6.4	4.3	2.3	0

Tabelle A.15: *Elbinsel: Distanzmatrix - Entfernung [Meter]*

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	N1	N2	N3	N4	S1	S2	S3	S4
M1	0	467.1	423.8	1036.9	941.6	1357.7	1801.0	1617.3	5122.2	4357.6	3788.1	3262.8	6569.2	5609.1	4808.9	4132.4
M2	467.1	0	499.8	569.8	796.8	1212.9	1656.2	1150.2	4655.1	3890.5	3320.9	2795.6	6102.1	5142.0	4341.8	3665.3
M3	423.8	499.8	0	681.9	517.8	933.9	1377.2	1262.3	4767.1	4002.6	3433.0	2907.7	6214.2	5254.1	4453.9	3777.3
M4	1036.9	569.8	681.9	0	479.6	895.7	1159.9	580.4	4085.2	3320.6	2751.1	2225.8	5532.2	4572.2	3772.0	3095.4
M5	941.6	796.8	517.8	479.6	0	416.1	859.4	1060.0	4564.8	3800.2	3230.7	2705.4	6011.8	5051.8	4251.6	3575.0
M6	1357.7	1212.9	933.9	895.7	416.1	0	638.5	988.5	4493.3	3728.8	3159.2	2633.9	5940.4	4980.3	4180.1	3503.5
M7	1801.0	1656.2	1377.2	1159.9	859.4	638.5	0	579.5	4084.3	3319.7	2750.2	2224.9	5531.3	4571.3	3771.1	3094.5
M8	1617.3	1150.2	1262.3	580.4	1060.0	988.5	579.5	0	3504.8	2740.3	2170.7	1645.4	4951.9	3991.8	3191.6	2515.0
N1	4728.8	4261.7	4373.8	3691.9	4171.5	4100.0	3691.0	3111.5	0	881.7	1415.1	1859.4	7518.7	6558.6	5758.4	5081.9
N2	3964.2	3497.1	3609.2	2927.3	3406.9	3335.4	2926.4	2346.9	881.7	0	650.5	1094.8	6754.1	5794.1	4993.9	4317.3
N3	3394.7	2927.6	3039.7	2357.7	2837.3	2765.8	2356.8	1777.4	1415.1	650.5	0	525.3	6184.6	5224.5	4424.3	3747.8
N4	2869.4	2402.3	2514.4	1832.4	2312.0	2240.5	1831.5	1252.1	1859.4	1094.8	525.3	0	5659.3	4699.2	3899.0	3222.5
S1	6839.4	6372.3	6484.3	5802.4	6282.0	6210.5	5801.5	5222.0	7902.0	7137.4	6567.9	6042.6	0	675.0	1562.4	2202.3
S2	5879.3	5412.2	5524.3	4842.3	5321.9	5250.5	4841.4	4262.0	6941.9	6177.4	5607.8	5082.5	675.0	0	975.7	1615.6
S3	5079.1	4612.0	4724.1	4042.1	4521.7	4450.3	4041.2	3461.8	6141.7	5377.2	4807.6	4282.3	1562.4	975.7	0	738.6
S4	4402.5	3935.4	4047.5	3365.6	3845.2	3773.7	3364.7	2785.2	5465.2	4700.6	4131.1	3605.8	2202.3	1615.6	738.6	0

## A.5 Parameterstudien

Tabelle A.16: Tachymetrische Netzmessung: Berechnungsszenarien für die Parameterstudien

Szenario	Vorsortierung der SP	Anzahl Individuen	Anzahl Generationen	Mutationswahrscheinlichkeit	Crossoverwahrscheinlichkeit	Selektionsverfahren
S01	keine	24	100	0.8	0.2	Turnier (Gr. 5)
S02	keine	48	100	0.8	0.2	Turnier (Gr. 5)
S03	keine	96	100	0.8	0.2	Turnier (Gr. 5)
S04	keine	192	100	0.8	0.2	Turnier (Gr. 5)
S05	keine	24	200	0.8	0.2	Turnier (Gr. 5)
S06	keine	48	200	0.8	0.2	Turnier (Gr. 5)
S07	keine	96	200	0.8	0.2	Turnier (Gr. 5)
S08	keine	192	200	0.8	0.2	Turnier (Gr. 5)
S09	keine	192	400	0.8	0.2	Turnier (Gr. 5)
S10	keine	24	100	0.8	0.2	Turnier (Gr. #Ind/10)
S11	keine	48	100	0.8	0.2	Turnier (Gr. #Ind/10)
S12	keine	96	100	0.8	0.2	Turnier (Gr. #Ind/10)
S13	keine	192	100	0.8	0.2	Turnier (Gr. #Ind/10)
S14	keine	24	200	0.8	0.2	Turnier (Gr. #Ind/10)
S15	keine	48	200	0.8	0.2	Turnier (Gr. #Ind/10)
S16	keine	96	200	0.8	0.2	Turnier (Gr. #Ind/10)
S17	keine	192	200	0.8	0.2	Turnier (Gr. #Ind/10)
S18	keine	192	400	0.8	0.2	Turnier (Gr. #Ind/10)
S19	keine	24	100	0.8	0.2	Greedy (60%)
S20	keine	48	100	0.8	0.2	Greedy (60%)
S21	keine	96	100	0.8	0.2	Greedy (60%)
S22	keine	192	100	0.8	0.2	Greedy (60%)
S23	keine	24	200	0.8	0.2	Greedy (60%)
S24	keine	48	200	0.8	0.2	Greedy (60%)
S25	keine	96	200	0.8	0.2	Greedy (60%)
S26	keine	192	200	0.8	0.2	Greedy (60%)
S27	keine	192	400	0.8	0.2	Greedy (60%)
S28	keine	24	100	0.8	0.2	Roulette
S29	keine	48	100	0.8	0.2	Roulette
S30	keine	96	100	0.8	0.2	Roulette
S31	keine	192	100	0.8	0.2	Roulette
S32	keine	24	200	0.8	0.2	Roulette
S33	keine	48	200	0.8	0.2	Roulette
S34	keine	96	200	0.8	0.2	Roulette
S35	keine	192	200	0.8	0.2	Roulette
S36	keine	192	400	0.8	0.2	Roulette
S37	keine	24	100	0.8	0.6	Turnier (Gr. 5)
S38	keine	48	100	0.8	0.6	Turnier (Gr. 5)
S39	keine	96	100	0.8	0.6	Turnier (Gr. 5)
S40	keine	192	100	0.8	0.6	Turnier (Gr. 5)
S41	keine	24	200	0.8	0.6	Turnier (Gr. 5)
S42	keine	48	200	0.8	0.6	Turnier (Gr. 5)
S43	keine	96	200	0.8	0.6	Turnier (Gr. 5)
S44	keine	192	200	0.8	0.6	Turnier (Gr. 5)
S45	keine	192	400	0.8	0.6	Turnier (Gr. 5)
S46	keine	24	100	0.4	0.6	Turnier (Gr. 5)
S47	keine	48	100	0.4	0.6	Turnier (Gr. 5)
S48	keine	96	100	0.4	0.6	Turnier (Gr. 5)
S49	keine	192	100	0.4	0.6	Turnier (Gr. 5)
S50	keine	24	200	0.4	0.6	Turnier (Gr. 5)
S51	keine	48	200	0.4	0.6	Turnier (Gr. 5)
S52	keine	96	200	0.4	0.6	Turnier (Gr. 5)
S53	keine	192	200	0.4	0.6	Turnier (Gr. 5)
S54	keine	192	400	0.4	0.6	Turnier (Gr. 5)
S55	keine	24	100	0.4	0.2	Turnier (Gr. 5)
S56	keine	48	100	0.4	0.2	Turnier (Gr. 5)
S57	keine	96	100	0.4	0.2	Turnier (Gr. 5)
S58	keine	192	100	0.4	0.2	Turnier (Gr. 5)

Tabelle geht auf der nächsten Seite weiter

Fortsetzung von **Tabelle A.16**

Szenario	Vorsortierung der SP	Anzahl Individuen	Anzahl Generationen	Mutationswahrscheinlichkeit	Crossoverwahrscheinlichkeit	Selektionsverfahren
S59	keine	24	200	0.4	0.2	Turnier (Gr. 5)
S60	keine	48	200	0.4	0.2	Turnier (Gr. 5)
S61	keine	96	200	0.4	0.2	Turnier (Gr. 5)
S62	keine	192	200	0.4	0.2	Turnier (Gr. 5)
S63	keine	192	400	0.4	0.2	Turnier (Gr. 5)
S64	1	24	100	0.8	0.2	Turnier (Gr. 5)
S65	1	48	100	0.8	0.2	Turnier (Gr. 5)
S66	1	96	100	0.8	0.2	Turnier (Gr. 5)
S67	1	192	100	0.8	0.2	Turnier (Gr. 5)
S68	1	24	200	0.8	0.2	Turnier (Gr. 5)
S69	1	48	200	0.8	0.2	Turnier (Gr. 5)
S70	1	96	200	0.8	0.2	Turnier (Gr. 5)
S71	1	192	200	0.8	0.2	Turnier (Gr. 5)
S72	1	192	400	0.8	0.2	Turnier (Gr. 5)
S73	alle	24	100	0.8	0.2	Turnier (Gr. 5)
S74	alle	48	100	0.8	0.2	Turnier (Gr. 5)
S75	alle	96	100	0.8	0.2	Turnier (Gr. 5)
S76	alle	192	100	0.8	0.2	Turnier (Gr. 5)
S77	alle	24	200	0.8	0.2	Turnier (Gr. 5)
S78	alle	48	200	0.8	0.2	Turnier (Gr. 5)
S79	alle	96	200	0.8	0.2	Turnier (Gr. 5)
S80	alle	192	200	0.8	0.2	Turnier (Gr. 5)
S81	alle	192	400	0.8	0.2	Turnier (Gr. 5)
S82	alle	24	100	1.0	0.6	Turnier (Gr. 5)
S83	alle	48	100	1.0	0.6	Turnier (Gr. 5)
S84	alle	96	100	1.0	0.6	Turnier (Gr. 5)
S85	alle	192	100	1.0	0.6	Turnier (Gr. 5)
S86	alle	24	200	1.0	0.6	Turnier (Gr. 5)
S87	alle	48	200	1.0	0.6	Turnier (Gr. 5)
S88	alle	96	200	1.0	0.6	Turnier (Gr. 5)
S89	alle	192	200	1.0	0.6	Turnier (Gr. 5)
S90	alle	192	400	1.0	0.6	Turnier (Gr. 5)
S100	alle	$2(n_{\text{Pkte}} + n_{\text{Beo}})$	$3(n_{\text{Pkte}} + n_{\text{Beo}})$	1.0	0.6	Turnier (Gr. 5)

**Tabelle A.17:** *Wilhelm Busch Museum: Ergebnisse der Parameterstudien mit jeweils 100 Iterationen*  
Beste Lösung: 3.055 Stunden

Szenario	Minimale Messdauer [Std.]	Mittlere Messdauer [Std.]	Maximale Messdauer [Std.]	Standardabweichung [Std.]	Mittlere proz. Abw.	Maximale proz. Abw.	Beste Lsg erreicht
S01	3.055	3.055	3.060	0.001	0.0%	0.2%	93%
S02	3.055	3.055	3.055	0.000	0.0%	0.0%	100%
S03	3.055	3.055	3.055	0.000	0.0%	0.0%	100%
S04	3.055	3.055	3.055	0.000	0.0%	0.0%	100%
S10	3.055	3.056	3.060	0.002	0.0%	0.2%	81%
S11	3.055	3.055	3.055	0.000	0.0%	0.0%	100%
S12	3.055	3.055	3.055	0.000	0.0%	0.0%	100%
S13	3.055	3.055	3.055	0.000	0.0%	0.0%	100%
S19	3.055	3.056	3.060	0.002	0.0%	0.2%	87%
S20	3.055	3.055	3.060	0.001	0.0%	0.2%	98%
S21	3.055	3.055	3.060	0.001	0.0%	0.2%	96%
S22	3.055	3.055	3.055	0.000	0.0%	0.0%	100%
S28	3.055	3.056	3.062	0.002	0.0%	0.2%	80%
S29	3.055	3.056	3.060	0.002	0.0%	0.2%	90%
S30	3.055	3.055	3.060	0.001	0.0%	0.2%	99%
S31	3.055	3.055	3.055	0.000	0.0%	0.0%	100%
S37	3.055	3.056	3.060	0.002	0.0%	0.2%	87%
S38	3.055	3.055	3.060	0.001	0.0%	0.2%	97%

Tabelle geht auf der nächsten Seite weiter

Fortsetzung von Tabelle A.17

Szenario	Minimale Messdauer [Std.]	Mittlere Messdauer [Std.]	Maximale Messdauer [Std.]	Standard- abweichung [Std.]	Mittlere proz. Abw.	Maximale proz. Abw.	Beste Lsg erreicht
S39	3.055	3.055	3.055	0.000	0.0%	0.0%	100%
S40	3.055	3.055	3.055	0.000	0.0%	0.0%	100%
S46	3.055	3.056	3.062	0.002	0.0%	0.2%	73%
S47	3.055	3.055	3.060	0.001	0.0%	0.2%	92%
S48	3.055	3.055	3.055	0.000	0.0%	0.0%	100%
S49	3.055	3.055	3.055	0.000	0.0%	0.0%	100%
S55	3.055	3.056	3.060	0.002	0.0%	0.2%	81%
S56	3.055	3.055	3.060	0.001	0.0%	0.2%	97%
S57	3.055	3.055	3.060	0.001	0.0%	0.2%	99%
S58	3.055	3.055	3.055	0.000	0.0%	0.0%	100%
S64	3.055	3.055	3.060	0.001	0.0%	0.2%	91%
S65	3.055	3.055	3.060	0.001	0.0%	0.2%	99%
S66	3.055	3.055	3.055	0.000	0.0%	0.0%	100%
S67	3.055	3.055	3.055	0.000	0.0%	0.0%	100%
S73	3.055	3.055	3.060	0.001	0.0%	0.2%	97%
S74	3.055	3.055	3.055	0.000	0.0%	0.0%	100%
S75	3.055	3.055	3.055	0.000	0.0%	0.0%	100%
S76	3.055	3.055	3.055	0.000	0.0%	0.0%	100%
S82	3.055	3.055	3.060	0.001	0.0%	0.2%	99%
S83	3.055	3.055	3.055	0.000	0.0%	0.0%	100%
S84	3.055	3.055	3.055	0.000	0.0%	0.0%	100%
S85	3.055	3.055	3.055	0.000	0.0%	0.0%	100%
S100	3.055	3.055	3.055	0.000	0.0%	0.0%	100%

Tabelle A.18: Prinzengarten: Ergebnisse der Parameterstudien mit jeweils 100 Iterationen  
Beste Lösung: 5.02 Stunden

Szenario	Minimale Messdauer [Std.]	Mittlere Messdauer [Std.]	Maximale Messdauer [Std.]	Standard- abweichung [Std.]	Mittlere proz. Abw.	Maximale proz. Abw.	Beste Lsg erreicht
S01	5.02	5.05	5.16	0.028	0.7%	2.8%	14%
S02	5.02	5.05	5.11	0.020	0.5%	1.8%	16%
S03	5.02	5.04	5.11	0.015	0.3%	1.8%	26%
S04	5.02	5.03	5.07	0.012	0.3%	1.0%	28%
S05	5.02	5.04	5.11	0.018	0.5%	1.8%	15%
S06	5.02	5.04	5.10	0.015	0.3%	1.6%	22%
S07	5.02	5.03	5.07	0.012	0.3%	1.0%	27%
S08	5.02	5.03	5.05	0.009	0.2%	0.6%	36%
S09	5.02	5.03	5.05	0.008	0.2%	0.6%	33%
S10	5.02	5.06	5.17	0.027	0.8%	3.0%	7%
S11	5.02	5.04	5.08	0.015	0.4%	1.2%	20%
S12	5.02	5.04	5.11	0.020	0.4%	1.8%	20%
S13	5.02	5.04	5.11	0.017	0.4%	1.8%	16%
S14	5.02	5.05	5.11	0.020	0.6%	1.8%	12%
S15	5.02	5.04	5.07	0.014	0.3%	1.0%	23%
S16	5.02	5.04	5.07	0.014	0.4%	1.0%	19%
S17	5.02	5.04	5.07	0.013	0.4%	1.0%	16%
S18	5.02	5.04	5.07	0.013	0.3%	1.0%	19%
S19	5.02	5.07	5.16	0.029	1.0%	2.8%	6%
S20	5.02	5.06	5.11	0.020	0.7%	1.8%	6%
S21	5.02	5.05	5.14	0.020	0.6%	2.4%	9%
S22	5.02	5.05	5.10	0.018	0.6%	1.6%	12%
S23	5.02	5.05	5.11	0.020	0.5%	1.8%	17%
S24	5.02	5.05	5.10	0.018	0.6%	1.6%	11%
S25	5.02	5.04	5.10	0.017	0.5%	1.6%	19%
S26	5.02	5.04	5.07	0.015	0.4%	1.0%	24%
S27	5.02	5.04	5.07	0.013	0.3%	1.0%	23%

Tabelle geht auf der nächsten Seite weiter

Fortsetzung von **Tabelle A.18**

Szenario	Minimale Messdauer [Std.]	Mittlere Messdauer [Std.]	Maximale Messdauer [Std.]	Standard- abweichung [Std.]	Mittlere proz. Abw.	Maximale proz. Abw.	Beste Lsg erreicht
S28	5.02	5.08	5.19	0.033	1.1%	3.4%	4%
S29	5.03	5.08	5.19	0.029	1.1%	3.4%	0%
S30	5.02	5.06	5.14	0.026	0.8%	2.4%	5%
S31	5.02	5.07	5.13	0.022	0.9%	2.2%	1%
S32	5.02	5.06	5.15	0.022	0.7%	2.6%	6%
S33	5.02	5.05	5.16	0.021	0.7%	2.8%	8%
S34	5.02	5.05	5.10	0.020	0.6%	1.6%	13%
S35	5.02	5.05	5.12	0.018	0.6%	2.0%	11%
S36	5.02	5.04	5.11	0.016	0.5%	1.8%	14%
S37	5.02	5.05	5.12	0.024	0.6%	2.0%	15%
S38	5.02	5.05	5.11	0.021	0.6%	1.8%	11%
S39	5.02	5.04	5.10	0.014	0.3%	1.6%	22%
S40	5.02	5.03	5.07	0.011	0.3%	1.0%	18%
S41	5.02	5.05	5.20	0.025	0.5%	3.6%	14%
S42	5.02	5.04	5.10	0.016	0.4%	1.6%	16%
S43	5.02	5.03	5.09	0.012	0.3%	1.4%	27%
S44	5.02	5.03	5.05	0.009	0.2%	0.6%	28%
S45	5.02	5.03	5.05	0.008	0.2%	0.6%	38%
S46	5.02	5.07	5.14	0.027	0.9%	2.4%	7%
S47	5.02	5.05	5.21	0.030	0.7%	3.8%	9%
S48	5.02	5.05	5.14	0.025	0.6%	2.4%	15%
S49	5.02	5.04	5.09	0.015	0.4%	1.4%	15%
S50	5.02	5.06	5.15	0.029	0.8%	2.6%	12%
S51	5.02	5.05	5.11	0.021	0.6%	1.8%	12%
S52	5.02	5.04	5.11	0.019	0.5%	1.8%	19%
S53	5.02	5.04	5.10	0.015	0.5%	1.6%	11%
S54	5.02	5.04	5.07	0.012	0.3%	1.0%	18%
S55	5.02	5.07	5.22	0.039	1.0%	4.0%	5%
S56	5.02	5.06	5.21	0.032	0.8%	3.8%	10%
S57	5.02	5.05	5.12	0.022	0.6%	2.0%	13%
S58	5.02	5.04	5.10	0.017	0.5%	1.6%	17%
S59	5.02	5.06	5.20	0.029	0.7%	3.6%	12%
S60	5.02	5.05	5.11	0.018	0.6%	1.8%	7%
S61	5.02	5.05	5.10	0.017	0.5%	1.6%	11%
S62	5.02	5.04	5.10	0.016	0.4%	1.6%	13%
S63	5.02	5.04	5.10	0.015	0.4%	1.6%	13%
S64	5.02	5.06	5.11	0.021	0.7%	1.8%	6%
S65	5.02	5.05	5.11	0.018	0.5%	1.8%	14%
S66	5.02	5.04	5.10	0.016	0.4%	1.6%	23%
S67	5.02	5.03	5.07	0.013	0.3%	1.0%	31%
S68	5.02	5.05	5.11	0.022	0.6%	1.8%	11%
S69	5.02	5.04	5.11	0.017	0.4%	1.8%	19%
S70	5.02	5.04	5.10	0.014	0.3%	1.6%	16%
S71	5.02	5.03	5.05	0.010	0.2%	0.6%	27%
S72	5.02	5.03	5.05	0.009	0.2%	0.6%	33%
S73	5.02	5.06	5.19	0.026	0.7%	3.4%	8%
S74	5.02	5.05	5.11	0.016	0.5%	1.8%	10%
S75	5.02	5.04	5.11	0.013	0.4%	1.8%	15%
S76	5.02	5.03	5.05	0.011	0.3%	0.6%	37%
S77	5.02	5.05	5.11	0.021	0.7%	1.8%	9%
S78	5.02	5.04	5.11	0.016	0.5%	1.8%	15%
S79	5.02	5.04	5.07	0.012	0.3%	1.0%	29%
S80	5.02	5.03	5.05	0.010	0.3%	0.6%	34%
S81	5.02	5.03	5.05	0.010	0.2%	0.6%	55%
S82	5.02	5.05	5.11	0.019	0.6%	1.8%	13%
S83	5.02	5.04	5.11	0.016	0.4%	1.8%	20%
S84	5.02	5.03	5.07	0.012	0.3%	1.0%	35%
S85	5.02	5.03	5.05	0.009	0.1%	0.6%	71%
S86	5.02	5.05	5.11	0.018	0.5%	1.8%	14%
S87	5.02	5.04	5.11	0.016	0.3%	1.8%	29%
S88	5.02	5.03	5.05	0.011	0.2%	0.6%	55%

Tabelle geht auf der nächsten Seite weiter

## Fortsetzung von Tabelle A.18

Szenario	Minimale Messdauer [Std.]	Mittlere Messdauer [Std.]	Maximale Messdauer [Std.]	Standard- abweichung [Std.]	Mittlere proz. Abw.	Maximale proz. Abw.	Beste Lsg erreicht
S89	5.02	5.02	5.04	0.005	0.1%	0.4%	78%
S90	5.02	5.02	5.04	0.005	0.1%	0.4%	76%
S100	5.02	5.03	5.05	0.009	0.1%	0.7%	59%

Tabelle A.19: Elbinsel: Ergebnisse der Parameterstudien mit jeweils 100 Iterationen  
Beste Lösung: 7.41 Stunden

Szenario	Minimale Messdauer [Std.]	Mittlere Messdauer [Std.]	Maximale Messdauer [Std.]	Standard- abweichung [Std.]	Mittlere proz. Abw.	Maximale proz. Abw.	Beste Lsg erreicht
S01	7.41	7.58	7.82	0.092	2.3%	5.5%	7%
S02	7.41	7.54	7.75	0.084	1.7%	4.6%	10%
S03	7.41	7.50	7.69	0.081	1.2%	3.8%	21%
S04	7.41	7.47	7.67	0.072	0.8%	3.5%	34%
S05	7.41	7.54	7.75	0.089	1.7%	4.6%	12%
S06	7.41	7.51	7.68	0.088	1.4%	3.6%	23%
S07	7.41	7.49	7.72	0.074	1.0%	4.2%	27%
S08	7.41	7.47	7.61	0.065	0.8%	2.7%	32%
S09	7.41	7.45	7.62	0.056	0.6%	2.8%	34%
S10	7.41	7.60	7.80	0.080	2.6%	5.3%	1%
S11	7.41	7.52	7.75	0.090	1.5%	4.6%	15%
S12	7.41	7.52	7.71	0.088	1.5%	4.0%	23%
S13	7.41	7.51	7.79	0.086	1.3%	5.1%	24%
S14	7.41	7.55	7.76	0.090	1.9%	4.7%	10%
S15	7.41	7.50	7.68	0.082	1.3%	3.6%	13%
S16	7.41	7.51	7.69	0.077	1.3%	3.8%	14%
S17	7.41	7.49	7.69	0.075	1.1%	3.8%	19%
S18	7.41	7.48	7.66	0.070	1.0%	3.4%	24%
S19	7.41	7.63	7.82	0.095	2.9%	5.5%	1%
S20	7.41	7.59	7.78	0.083	2.4%	5.0%	2%
S21	7.41	7.59	7.74	0.079	2.4%	4.5%	1%
S22	7.42	7.57	7.72	0.075	2.2%	4.2%	0%
S23	7.41	7.57	7.80	0.095	2.2%	5.3%	7%
S24	7.41	7.54	7.73	0.083	1.8%	4.3%	5%
S25	7.41	7.53	7.71	0.079	1.6%	4.0%	11%
S26	7.41	7.53	7.72	0.077	1.6%	4.2%	9%
S27	7.41	7.49	7.65	0.070	1.1%	3.2%	17%
S28	7.41	7.68	7.90	0.086	3.7%	6.6%	1%
S29	7.47	7.65	7.82	0.087	3.3%	5.5%	0%
S30	7.41	7.64	7.83	0.091	3.1%	5.7%	3%
S31	7.46	7.64	7.82	0.081	3.0%	5.5%	0%
S32	7.41	7.59	7.79	0.087	2.5%	5.1%	2%
S33	7.41	7.59	7.83	0.085	2.5%	5.7%	2%
S34	7.41	7.59	7.77	0.090	2.4%	4.9%	4%
S35	7.41	7.57	7.81	0.087	2.2%	5.4%	4%
S36	7.41	7.54	7.75	0.083	1.7%	4.6%	13%
S37	7.41	7.60	7.82	0.097	2.5%	5.5%	4%
S38	7.41	7.53	7.68	0.079	1.6%	3.6%	11%
S39	7.41	7.50	7.67	0.082	1.2%	3.5%	24%
S40	7.41	7.46	7.65	0.064	0.7%	3.2%	28%
S41	7.41	7.53	7.73	0.084	1.7%	4.3%	7%
S42	7.41	7.50	7.70	0.082	1.1%	3.9%	20%
S43	7.41	7.48	7.66	0.076	1.0%	3.4%	23%
S44	7.41	7.44	7.58	0.041	0.4%	2.3%	37%
S45	7.41	7.46	7.64	0.059	0.6%	3.1%	33%
S46	7.41	7.63	7.86	0.096	3.0%	6.1%	2%
S47	7.41	7.58	7.76	0.093	2.3%	4.7%	4%

Tabelle geht auf der nächsten Seite weiter

Fortsetzung von **Tabelle A.19**

Szenario	Minimale Messdauer [Std.]	Mittlere Messdauer [Std.]	Maximale Messdauer [Std.]	Standard- abweichung [Std.]	Mittlere proz. Abw.	Maximale proz. Abw.	Beste Lsg erreicht
S48	7.41	7.57	7.78	0.090	2.1%	5.0%	8%
S49	7.41	7.51	7.68	0.079	1.3%	3.6%	19%
S50	7.41	7.60	7.80	0.093	2.5%	5.3%	3%
S51	7.41	7.55	7.75	0.093	1.9%	4.6%	10%
S52	7.41	7.53	7.74	0.090	1.6%	4.5%	15%
S53	7.41	7.51	7.68	0.078	1.3%	3.6%	18%
S54	7.41	7.51	7.73	0.087	1.3%	4.3%	18%
S55	7.41	7.63	7.90	0.103	3.0%	6.6%	3%
S56	7.41	7.58	7.78	0.094	2.3%	5.0%	9%
S57	7.41	7.56	7.76	0.095	2.0%	4.7%	11%
S58	7.41	7.52	7.71	0.089	1.5%	4.0%	13%
S59	7.41	7.56	7.89	0.103	2.0%	6.5%	8%
S60	7.41	7.57	7.78	0.088	2.1%	5.0%	6%
S61	7.41	7.55	7.75	0.092	1.8%	4.6%	12%
S62	7.41	7.52	7.72	0.091	1.5%	4.2%	16%
S63	7.41	7.50	7.67	0.081	1.2%	3.5%	20%
S64	7.41	7.54	7.72	0.087	1.8%	4.2%	5%
S65	7.41	7.51	7.73	0.070	1.3%	4.3%	10%
S66	7.41	7.48	7.73	0.067	0.9%	4.3%	23%
S67	7.41	7.46	7.65	0.058	0.7%	3.2%	24%
S68	7.41	7.52	7.76	0.084	1.4%	4.7%	8%
S69	7.41	7.49	7.67	0.065	1.0%	3.5%	14%
S70	7.41	7.47	7.63	0.060	0.8%	3.0%	18%
S71	7.41	7.45	7.59	0.043	0.5%	2.4%	27%
S72	7.41	7.44	7.59	0.041	0.4%	2.4%	25%
S73	7.41	7.51	7.75	0.073	1.4%	4.6%	5%
S74	7.41	7.47	7.67	0.059	0.9%	3.5%	21%
S75	7.41	7.45	7.55	0.041	0.5%	1.9%	29%
S76	7.41	7.43	7.53	0.028	0.3%	1.6%	36%
S77	7.41	7.49	7.69	0.067	1.1%	3.8%	17%
S78	7.41	7.46	7.62	0.048	0.7%	2.8%	19%
S79	7.41	7.43	7.58	0.035	0.3%	2.3%	36%
S80	7.41	7.42	7.50	0.017	0.2%	1.2%	41%
S81	7.41	7.42	7.53	0.017	0.1%	1.6%	59%
S82	7.41	7.50	7.73	0.072	1.2%	4.3%	10%
S83	7.41	7.47	7.62	0.058	0.8%	2.8%	17%
S84	7.41	7.45	7.59	0.040	0.5%	2.4%	30%
S85	7.41	7.43	7.55	0.027	0.3%	1.9%	41%
S86	7.41	7.49	7.66	0.065	1.0%	3.4%	16%
S87	7.41	7.45	7.58	0.042	0.5%	2.3%	35%
S88	7.41	7.43	7.55	0.028	0.3%	1.9%	42%
S89	7.41	7.42	7.50	0.016	0.1%	1.2%	57%
S90	7.41	7.42	7.49	0.015	0.1%	1.1%	59%
S100	7.41	7.42	7.50	0.016	0.1%	1.1%	59%

**Tabelle A.20:** *Wilhelm Busch Museum: Zusammenstellung aller 5040 Varianten für die Brute-Force-Berechnung*

Variante	SP1	SP2	SP3	SP4	SP5	SP6	SP7
1	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
2	P1	P2	P3	P4	P5	P7	P6
3	P1	P2	P3	P4	P6	P5	P7
4	P1	P2	P3	P4	P6	P7	P5
5	P1	P2	P3	P4	P7	P5	P6
6	P1	P2	P3	P4	P7	P6	P5
7	P1	P2	P3	P5	P4	P6	P7
8	P1	P2	P3	P5	P4	P7	P6
9	P1	P2	P3	P5	P6	P4	P7
10	P1	P2	P3	P5	P6	P7	P4
11	P1	P2	P3	P5	P7	P4	P6
12	P1	P2	P3	P5	P7	P6	P4
13	P1	P2	P3	P6	P4	P5	P7
14	P1	P2	P3	P6	P4	P7	P5
15	P1	P2	P3	P6	P5	P4	P7
16	P1	P2	P3	P6	P5	P7	P4
17	P1	P2	P3	P6	P7	P4	P5
18	P1	P2	P3	P6	P7	P5	P4
19	P1	P2	P3	P7	P4	P5	P6
20	P1	P2	P3	P7	P4	P6	P5
21	P1	P2	P3	P7	P5	P4	P6
22	P1	P2	P3	P7	P5	P6	P4
23	P1	P2	P3	P7	P6	P4	P5
24	P1	P2	P3	P7	P6	P5	P4
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
5017	P7	P6	P5	P1	P2	P3	P4
5018	P7	P6	P5	P1	P2	P4	P3
5019	P7	P6	P5	P1	P3	P2	P4
5020	P7	P6	P5	P1	P3	P4	P2
5021	P7	P6	P5	P1	P4	P2	P3
5022	P7	P6	P5	P1	P4	P3	P2
5023	P7	P6	P5	P2	P1	P3	P4
5024	P7	P6	P5	P2	P1	P4	P3
5025	P7	P6	P5	P2	P3	P1	P4
5026	P7	P6	P5	P2	P3	P4	P1
5027	P7	P6	P5	P2	P4	P1	P3
5028	P7	P6	P5	P2	P4	P3	P1
5029	P7	P6	P5	P3	P1	P2	P4
5030	P7	P6	P5	P3	P1	P4	P2
5031	P7	P6	P5	P3	P2	P1	P4
5032	P7	P6	P5	P3	P2	P4	P1
5033	P7	P6	P5	P3	P4	P1	P2
5034	P7	P6	P5	P3	P4	P2	P1
5035	P7	P6	P5	P4	P1	P2	P3
5036	P7	P6	P5	P4	P1	P3	P2
5037	P7	P6	P5	P4	P2	P1	P3
5038	P7	P6	P5	P4	P2	P3	P1
5039	P7	P6	P5	P4	P3	P1	P2
5040	P7	P6	P5	P4	P3	P2	P1

# Literaturverzeichnis

- [van der Aalst 1999] AALST, W. M. P. van der: Formalization and verification of event-driven process chains. In: *Information and software technology* (1999), Nr. 41(10), S. 639–650
- [van der Aalst und Stahl 2011] AALST, W. M. P. van der ; STAHL, C.: *Modeling business processes: A petri net-oriented approach*. Cambridge and Mass : MIT Press, 2011 (Cooperative information systems). – ISBN 9780262015387
- [Abel 1990] ABEL, D.: *Petri-Netze für Ingenieure: Modellbildung und Analyse diskret gesteuerter Systeme*. Berlin and Heidelberg, New York : Springer-Verlag, 1990. – ISBN 3-540-51814-2
- [Ajmone Marsan u. a. 1994] AJMONE MARSAN, M. ; BALBO, G. ; CONTE, G. ; DONATELLI, S. ; FRANCESCHINIS, G.: *Modelling with Generalized Stochastic Petri Nets*. New York and USA : John Wiley and Sons, 1994 (Wiley series in parallel computing). – ISBN 0-471-93059-8
- [von Aspern 2003] ASPERN, J. von: *SPS-Softwareentwicklung mit Petrinetzen: IEC-61131-codierte Hochgeschwindigkeitsnetze (Turbo-Netze)*. Berlin u.a : VDE Verlag, 2003. – ISBN 3-8007-2728-5
- [Baumgarten 1996] BAUMGARTEN, B.: *Petri-Netze: Grundlagen und Anwendungen*. 2. Auflage. Heidelberg : Spektrum Akademischer Verlag, 1996 (Spektrum-Hochschultaschenbuch). – ISBN 978-3827401755
- [Bellmore und Hong 1974] BELLMORE, M. ; HONG, S.: Transformation of Multisalesmen problem to the standard Traveling Salesman Problem. In: *Journal of Association for Computing Machinery* (1974), S. 500–504
- [Berkhahn u. a. 2010] BERKHAHN, V. ; BERNER, F. ; KUTTERER, H. ; SCHWIEGER, V. ; HIRSCHNER, J. ; REHR, I. ; RINKE, N. ; SCHWEITZER, J.: Effizienzoptimierung und Qualitätssicherung ingenieurgeodätischer Prozesse im Hochbau. In: *Bauingenieur* (2010), Nr. 85, S. 491–501
- [Berkhahn u. a. 2007] BERKHAHN, V. ; KLINGER, A. ; HOFMANN, F. ; KÖNIG, M.: Relationale Prozessmodellierung in kooperativer Gebäudeplanung. In: RÜPPEL, U. (Hrsg.): *Vernetztkooperative Planungsprozesse im Konstruktiven Ingenieurbau*. Berlin and Heidelberg, New York : Springer-Verlag, 2007, S. 31–51. – ISBN 978-3-540-68102-1
- [Boersch u. a. 2007] BOERSCH, I. ; HEINSOHN, J. ; SOCHER, R.: *Wissensverarbeitung: Eine Einführung in die künstliche Intelligenz für Informatiker und Ingenieure*. 2. Auflage. München : ELSEVIER Spektrum Akademischer Verlag, 2007. – ISBN 978-3827418449
- [Dare und Saleh 2000] DARE, P. ; SALEH, H.: GPS network design: logistics solution using optimal and near-optimal methods. In: *Journal of Geodesy* (2000), Nr. 74, S. 467–478
- [David und Alla 2005] DAVID, R. ; ALLA, H.: *Discrete, continuous, and hybrid Petri nets*. Berlin : Springer-Verlag, 2005. – ISBN 3-540-22480-7
- [De Jong 1975] DE JONG, K. A.: *An analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems*. Ann Arbor, Michigan, University of Michigan, Dissertation, 1975

- [Desel und Erwin 2000] DESEL, J. ; ERWIN, T.: Modeling, Simulation and Analysis of Business Processes. In: AALST, W. M. P. van der (Hrsg.) ; DESEL, J. (Hrsg.) ; OBERWEIS, A. (Hrsg.): *Lecture Notes in Computer Science* Bd. 1806. Berlin and Heidelberg : Springer-Verlag, 2000, S. 129–141. – ISBN 978-3-540-67454-2
- [Dijkstra 1959] DIJKSTRA, E. W.: A note on two problems in connexion with graphs. In: *Numerische Mathematik* Bd. 1. 1959, S. 269–271
- [DIN EN ISO 9000 2000] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *DIN EN ISO 9000:2000 Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe*. 2000
- [DIN IEC 60050-351 2009] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG INTERNATIONALE ELEKTROTECHNISCHE KOMMISSION: *DIN IEC 60050-351 Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch*. 2009
- [Domschke und Drexl 2005] DOMSCHKE, W. ; DREXL, A.: *Einführung in Operations Research*. 6., überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin and Heidelberg, New York : Springer-Verlag, 2005 (Springer-Lehrbuch). – ISBN 978-3540234319
- [Domschke u. a. 2015] DOMSCHKE, W. ; DREXL, A. ; KLEIN, R. ; SCHOLL, A.: *Einführung in Operations Research*. 9., überarbeitete und verbesserte Aufl. Berlin and Heidelberg : Springer Gabler, 2015 (Springer-Lehrbuch). – ISBN 978-3-662-48215-5
- [Domschke und Scholl 2006] DOMSCHKE, W. ; SCHOLL, A.: *Heuristische Verfahren*. URL <http://www2.wiwi.uni-jena.de/Papers/wp-sw0806.pdf>. – Zugriffsdatum: 29.03.2017, 2006 (Arbeits- und Diskussionspapiere der Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät der Friedrich-Schiller-Universität Jena)
- [Domschke und Scholl 2010] DOMSCHKE, W. ; SCHOLL, A.: *Logistik: Rundreisen und Touren*. 5. Aufl. Oldenbourg Verlag, 2010 (Oldenbourgs Lehr- und Handbücher der Wirtschafts- u. Sozialwissenschaften). – ISBN 978-3-486-59093-7
- [Domschke u. a. 1997] DOMSCHKE, W. ; SCHOLL, A. ; VOSS, Stefan: *Produktionsplanung: Ablauforganisatorische Aspekte*. 2., überarb. und erw. Aufl. Berlin : Springer, 1997 (Springer-Lehrbuch). – ISBN 3540635602
- [Frank und van Laak 2003] FRANK, U. ; LAAK, B. L. van: *Arbeitsberichte des Instituts für Wirtschaftsinformatik*. Bd. Nr. 34: *Anforderungen an Sprachen zur Modellierung von Geschäftsprozessen*. Universität Koblenz Landau, Institut für Wirtschaftsinformatik, 2003
- [Gillett 1976] GILLETT, B. E.: *Introduction to operations research: A computer-oriented algorithmic approach*. New York : McGraw-Hill, 1976 (McGraw-Hill series in industrial engineering and management science). – ISBN 9780070232457
- [Goldberg 1989] GOLDBERG, D. E.: *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*. Boston : Addison-Wesley, 1989. – ISBN 9780201157673
- [von Gösseln 2012] GÖSSELN, I. von: Effiziente Planung tachymetrischer Netzmessungen. In: *Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule Mittweida, Nr. 1/2012: Workshop Messtechnische Überwachung von Stauanlagen* Bd. 1/2012, 2012, S. 79–88
- [Grafarend u. a. 1979] GRAFAREND, E. W. ; HEISTER, H. ; KELM, R. ; KROPFF, H. ; SCHAFFRIN, B.: *Neue Folge, Buchreihe*. Bd. 11: *Optimierung geodätischer Meßoperationen*. Karlsruhe : Wichmann Verlag, 1979. – ISBN 3-87907-052-0

- [Hofmann u. a. 2008] HOFMANN, F. ; BERKHAHN, V. ; MILBRADT, P.: Decision support in Petri nets via genetic algorithms. In: ZARLI, A. (Hrsg.) ; SCHERER, R. (Hrsg.): *eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction: ECPPM 2008*. CRC Press, 2008, S. 301–306. – ISBN 9780203883327
- [Horst und von Gösseln 2013] HORST, S. ; GÖSSELN, I. von: Active Prism for Total Station Measurements. In: *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* (2013), Nr. 4, S. 129–136
- [Huber u. a. 1991] HUBER, P. ; JENSEN, K. ; SHAPIRO, R. M.: Hierarchies in coloured petri nets. In: ROZENBERG, G. (Hrsg.): *Advances in Petri Nets 1990* Bd. 483. Springer Berlin Heidelberg, 1991, S. 313–341. – URL [http://dx.doi.org/10.1007/3-540-53863-1\\_30](http://dx.doi.org/10.1007/3-540-53863-1_30). – ISBN 978-3-540-53863-9
- [Keller u. a. 1992] KELLER, G. ; NÜTTGENS, M. ; SCHEER, A.-W.: *Veröffentlichungen des Instituts für Wirtschaftsinformatik*. Bd. Heft 89: *Semantische Prozeßmodellierung auf der Grundlage Ereignisgesteuerter Prozeßketten (EPK)*. Saarbrücken : Iwi, 1992
- [Kochkine u. a. 2012] KOCHKINE, V. ; RINKE, N. ; SCHWEITZER, J. ; GÖSSELN, I. von: Simulation of process interaction for quality assurance during construction. In: LIN, Y.-C. (Hrsg.) ; JESSY KANG, S.-C. (Hrsg.): *CONVR 2012*. Taipei : National Taiwan University Press, 2012, S. 510–520. – ISBN 978-986-03-4289-5
- [Leßmann 2012] LESSMANN, L.: *Entwicklung eines elektronischen Feldbuchs zur Nutzer-Unterstützung bei Netzmessungen auf Basis der Android-Plattform*, Leibniz Universität Hannover, Bachelorarbeit (unveröffentlicht), 2012
- [López-Grao u. a. 2004] LÓPEZ-GRAO, J. P. ; MERSEGUER, J. ; CAMPOS, J.: From UML activity diagrams to Stochastic Petri nets: application to software performance engineering. In: *Proceedings of the Fourth International Workshop on Software and Performance, WOSP 2004*. New York : ACM Press, 2004, S. 25. – URL <http://dx.doi.org/10.1145/974044.974048>. – ISBN 1581136730
- [März und Krug 2011] MÄRZ, L. ; KRUG, W.: Kopplung von Simulation und Optimierung. In: MÄRZ, L. (Hrsg.) ; KRUG, W. (Hrsg.) ; ROSE, O. (Hrsg.) ; WEIGERT, G. (Hrsg.): *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik*. Berlin and Heidelberg : Springer-Verlag, 2011 (VDI-Buch), S. 41–45. – ISBN 978-3-642-14535-3
- [März u. a. 2011] MÄRZ, L. (Hrsg.) ; KRUG, W. (Hrsg.) ; ROSE, O. (Hrsg.) ; WEIGERT, G. (Hrsg.): *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik: Praxisorientierter Leitfaden mit Fallbeispielen*. Berlin and Heidelberg : Springer-Verlag, 2011 (VDI-Buch). – URL <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-14536-0>. – ISBN 978-3-642-14535-3
- [Mejía u. a. 2012] MEJÍA, G. ; MONTROYA, C. ; CARDONA, J. ; CASTRO, A. L.: Petri nets and genetic algorithms for complex manufacturing systems scheduling. In: *International Journal of Production Research* 50 (2012), Nr. 3, S. 791–803. – URL <http://dx.doi.org/10.1080/00207543.2010.543177>. – ISSN 0020-7543
- [Niemeier 2002] NIEMEIER, W.: *Ausgleichsrechnung*. Berlin, New York : Walter de Gruyter Verlag, 2002 (de Gruyter Lehrbuch). – ISBN 978-3110140804
- [Oberweis 1996] OBERWEIS, A.: *Modellierung und Ausführung von Workflows mit Petri-Netzen: Univ., Habil.-Schr.-Karlsruhe, 1995*. Stuttgart and Leipzig : Teubner Verlag, 1996 (Teubner-Reihe Wirtschaftsinformatik). – ISBN 3-8154-2600-6
- [Oestereich u. a. 2003] OESTEREICH, B. ; WEISS, C. ; SCHRÖDER, C. ; WEILKIENS, T. ; LENHARD, A.: *Objektorientierte Geschäftsprozessmodellierung mit der UML*. 1. Auflage. Heidelberg : dpunkt, 2003. – ISBN 3-89864-237-2

- [Pohlheim 1998] POHLHEIM, H.: *Entwicklung und systemtechnische Anwendung Evolutionärer Algorithmen*. Aachen and Ilmenau, Technische Universität Ilmenau, Dissertation, 1998
- [Ramchandani 1974] RAMCHANDANI, C.: *Analysis of asynchronous concurrent systems by Petri nets*. Cambridge, Massachusetts Institute of Technology, Project MAC, Dissertation, 1974
- [Rehr u. a. 2011] REHR, I. ; RINKE, N. ; KUTTERER, H. ; BERKHAHN, V.: Maßnahmen zur Effizienzsteigerung bei der Durchführung tachymetrischer Netzmessungen. In: *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* (2011), Nr. 1, S. 2–13
- [Reisig 1982] REISIG, W.: *Petrinetze: Eine Einführung*. Berlin and Heidelberg : Springer-Verlag, 1982. – ISBN 3-540-11478-5
- [Reisig 2010] REISIG, W.: *Petrinetze: Modellierungstechnik, Analysemethoden, Fallstudien*. 1. Auflage. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 2010 (Leitfäden der Informatik). – ISBN 978-3-8348-1290-2
- [Reisig und Rozenberg 1998a] REISIG, W. (Hrsg.) ; ROZENBERG, G. (Hrsg.): *Lecture notes in computer science*. Bd. 1491: *Lectures on Petri nets: Advances in Petri nets*. Berlin : Springer-Verlag, 1998. – ISBN 9783540653066
- [Reisig und Rozenberg 1998b] REISIG, W. (Hrsg.) ; ROZENBERG, G. (Hrsg.): *Lecture notes in computer science*. Bd. 1492: *Lectures on Petri nets: Advances in Petri nets*. Berlin : Springer-Verlag, 1998. – ISBN 9783540653073
- [Rinke 2009] RINKE, N.: *Hybride Prozessoptimierung unter Berücksichtigung geometrischer Informationen*. Hannover, Leibniz Universität Hannover, Diplomarbeit (unveröffentlicht), 2009
- [Rinke u. a. 2012] RINKE, N. ; GÖSSELN, I. von ; BERKHAHN, V.: High-level Petri nets for modeling of geodetic processes and their integration into construction processes. In: GUDNASON, G. (Hrsg.) ; SCHERER, R. (Hrsg.): *eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction*, 2012, S. 221–226
- [Rinke u. a. 2017] RINKE, N. ; GÖSSELN, I. von ; KOCHKINE, V. ; SCHWEITZER, J. ; BERKHAHN, V. ; BERNER, F. ; KUTTERER, H. ; NEUMANN, I. ; SCHWIEGER, V.: Simulating quality assurance and efficiency analysis between construction management and engineering geodesy. In: *Automation in Construction* 76 (2017), S. 24–35. – URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2017.01.009>. – ISSN 09265805
- [Robert 1995] ROBERT, C. P.: Simulation of truncated normal variables. In: *Statistics and Computing* 5 (1995), Nr. 2, S. 121–125. – ISSN 0960-3174
- [Rosenstengel und Winand 1983] ROSENSTENGEL, B. ; WINAND, U.: *Petri-Netze: Eine anwendungsorientierte Einführung*. 2, ergänzte und verbesserte Auflage. Braunschweig and Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 1983 (Programm angewandte Informatik). – ISBN 3-528-13582-4
- [Rosenstengel und Winand 1991] ROSENSTENGEL, B. ; WINAND, U.: *Petri-Netze: Eine anwendungsorientierte Einführung*. 4., verbesserte und erweiterte Auflage. Braunschweig : Vieweg+Teubner Verlag, 1991 (Programm angewandte Informatik). – ISBN 3528335823
- [Saleh und Chelouah 2004] SALEH, H. A. ; CHELOUAH, R.: The design of the global navigation satellite system surveying networks using genetic algorithms. In: *Engineering Applications of Artificial Intelligence* (2004), Nr. 17, S. 111–122. – URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.engappai.2003.11.001>

- [Scheer und Nüttgens 2000] SCHEER, A.-W. ; NÜTTGENS, M.: ARIS Architecture and Reference Models for Business Process Management. In: AALST, W. M. P. van der (Hrsg.) ; DESEL, J. (Hrsg.) ; OBERWEIS, A. (Hrsg.): *Lecture Notes in Computer Science* Bd. 1806. Berlin and Heidelberg : Springer-Verlag, 2000, S. 376–389. – ISBN 978-3-540-67454-2
- [Schwarze 2010] SCHWARZE, J.: *Projektmanagement mit Netzplantechnik*. 10. Auflage. Herne : NWB, 2010 (NWB Studium). – ISBN 978-3-482-56060-6
- [Scientific Computing Group 2016] SCIENTIFIC COMPUTING GROUP ; LEIBNIZ UNIVERSITÄT IT SERVICES (Hrsg.): *Scientific Computing – Dokumentation: Cluster-Knoten Spezifikationen*. 2016. – URL [https://www.luis.uni-hannover.de/scientific\\_computing\\_doku.html](https://www.luis.uni-hannover.de/scientific_computing_doku.html). – Zugriffsdatum: 08.11.2016
- [Staud 2006] STAUD, J.: *Geschäftsprozessanalyse: Ereignisgesteuerte Prozessketten und objektorientierte Geschäftsprozessmodellierung für betriebswirtschaftliche Standardsoftware*. 3. Auflage. Berlin and Heidelberg : Springer-Verlag, 2006. – ISBN 3-540-24510-3
- [Staudinger 1999] STAUDINGER, M.: *A Cost Orientated Approach to Geodetic Network Optimization*. Vienna, University of Technology, Dissertation, 1999
- [Stoliker und Anderson 1982] STOLIKER, P. C. ; ANDERSON, E. G.: Optimization of observing logistics in geodetic networks. In: DEUTSCHE GEODAETISCHE KOMMISSION (Hrsg.): *Proceedings of the International Symposium on Geodetic Networks and Computations of the International Association of Geodesy. Munich, August 31 to September 5, 1981*. München : DGK, Reihe B, Nr. 258, 1982, S. 22–29
- [VDI 3633 Blatt 1 1993] VDI-GESELLSCHAFT FÖRDERTECHNIK, MATERIALFLUSS UND LOGISTIK (DEUTSCHLAND): *Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen: Grundlagen*. 1993
- [Weicker 2007] WEICKER, K.: *Evolutionäre Algorithmen*. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 2007. – ISBN 3519003627
- [Weigert und Rose 2011] WEIGERT, G. ; ROSE, O.: Stell- und Zielgrößen. In: MÄRZ, L. (Hrsg.) ; KRUG, W. (Hrsg.) ; ROSE, O. (Hrsg.) ; WEIGERT, G. (Hrsg.): *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik*. Berlin and Heidelberg : Springer-Verlag, 2011 (VDI-Buch), S. 29–39. – ISBN 978-3-642-14535-3
- [Zimmermann 1997] ZIMMERMANN, A.: *Modellierung und Bewertung von Fertigungssystemen mit Petri-Netzen*. Berlin, Technische Universität Berlin, Dissertation, 1997



# Abbildungsverzeichnis

2.1	Sequenzieller und nebenläufiger Prozess . . . . .	16
2.2	Optimierung eines Realproblems . . . . .	16
2.3	Vor- und Nachbereich einer Transition . . . . .	20
2.4	Verzigungs- und Wettbewerbskonflikt . . . . .	21
2.5	Bedingungs/Ereignis-Netz . . . . .	22
2.6	Stellen/Transitions-Netz . . . . .	23
2.7	Farbiges Petri-Netz . . . . .	23
2.8	Hierarchisches Petri-Netz . . . . .	24
2.9	Modellierung eines zeitabhängigen Vorgangs . . . . .	24
2.10	Zufällige Schaltdauer . . . . .	25
2.11	Beispiel für die Simulation eines S/T-Netzes mit deterministischen Dauern für das Schalten der Transitionen . . . . .	26
2.12	Legende der farbigen Petri-Netze . . . . .	28
2.13	Modul Aufbau und Stationierung eines Tachymeters . . . . .	28
2.14	Modul Abbau . . . . .	29
2.15	Modul tachymetrische Aufnahme . . . . .	29
2.16	Farbiges Petri-Netz für die tachymetrische Aufnahme von Punkten . . . . .	29
2.17	Farbiges Petri-Netz für die tachymetrische Absteckung von Punkten . . . . .	30
2.18	Modul tachymetrische Absteckung . . . . .	31
2.19	Geometrisches Nivellement . . . . .	32
2.20	Statische GNSS-Messung . . . . .	33
2.21	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen einer Tätigkeit . . . . .	35
2.22	Wilhelm Busch Museum: Beispiel für ein Wegenetz . . . . .	40
2.23	Tachymetrische Aufnahme: Übersicht der Anschluss- und Aufnahmepunkte . . . . .	42
2.24	Ablauf-Diagramm der tachymetrischen Aufnahme . . . . .	44
2.25	Tachymetrische Aufnahme: Histogramm der zeitlichen Variation . . . . .	44
3.1	Entfernungsgraph eines symmetrischen TSP . . . . .	51
3.2	Lösung für die kürzeste Rundreise . . . . .	51
3.3	Bestandteile eines Individuums . . . . .	54
3.4	Ablauf eines simplen GA . . . . .	55
3.5	Beispiele für (links) Rouletteselektion und (rechts) Stochastic universal sampling . . . . .	56
3.6	Beispiele für Funktionen zur Berechnung der Wahrscheinlichkeit $p_i$ in Abhängigkeit vom Rang $r_i$ des Individuums $i$ (hier für 100 Individuen) . . . . .	57
3.7	Crossovervarianten . . . . .	57
3.8	Partially Matched Crossover . . . . .	58
3.9	Permutationserhaltende Mutationsoperatoren . . . . .	58
3.10	Schematische Darstellung der Zusammenhänge bei der simulationsbasierten Effizienzoptimierung von Messprozessen . . . . .	60
3.11	Tachymetrische Aufnahme: Übersicht der Anschluss- und Aufnahmepunkte . . . . .	61
3.12	Tachymetrische Aufnahme: Zusammenstellung aller Varianten für die BF-Berechnung . . . . .	63
3.13	Tachymetrische Aufnahme: Lösungsräume verschiedener Aufbau-, Mess- und Abbauvarianten . . . . .	63
3.14	Tachymetrische Aufnahme: Erzielte Lösungen bei der Optimierung mittels GA . . . . .	65

3.15	Tachymetrische Aufnahme: Vergleich der Offline-Performance . . . . .	65
4.1	Farbiges Petri-Netz der tachymetrischen Netzmessung . . . . .	69
4.2	Einstellbare Parameter und Attribute in SimPle-Net . . . . .	74
4.3	SimPle-Net GUI mit den Attributen eines Messpunktes . . . . .	75
4.4	Individuen zur Optimierung der Standpunktfolgenfolge und der Personenzahl . . . . .	76
4.5	Punktaufteilung und -reihenfolge . . . . .	77
4.6	Punktaufteilung . . . . .	77
4.7	Punktfolgenfolge . . . . .	77
4.8	Zusammenstellung der Optimierungsergebnisse . . . . .	79
4.9	Tätigkeiten der Personen während der Netzmessung . . . . .	80
4.10	Beispielnetz Wilhelm Busch Museum . . . . .	81
4.11	Beispielnetz Prinzengarten . . . . .	81
4.12	Beispielnetz Elbinsel . . . . .	82
4.13	Vergleich der Online- und Offline-Performance bei Variation der Selektion . . . . .	85
4.14	Vergleich der Online- und Offline-Performance bei Variation der Individuenanzahl . . . . .	85
4.15	Ergebnisse bei Variation der Individuen- und Generationenanzahl . . . . .	85
4.16	Vergleich der Online- und Offline-Performance bei Variation der Vorsortierung . . . . .	87
4.17	Vergleich der Online- und Offline-Performance bei Variation der Mutations- und Crossoverwahrscheinlichkeit . . . . .	88
4.18	Vergleich der Online- und Offline-Performance der Szenarien S86 bis S89 . . . . .	89
4.19	Ergebnisse der Szenarien S82 bis S90 . . . . .	89
4.20	Wilhelm Busch Museum: Zusammenstellung aller Varianten für die BF-Berechnung . . . . .	91
4.21	Beispiel für die Wiederholbarkeit der Ergebnisse (je 500 Iterationen) . . . . .	91
A.1	Eingabe der Messpunkte . . . . .	99
A.2	Eingabe der Beobachtungen . . . . .	99
A.3	Eingabe der Wegepunkte . . . . .	100
A.4	Eingabe der Wegekanten . . . . .	100
A.5	Eingabe der Optimierungsparameter . . . . .	101
A.6	Eingabe der Personendaten . . . . .	101
A.7	Wilhelm Busch Museum: Speicherung der Netzdaten in einer XML-Datei (hier: Personendaten und Optimierungsparameter) . . . . .	102
A.8	Wilhelm Busch Museum: Ablauf-Diagramm der Tätigkeiten . . . . .	105

# Tabellenverzeichnis

1.1	Problemklassen und beispielhafte Aufgaben aus der Produktionslogistik und Inge- nieurgeodäsie . . . . .	11
2.1	Netzklassen . . . . .	21
2.2	Schaltdauern der Transitionen . . . . .	27
2.3	Tachymetrische Aufnahme: Distanzmatrix - Dauer [Minuten] . . . . .	42
2.4	Aufbau-, Mess- und Abbaureihenfolge und -aufteilung . . . . .	42
2.5	Schaltdauern der Transitionen (inkl. Tätigkeiten) für die vorgestellten Petri-Netze . . . . .	45
3.1	Distanzmatrix - Dauer in Minuten . . . . .	51
3.2	Stellgrößen für die Optimierung mit GA . . . . .	59
3.3	Tachymetrische Aufnahme: Varianten für den Auf- und Abbau sowie die Reihenfolge der Aufnahmepunkte . . . . .	62
3.4	Tachymetrische Aufnahme: Zusammenstellung aller Varianten . . . . .	62
3.5	Tachymetrische Aufnahme: Erzielte Lösungen bei der Optimierung mittels GA . . . . .	65
4.1	Laufzeitmodell zur tachymetrischen Netzmessung . . . . .	71
4.2	Tachymetrische Netzmessung: Ausschnitt der Berechnungsszenarien für die Parame- terstudien (Szenariengruppe S01-S09) . . . . .	81
4.3	Spezifikationen der Rechner auf denen die Testberechnungen für die Parameterstu- dien durchgeführt wurden . . . . .	83
4.4	Erreichte Lösungen gruppiert nach Szenariengruppen . . . . .	84
4.5	Erreichte Lösungen gruppiert nach Individuen- und Generationenanzahl . . . . .	86
4.6	Empfohlene Anzahl von Individuen und Generationen für die Optimierung einer tachymetrischen Netzmessung (Szenario S100) . . . . .	90
4.7	Empfohlene Stellgrößen für die Optimierung einer tachymetrischen Netzmessung mit genetischen Algorithmen . . . . .	90
4.8	Gegenüberstellung der Ergebnisse der intuitiven Lösungen mit denen der besten Lösungen aus der Optimierung . . . . .	92
A.1	Wilhelm Busch Museum: Attribute der Wegepunkte in der XML-Datei . . . . .	102
A.2	Wilhelm Busch Museum: Attribute der Messpunkte in der XML-Datei . . . . .	103
A.3	Wilhelm Busch Museum: Attribute der Beobachtungen in der XML-Datei . . . . .	103
A.4	Wilhelm Busch Museum: Attribute der Wegekanten in der XML-Datei . . . . .	103
A.5	Wilhelm Busch Museum: Ablaufplan für den Beobachter . . . . .	104
A.6	Wilhelm Busch Museum: Ablaufplan für den Gehilfen . . . . .	104
A.7	Wilhelm Busch Museum: Distanzmatrix - Dauer [Minuten] . . . . .	106
A.8	Wilhelm Busch Museum: Distanzmatrix - Entfernung [Meter] . . . . .	106
A.9	Wilhelm Busch Museum: Routen . . . . .	106
A.10	Prinzengarten: Attribute der Messpunkte in der XML-Datei . . . . .	107
A.11	Prinzengarten: Distanzmatrix - Dauer [Minuten] . . . . .	107
A.12	Prinzengarten: Distanzmatrix - Entfernung [Meter] . . . . .	107
A.13	Elbinsel: Attribute der Messpunkte in der XML-Datei . . . . .	108
A.14	Elbinsel: Distanzmatrix - Dauer [Minuten] . . . . .	108
A.15	Elbinsel: Distanzmatrix - Entfernung [Meter] . . . . .	109

---

A.16 Tachymetrische Netzmessung: Berechnungsszenarien für die Parameterstudien . . . .	110
A.17 Wilhelm Busch Museum: Ergebnisse der Parameterstudien . . . . .	111
A.18 Prinzengarten: Ergebnisse der Parameterstudien . . . . .	112
A.19 Elbinsel: Ergebnisse der Parameterstudien . . . . .	114
A.20 Wilhelm Busch Museum: Zusammenstellung aller 5040 Varianten für die Brute- Force-Berechnung . . . . .	116