



Maßnahmen zur Effizienzsteigerung bei der Durchführung tachymetrischer Netzmessungen

**Ilka Rehr, Nils Rinke,
Hansjörg Kutterer,
Volker Berkahn**

Strategies to improve efficiency of polar network measurements

Um hohe Genauigkeiten bei der Punktbestimmung innerhalb eines geodätischen Grundlagentznetzes zu erreichen, wird auch in Zeiten von genauen Satellitenverfahren nach wie vor die Tachymetrie als Hauptmessverfahren eingesetzt. In geodätischen Netzen großer Ausdehnung oder mit einer Vielzahl von Punkten ist die Messung mithilfe dieses Verfahrens meist mit einem hohen logistischen Aufwand verbunden. Die einzelnen Messpunkte müssen immer wieder angefahren werden, um die Reflektoren zum aktuellen Tachymeterstandpunkt auszurichten. Eine effiziente Planung kann auf der einen Seite möglichst geringe Kosten zum Ziel haben oder auf der anderen Seite eine möglichst geringe Messdauer anstreben. Um bestmögliche Ergebnisse für diese Aufgabe zu erreichen, ist ein komplexes kombinatorisches Optimierungsproblem zu lösen. In diesem Beitrag werden die genetischen Algorithmen (GA) als Optimierungsmethode für die Netzmessungsplanung vorgestellt. Zur Modellierung und Simulation parallel stattfindender Prozesse (z.B. Aufbauen/Ausrichten der Prismen und Messen) werden Petri-Netze verwendet, die mittels des entwickelten Software-Prototypen SimPle-Net (Simulation und Planung effizienter Netzmessungen) eine automatisierte Optimierung mithilfe der GA ermöglichen.

Schlüsselbegriffe: Effizienzoptimierung, geodätische Netzmessung, Petri-Netze, genetische Algorithmen (GA)

To achieve high point accuracy in geodetic network measurements, tachymetry is still used as main measuring method, even in times of precise satellite methods. In geodetic networks with a large extension or high number of points, the measurement demands a high logistic effort. Each point must be approached repeatedly to adjust the prisms to the actual total station position. For an efficient planning of network measurements the achievement of objectives can be the reduction of costs on the one hand or the decrease of the invested time on the other. In order to achieve most efficient results, a complex combinatorial optimization problem has to be solved. In this paper we present genetic algorithms (GA) as an optimization method for planning of network measurements. The software prototype SimPle-Net has been developed to enable an automated optimization using GA. Furthermore, modeling and simulation of parallel processes (e.g. set up/adjust prism and measurement) with Petri nets is presented.

Keywords: efficiency optimization, geodetic network measurement, Petri nets, genetic algorithms (GA)



1 Einleitung

Eine Teilaufgabe des DFG-Projektes EQuIP (Effizienzoptimierung und Qualitätssicherung ingenieurgeodätischer Prozesse im Bauwesen) ist die Effizienzsteigerung von Mess- und Auswerteprozessen. Werden die ingenieurgeodätischen Aufgaben in einem ersten Schritt als Einzelprozesse betrachtet, geht es bei der Steigerung der Effizienz primär um eine Reduktion der Gesamtkosten oder der Gesamtdauer. Je komplexer die Prozesse sind, umso schwieriger ist es, die optimale Lösung mit den geringsten Kosten oder der geringsten Dauer in dem sehr großen Lösungsraum zu finden. Die Planung einer tachymetrischen Netzmessung gehört zu den komplexesten Aufgaben der Ingenieurgeodäsie. Soll eine Netzmessung mit vorgegebenem Design, 0.–2. Ordnung im Sprachgebrauch der Optimierung geodätischer Netze (vgl. SCHMITT, 1979), mög-

lichst wirtschaftlich durchgeführt werden, stellen sich bei der Planung vorab folgende Fragen:

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

Großes Potenzial für eine Effizienzsteigerung bietet dabei die Optimierung der Wege zwischen den Messpunkten. 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 Travelling Salesman Problem (TSP) dar, mit dem die kürzeste Route für die Rundreise ermittelt werden soll. Das TSP wird entweder durch die Berechnung aller Möglichkeiten exakt gelöst oder über heuristische Verfahren möglichst gut an die optimale Lösung angenähert. 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 alle in einer praktikablen Rechenzeit ausgewertet werden können. Schon bei mehr als zehn Städten gibt es für eine Rundreise mit festgelegtem Ausgangspunkt $(11-1)! = 3\,628\,800$ Möglichkeiten, diese durchzuführen. Hier bietet sich die Lösung des TSP mit (Meta-) Heuristiken an, die gerade bei sehr vielen Punkten wesentlich geringere Laufzeiten benötigen.

Übertragen auf die geodätische Netzmessung, werden die Kunden, die die Außendienstmitarbeiter in verschiedenen Städten zu besuchen haben, durch die Messpunkte ersetzt, die mit Messequipment zu bestücken sind. DARE und SALEH (2000) und SALEH und CHELOUAH (2004) haben einen Ablaufplan für die Messung eines GPS-Netzes mit exakten Lösungsverfahren und mit verschiedenen metaheuristischen Lösungsverfahren des Operations Research erstellt. Hierbei spielt neben der reinen Routenplanung auch die Messzeit und das Besetzen mehrerer Punkte zur selben Zeit eine Rolle, die in ihren Ansätzen berücksichtigt werden. Es handelt sich dabei um eine Erweiterung des klassischen TSP auf ein Multisalesman Problem (mTSP) (BELLMORE und HONG, 1974) mit mehreren gekoppelten TSP, wobei m die Anzahl der Personen ist.

Für tachymetrische und GPS-Netzmessungen hat STAUDINGER (1999) eine Kostenfunktion aufgestellt, die die Kostendifferenzen verschiedener Netzvarianten abschätzt und mit deren Hilfe eine möglichst gute Netzkonfiguration (hinsichtlich der Kosten) ermittelt werden kann. In seinem Ansatz werden auch die Wege berücksichtigt, die zwischen den Messpunkten zurückgelegt werden. Das Hauptaugenmerk des Autors liegt aber darauf, unterschiedliche Netzkonfigurationen zu testen und die kostengünstigste zu empfehlen. Eine Optimierung der Reihenfolge der Standpunkte und des Aufbaus der Punkte wurde dagegen nicht durchgeführt.

In dem Ansatz, der in diesem Paper vorgestellt wird, werden die Ideen beider Vorgehensweisen aufgegriffen. 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. Eine detaillierte Beschreibung der verwendeten Kosten- und Laufzeitmodelle ist in REHR und KUTTERER (2010) zu finden. In diesem Ansatz wird – im Gegensatz zu Staudinger – 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 Punktfolgenfolge und Wege, so dass *kosteneffizient* bzw. *laufzeiteffizient* gearbeitet wird. Aufgrund der Komplexität des Problems werden heuristische Verfahren zur näherungsweise Lösungssuche benötigt. Mit ihnen wird zwar nicht unbedingt die beste Lösung erreicht, aber eine gute zulässige Lösung in akzeptabler Rechenzeit.

HOFMANN (2008) hat für die Optimierung von Materialflüssen innerhalb von Bauprozessen eine Kombination von Petri-Netzen (als Simulationsverfahren) und genetischen Algorithmen (als Optimierungsverfahren) angewendet und damit gute Ergebnisse erzielt. So eine Kombination bietet sich auch für die Optimierung der Abläufe einer Netzmessung an. Mit den Petri-Netzen können Prozesse, die in der Realität parallel ablaufen (z.B. Aufbauen und Messen), als parallele Prozesse einfach modelliert und simuliert werden. Außerdem können Bedingungen für bestimmte Prozesse eingeführt werden, ohne deren Erfüllung andere Prozesse nicht starten können. Eine Satz-messung soll z.B. nicht starten, wenn noch nicht alle zugehörigen Zielpunkte aufgebaut wurden. Zur Lösung der Routenplanung zwischen den Messpunkten werden die genetischen Algorithmen eingesetzt.

Im Folgenden wird die Modellierung einer tachymetrischen Netzmessung mittels eines Petri-Netzes erläutert. Anschließend wird auf die Effizienzoptimierung der Abläufe mit genetischen Algorithmen eingegangen. Am Ende werden die bisher erzielten Ergebnisse vorgestellt.

2 Modellierung der tachymetrischen Netz-messung mit Petri-Netzen

Für die Modellierung der tachymetrischen Netz-messung werden verschiedene Anforderungen an das Modell gestellt. Es muss zunächst eine einfache, automatisierte Simulation und die Modellierung parallel ablaufender Prozesse ermöglichen. Außerdem sollte die Möglichkeit zur Integration zusätzlicher Teilprozesse bestehen, sowie die einfache Handhabung wiederkehrender Prozesse. Schließlich muss das Modell eine Möglichkeit bereitstellen, zeitliche Aspekte zu berücksichtigen. Das Petri-Netz der klassischen Graphentheorie erfüllt alle genannten Kriterien.

Ein Petri-Netz ist eine Erweiterung eines bipartiten Graphen, in dem die Prozesse durch *Wandern* von Informationen (eingespeichert in sog. *Marken*) entlang von *Kanten* zwischen den *Knoten* des Graphen modelliert werden. Durch Restriktionen an den Kanten kann zusätzlich sichergestellt werden, dass ein Prozess nur dann stattfindet, wenn alle benötigten Informationen in den Vorgängerkno-

ten enthalten sind. Informationen zum Aufbau von Petri-Netzen sind zum Beispiel in REISIG (1982) oder OBERWEIS (1996) zu finden.

2.1 Komponenten eines Petri-Netzes

Ein Petri-Netz setzt sich aus vier Komponenten zusammen. Dazu gehören:

2.1.1 Stellen

Stellen (auch *Plätze* genannt) modellieren passive Komponenten eines Prozesses. In Stellen können *Marken* gelagert oder gespeichert werden. Stellen können bestimmte *Zustände* aufweisen und verfügen über eine *Kapazität*, die angibt, wie viele Marken sie aufnehmen können. Stellen werden in Petri-Netzen als Kreise dargestellt.

2.1.2 Transitionen

Transitionen modellieren die aktiven Komponenten eines Prozesses. In Transitionen können *Marken* erzeugt, verbraucht, transportiert oder verändert werden. Das Ausführen einer Transition wird als *Schalten* bezeichnet. Wenn eine Transition geschaltet wird, werden die Marken der Stellen im Vorbereich einer Transition nach bestimmten Regeln in die Stellen des Nachbereiches bewegt. Transitionen werden in Petri-Netzen als Rechteck oder Quadrat dargestellt.

2.1.3 Marken

Marken (auch *Token* genannt) sind Objekte der realen Welt, die als Information auf einer Stelle liegen können. Neben realen Objekten können Marken auch die Erfüllung von Bedingungen darstellen. Marken werden als Punkte dargestellt, die auf Stellen liegen und durch das Schalten von Transitionen durch das Petri-Netz wandern. Je nach Art des Petri-Netzes können mehrere Marken auf einer Stelle liegen oder sie können zusätzlich Informationen beinhalten.

2.1.4 Kanten

Die Kanten in einem Petri-Netz modellieren abstrakte Beziehungen zwischen den Komponenten, indem sie Stellen mit Transitionen verbinden und umgekehrt. Eine Verbindung gleichartiger Komponenten ist nicht möglich. Kanten können Restriktionen für das Schalten einer Transition vorgeben, wie zum Beispiel eine Angabe, wie viele Marken über die Kante transportiert werden.

2.2 Arten von Petri-Netzen

Es gibt unterschiedliche Arten von Petri-Netzen in denen die vorgestellten Komponenten verschiedene Funktionen erfüllen können:

2.2.1 Bedingungs-Ereignis-Netz

Die ursprüngliche Art des Petri-Netzes wird als Bedingungs-Ereignis-Netz (B/E-Netz) bezeichnet. In einem B/E-Netz repräsentieren die Stellen die Bedingungen für Ereignisse, die ihrerseits durch Transitionen darge-

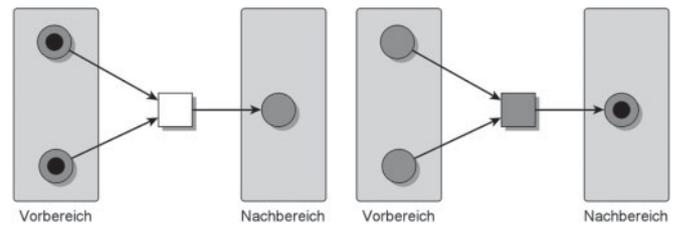


Abb. 1: *Bedingungs-Ereignis-Netz (links: vor dem Schalten der Transition, rechts: nach dem Schalten der Transition)*

stellt werden. Besitzt eine Stelle eine Markierung, liegt eine Bedingung vor. Sind alle Bedingungen des Vorbereichs einer Transition erfüllt und ist der Nachbereich der Transition nicht durch eine Marke belegt, ist die Transition schaltbereit (vgl. Abbildung 1). Nach dem Schalten der Transition wandern die Marken vom Vorbereich in den Nachbereich der Transition.

2.2.2 Stellen-Transitions-Netz

In Stellen-Transitions-Netzen (S/T-Netzen) kann eine Stelle mehrere Marken aufnehmen. Die Anzahl der maximal aufzunehmenden Marken wird über die Kapazität der Stelle ausgedrückt. Weiter können über eine Kante mehrere Marken wandern. Wie viele es sind, wird über das Kantengewicht geregelt. Eine Transition ist *schaltbereit*, wenn die Anzahl der Marken im Vorbereich die Anforderungen der jeweiligen Kanten erfüllt und der Nachbereich genügend freie Plätze bereitstellt (vgl. Abbildung 2).

2.2.3 Farbiges Petri-Netz

Neben den beiden bisher vorgestellten Petri-Netz-Arten gibt es noch die sogenannten farbigen Petri-Netze (CP-Netze), in denen die Marken bestimmte Eigenschaften haben. Marken mit gemeinsamen Eigenschaften können zu einem Markentyp mit der gleichen Farbe zusammengefasst werden. So könnte zum Beispiel das Messpersonal als ein Markentyp definiert werden und die Messausrüstung als weiterer Markentyp. Farbige Petri-Netze werden vor allem dann eingesetzt, wenn nur die Existenz einer Marke eines bestimmten Typs erforderlich ist, die darin enthaltene Information aber nicht benötigt wird. Die Umsetzung solcher Petri-Netze ist aufwändiger als die Modellierung in einem S/T-Netz, da zum Beispiel jede Kante nun Restriktionen für jeden Markentyp vorgeben muss. Für das im Text gezeigte Beispiel der Netzmessung ist die Modellierung mit einem S/T-Netz ausreichend, es sind aber durchaus Messprozesse denkbar, die eine Modellierung mit einem CP-Netz erfordern.

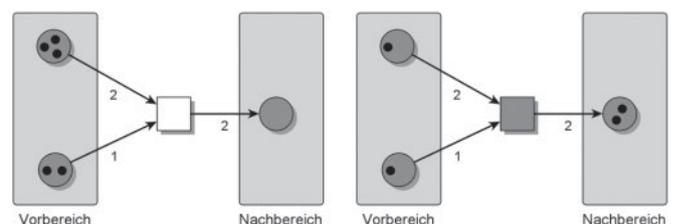


Abb. 2: *Stellen-Transitions-Netz (links: vor dem Schalten der Transition, rechts: nach dem Schalten der Transition)*



2.2.4 Handhabung zeitlicher Aspekte

Alle genannten Petri-Netze modellieren das Eintreten von Ereignissen über das Schalten der Transitionen. Um die Dauer eines Ereignisses zu modellieren, kann das Schalten mit einem Zeitwert belegt werden. Wenn die Bedingungen für das Schalten vorliegen, werden die beteiligten Marken von den Stellen entfernt und zwischengespeichert. Nach Ablauf der Dauer werden diese Marken dann entsprechend der Kantenrestriktionen des Nachbereiches auf die Stellen gesetzt. Es wird ersichtlich, dass auch Ereignisse, die keine Dauer besitzen, einfach modelliert werden können, indem die Marken im selben Simulationsschritt weiter transportiert werden und für nachfolgende Transitionen verfügbar sind. Da Transitionen auch unterschiedlich lange Ausführungszeiten besitzen können (wie z.B. Fahrten von einem Standpunkt zum anderen), werden Möglichkeiten zur Kopplung weiterer Prozesse oder Algorithmen in Form von dynamischen Transitionen benötigt (RINKE und HOFFMANN, 2009).

2.3 Petri-Netz der tachymetrischen Netzmessung

Als Petri-Netz für die Modellierung und Simulation der tachymetrischen Netzmessung wurde ein S/T-Netz gewählt. In Abbildung 3 ist das vollständige Petri-Netz dargestellt, so wie es für die computergestützte Simulation verwendet wird. Mit jeder schaltenden Transition, wird die Dauer der Durchführung der Aktion berechnet. Die Dauer des Schaltens der Transition *Aktuellen SP ermitteln* (SP: Standpunkt) ist immer Null, da es sich dabei lediglich um eine Rechenoperation handelt. Diese Transition wird in Weiß dargestellt. Transitionen, bei denen eine Aktion des Messpersonals im Feld simuliert wird, werden in Grau dargestellt.

2.3.1 Anfangsmarkierung

Die Stellen *Reihenfolge der SP* und *ZP für nächsten SP aufgebaut* (ZP: Zielpunkt) besitzen eine Anfangsmarkierung. Die Stelle *Anzahl SP* beinhaltet so viele Marken, wie es Standpunkte ($n = \text{Anzahl der SP}$) gibt, da das Petri-Netz genau so viele Durchläufe haben soll.

2.3.2 Prioritäten

Im ersten Schritt können die Transitionen *Aktuellen SP ermitteln* oder *Abbau* geschaltet werden, wobei die erste Transition Priorität hat und solange vorgezogen wird, bis alle Marken von der Stelle *Anzahl SP* aufgebraucht sind. Dann ist die Transition *Aktuellen SP ermitteln* nicht mehr schaltfähig (es werden nicht mehr alle Bedingungen des Vorbereichs erfüllt) und die zweite Transition *Abbau* schaltet zum Beenden der Messung.

2.3.3 Standpunktermittlung und Aufbau

Die Transition *Aktuellen SP ermitteln* sucht aus einer Liste mit Standpunkten den aktuellen Standpunkt heraus, indem die Liste von oben nach unten mit den Durchläufen des Petri-Netzes abgearbeitet wird. Nach dem Schalten dieser Transition werden Marken auf den beiden Stellen *SP ermitteln* erzeugt und die Transitionen *Aufbau SP* und *Aufbau ZP akt. SP* können parallel durchgeführt werden. Damit die Modellierung in dieser Art durchgeführt werden kann, werden mindestens zwei Personen (1 Beobachter + 1 Gehilfe) benötigt. In der derzeitigen Implementierung ist mehr als ein Gehilfe vorsehbar, allerdings nur ein Beobachter. Eine Erweiterung für den Einsatz von mehreren Messtrupps ist in Vorbereitung. Die Dauer für das Schalten der Transitionen richtet sich nach der Anzahl der Punkte, die aufgebaut werden sollen, den Wegen zu und zwischen den Punkten und der Anzahl der Personen, die am Aufbau beteiligt sind.

2.3.4 Messung

Erst wenn beide Transitionen abgeschlossen sind und Marken auf den Stellen *SP aufgebaut* und *ZP aufgebaut* erzeugt wurden, kann die Messung durchgeführt werden. Der Anfangszeitpunkt für die Transition *Messung* ist also derjenige, an dem die länger dauernde Aktion abgeschlossen wurde. Die Dauer der Messung hängt im Wesentlichen von der Anzahl der zu messenden Punkte und der Anzahl der Vollsätze ab.

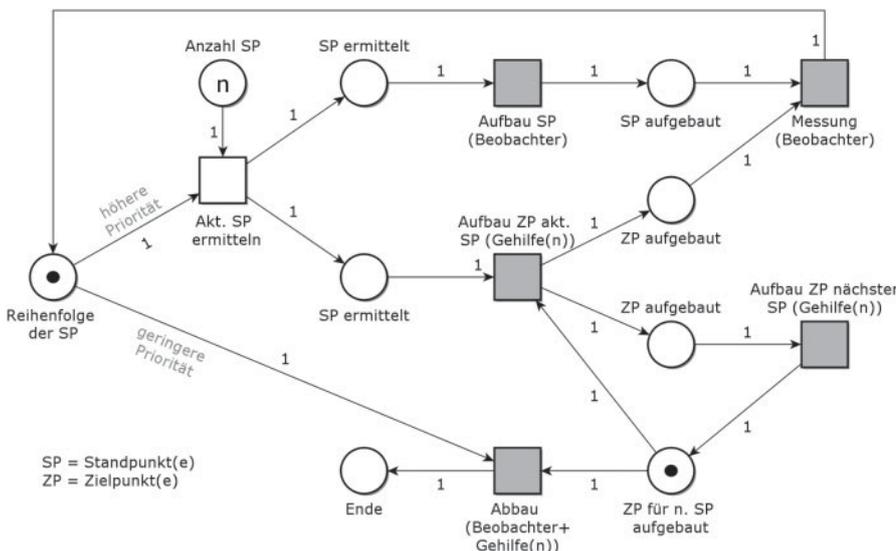


Abb. 3: Petri-Netz der tachymetrischen Netzmessung

2.3.5 Aufbau für den nächsten SP

Parallel zur *Messung* werden die Zielpunkte des nächsten Standpunktes aufgebaut, sofern sie nicht in der aktuellen Messung verwendet werden. Außerdem können Punkte, die für die gesamte Netzmessung nicht mehr benötigt werden, in diesem Prozessschritt abgebaut werden. Innerhalb der Planung ist vorgesehen, dass mit Zwangszentrierung gearbeitet wird und Prismen, die bereits aufgebaut sind, für nachfolgende Standpunkte bei Bedarf neu ausgerichtet werden. Hierbei wird in der derzeitigen Entwicklungsstufe des Softwaretools davon ausgegangen, dass ausreichend Ausrüstung zur Verfügung steht. Die Dauer der Transition *Aufbau ZP nächster SP* richtet sich nach der Anzahl der Punkte, den damit verbundenen Wegen zu und zwischen den Punkten und den Aufbau-, Umbau- und Abbauzeiten. Nach Abschluss des Aufbaus wird eine Marke zur Stelle *ZP für n. SP aufgebaut* transportiert. Nach Abschluss der *Messung* wird schließlich eine Marke zur Stelle *Reihenfolge der SP* befördert und der Kreislauf kann von neuem für den nächsten Standpunkt beginnen. Der nächste Standpunkt wird in der Transition *Akt. SP ermitteln* herausgesucht und danach baut der Beobachter in der darauf folgenden Transition *Aufbau SP* sein Tachymeter am vorherigen Standpunkt ab, setzt ein Prisma auf den Punkt und richtet es zum nächsten Standpunkt aus. Dann fährt er zum nächsten Standpunkt und baut dort sein Tachymeter auf. Diese beiden Transitionen können schon beginnen, während die Gehilfen noch die Transition *Aufbau ZP n. SP* durchführen. Die Transition *Aufbau ZP akt. SP* kann dagegen erst schalten, wenn die Gehilfen damit fertig sind und eine Marke auf der Stelle *ZP n. SP aufgebaut* erzeugt wurde.

2.3.6 Automatischer Zeitabgleich

In dem Netz gibt es drei Stellen, an denen die Zeit automatisch abgeglichen wird. Die Transition *Messung* kann nur schalten, wenn beide Vorbedingungen *SP aufgebaut* und *ZP aufgebaut* erfüllt sind. Die Transition *Aufbau ZP akt. SP* kann erst beginnen, wenn die Messung des vorherigen Standpunktes abgeschlossen ist. In der Zielpunktmenge könnten sonst noch Punkte enthalten sein, die während des laufenden Messprozesses benötigt werden und ohne diese Bedingung fälschlicherweise zu früh weggedreht werden könnten. Der letzte Zeitabgleich findet vor dem *Abbau* am Ende der Netzmessung statt. Die Punkte dürfen erst abgebaut werden, wenn die Messungen des letzten Standpunktes abgeschlossen wurden.

2.3.7 Ergebnisse der Simulation

Als Endergebnisse der Simulation werden die Gesamtdauer der Netzmessung, die dabei zurückgelegte Strecke und die daraus resultierenden Kosten abgespeichert. Zur Berechnung der Kosten werden die Personalkosten pro Stunde mit der Gesamtdauer sowie die Kosten pro Kilometer mit der zurückgelegten Strecke multipliziert und summiert (vgl. REHR und KUTTERER, 2010). Außerdem wird für jede Person eine Auftragsliste erstellt, die am Ende als Text-Datei ausgegeben wird.

3 Ablauf einer Effizienzoptimierung

3.1 Modell

Das Modell der Effizienzoptimierung besteht aus den Eingangs- und Ausgangsgrößen des Messprozesses. Zu den Eingangsgrößen gehören unter anderem die Anzahl der Personen, Fahrzeuge, Messinstrumente und die Reihenfolge der Standpunkte. Als Ausgangsgrößen werden die Dauer und die Kosten des Messprozesses verstanden. Den Zusammenhang zwischen den Eingangs- und Ausgangsgrößen stellt die Effizienzoptimierung dar. Sie sorgt dafür, dass die Eingangsgrößen so zusammengestellt werden, dass das Optimierungsziel (*laufzeiteffizient* oder *kosteneffizient*) bestmöglich erreicht wird. Für diese Aufgabe wird ein Optimierungsverfahren benötigt, dessen Arbeitsweise im nächsten Abschnitt beschrieben wird.

3.2 Optimierungsverfahren

Das Ziel des Optimierungsverfahrens ist je nach Effizienzkriterium die Minimierung der Gesamtkosten (Kosteneffizienz) oder der Gesamtdauer (Laufzeiteffizienz) eines ingenieurgeodätischen Prozesses.

Bei einer Optimierung hinsichtlich Kosteneffizienz sind die Eingangsgrößen des Prozesses so zu wählen, dass möglichst geringe Gesamtkosten entstehen. Im Gegensatz dazu spielen die Kosten bei der Optimierung mit dem Effizienzkriterium der geringen Gesamtdauer eine untergeordnete Rolle und die Eingangsgrößen werden so gewählt und kombiniert, dass die Dauer des Messprozesses möglichst gering wird. Für eine Anwendung der Netzplanungssoftware in der Praxis müsste das Modell zusätzlich um Randbedingungen erweitert werden. Eine mögliche Randbedingung wäre die Festlegung maximal zulässiger Kosten bei Optimierung der Gesamtdauer. Andersherum könnte auch eine maximal zulässige Dauer bei Minimierung der Kosten festgelegt werden.

In einer Netzmessung stellen besonders die Messreihenfolge, die Aufbaureihenfolge und die Suche nach den optimalen Wegen zwischen den Punkten ein komplexes kombinatorisches Problem dar. Für komplexe Probleme werden in der Informatik häufig heuristische Verfahren zur näherungsweise Lösungssuche angewendet. Damit wird zwar nicht unbedingt die optimale Lösung, aber eine gute zulässige Lösung erreicht.

Bei den heuristischen Verfahren bieten lokale Suchverfahren die Möglichkeit, lokale Minima wieder zu verlassen. Zu diesen Verfahren gehören zum Beispiel die naturanalogen Verfahren Simulated Annealing oder die evolutionären Algorithmen (z.B. genetische Algorithmen). Eine detaillierte Erläuterung der Verfahren ist z.B. in DOMSCHKE und DREXL (2005), BOERSCH u.a. (2007) oder WEICKER (2007) zu finden. An dieser Stelle soll ein kurzer Überblick über die Optimierung von Abläufen mit genetischen Algorithmen gegeben werden, da dieses Verfahren in dem hier vorgestellten Software-Prototypen implementiert wurde.

3.2.1 Genetische Algorithmen

Genetische Algorithmen gehören zur Gruppe der evolutionären Algorithmen, die auf dem Prinzip der biologischen Evolution nach Darwin beruhen („survival of the fittest“). Zu Beginn des Verfahrens wird eine Lösungsmenge (Population) bestehend aus einer Reihe von Individuen zufällig erzeugt. Die Individuen bestehen jeweils aus einer sequentiellen Folge der Eingabeparameter (Genotyp), optionalen Zusatzinformationen und einem individuell berechneten Fitnesswert (vgl. Abbildung 4). Die Berechnung des Fitnesswertes wird über eine zu Beginn des Verfahrens definierte Bewertungsfunktion vorgenommen. Zur Berechnung dieser Fitness wird der codierte Genotyp (oft binär- oder permutationscodiert) decodiert. Im Falle der tachymetrischen Netzmessung stellt der Phänotyp die Reihenfolge der Standpunktnummern dar und der Genotyp wird durch eine Permutation von 1 bis n (n = Anzahl Standpunkte) gebildet, wobei jede Zahl einer Standpunktnummer zugeordnet wird (vgl. Abbildung 8 oben). Die Codierung wird vorgenommen, um die nachfolgend beschriebenen evolutionären Operatoren einfacher und allgemein gültig anwenden zu können. Die vorhandene Population wird durch folgende Maßnahmen in Anlehnung an die Evolutionstheorie verändert:

3.2.2 Selektion

Aus der Population wird per Selektionsverfahren ein Teil der Individuen ausgewählt. Die so selektierten Individuen werden zur Erzeugung der nächsten Generation von Individuen verwendet. Die Auswahl der Individuen wird über deren Fitnesswerte gesteuert. Über die Wahl des Selektionsverfahrens kann der Selektionsdruck und damit verbunden auch der Verlust der Vielfältigkeit gesteuert werden. In der Dissertation von POHLHEIM (1998) sind verschiedene Selektionsverfahren beschrieben und miteinander verglichen worden. Die Wahl des Verfahrens ist letztendlich davon abhängig, welcher Selektionsdruck erzeugt werden soll und wie stark der Suchbereich dadurch eingeschränkt werden soll.

3.2.3 Rekombination/Crossover

Von den selektierten Individuen werden mit einer festzulegenden Rekombinationswahrscheinlichkeit zwei Individuen miteinander gekreuzt und dadurch zwei neue Individuen erzeugt. Die Einführung einer Rekombinationswahrscheinlichkeit ist eine Besonderheit der genetischen Algorithmen. Hierdurch besteht die Möglichkeit, dass Individuen erhalten bleiben und unverändert in die nächste Generation übergehen können.

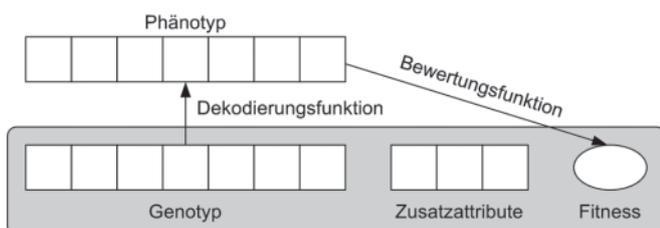


Abb. 4: Bestandteile eines Individuums (nach WEICKER, 2007)

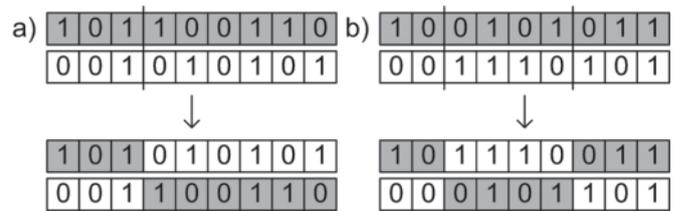


Abb. 5: Crossovervarianten: a) 1-Punkt-Crossover und b) 2-Punkt-Crossover

Der Crossover-Operator 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 5 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 Travelling Salesman Problem), bei denen jeder Wert nur einmal im Parametervektor auftreten darf, ist es wichtig, permutationserhaltende Operatoren für die Rekombination zu verwenden. Zu diesen Operatoren gehören das Partially Matched Crossover (PMX), das Ordered Crossover (OX) und das Cycle Crossover (CX). Das PMX in Abbildung 6 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 des 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.

3.2.4 Mutation

Die Merkmale der rekombinierten Lösungen werden an einer oder mehreren Stellen mit einer festzulegenden Mutationswahrscheinlichkeit zufällig verändert und der

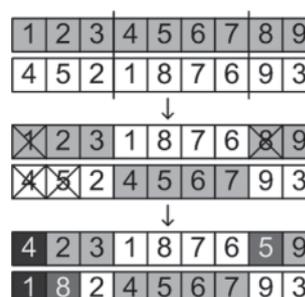


Abb. 6: Partially Matched Crossover (PMX)



Abb. 7: Permutationserhaltende Mutationsoperatoren:
 1. Tausch zweier Gene, 2. Verschieben eines Teilstrings,
 3. Inversion (Umdrehen) eines Teilstrings, 4. Permutation
 (Mischen) eines Teilstrings

neuen Generation zugefügt. Die *Standardmutation* verändert die Bitcodierung des Genotyps: mit einer bestimmten Mutationswahrscheinlichkeit werden ein oder mehrere Bits des Parametervektors negiert. Auch bei der Mutation sind bei permutationscodierten Genotypen *permutationserhaltende Operatoren* zu verwenden. Abbildung 7 zeigt mögliche permutationserhaltende Operatoren.

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

3.3 Anwendung des Optimierungsverfahrens

Zu Beginn der Effizienzoptimierung wird eine Population erzeugt, die Individuen mit verschiedenen Standpunktfolgen und eine zufällig erzeugte Anzahl von Personen (≥ 2) zur Durchführung der Netzmessung besitzt. Die Standpunktfolgenfolge wird über die Lösung eines Travelling Salesman Problems vorsortiert, um die Anzahl der Individuen und die Anzahl der Generationen der nachfolgenden Optimierung möglichst gering zu halten. Diese Vorgehensweise hat sich nach mehreren Testdurchläufen (mit und ohne Vorsortierung) als günstig erwiesen, da ohne Vorsortierung viele Lösungen berechnet werden, die völlig abwegig sind und dadurch unnötig Rechenzeit beanspruchen.

3.3.1 Vorsortierung der Standpunkte

Die Abfolge der Standpunkte wird durch permutationscodierte Genotypen dargestellt und über das TSP wird die kürzeste Route für eine „Rundreise“ zwischen den Standpunkten gesucht. Dabei werden die Messzeiten und der Aufbau der Zielpunkte noch nicht berücksichtigt. Die so gefundenen Lösungen bilden die Basis für die Standpunktfolgenfolge. Ihre permutationscodierten Genotypen werden für die Erzeugung der Individuen (inkl. Anzahl der Personen) nach Abbildung 4 verwendet. Mit diesen Individuen wird anschließend die Optimierung für die Planung der tachymetrischen Netzmessung durchgeführt. Innerhalb der Optimierung wird für jedes Individuum der Population ein Fitnesswert berechnet. Die Bewertung der Fitness erfolgt nach dem vorgegebenen Effizienzziel *lauffzeiteffizient* oder *kosteneffizient*.

Bei der Netzoptimierung wird zum einen die Reihenfolge der Standpunkte und zum anderen der Aufbau der Zielpunkte optimiert (vgl. Abbildung 8). Die Lösung der einzelnen Optimierungsaufgaben erfolgt mithilfe von genetischen Algorithmen.

3.3.2 Optimierung der Standpunktfolgenfolge

Die Reihenfolge der Standpunkte wird, wie bereits erwähnt, durch permutationscodierte Genotypen dargestellt. Zur Berechnung der Fitness eines Individuums wird das Petri-Netz aus Abbildung 3 verwendet. Die Individuen mit der Standpunktfolgenfolge sind wie in Abbildung 8 (oben) aufgebaut. Im Phänotyp stehen die Punktnummern der Standpunkte und im Genotyp die zugeordneten Integer-Werte. Das Zusatzattribut mit der Anzahl der Personen legt außerdem fest, mit wievielen Personen die Netzmessung für dieses Individuum durchgeführt werden soll. Bei jedem Durchlauf wird ein Standpunkt aus dem Phänotyp bzw. Genotyp gewählt und die entsprechenden Aufbau-, Umbau- und Messzeiten werden in den Transitionen berechnet. Für die Transitionen *Aufbau...* und *Abbau* werden zusätzliche Optimierungsverfahren zur Festlegung des optimalen Aufbaus/Umbaus/Abbaus der Zielpunkte des gewählten Standpunktes benötigt.

3.3.3 Optimierung des Aufbaus der Zielpunkte

a) Aufteilung der Zielpunkte

Nach der Auswahl des aktuellen Standpunktes aus der Liste der Standpunkte (z.B. M1005 in Abbildung 8), werden die für den gewählten Standpunkt benötigten Zielpunkte den Gehilfen zum Aufbauen zugeordnet. Diese Zuordnung erfolgt ebenfalls mit genetischen Algorithmen, sobald mehr als ein Gehilfe zur Verfügung steht. Bei einem Gehilfen erübrigt sich diese Aufteilung. Der Genotyp für die Aufteilung der Punkte enthält Integer-Werte deren Wertebereich abhängig von der Anzahl der Gehilfen ist (vgl. Abbildung 8 Mitte). Über die Werte im Genotyp wird geregelt, welche Punkte welcher Person zugeordnet werden. Dabei kann es vorkommen, dass ein Gehilfe sehr viele oder sogar alle Punkte aufbaut, wenn sich die Punkte in seiner Nähe befinden und sehr dicht beieinander liegen. Der oder die anderen Gehilfen bauen dann nur wenige oder gar keine Punkte auf.

b) Aufbaureihenfolge der Zielpunkte

Die einem Gehilfen zugeordneten Messpunkte werden, wie bei der Optimierung der Standpunktfolgenfolge, mithilfe von permutationscodierten Genotypen möglichst gut angeordnet (vgl. Abbildung 8 unten).

Die Fitness des Individuums berechnet sich über die Summe der Zeiten für die zurückgelegten Wege und der Aufbau-, Umbau und Abbauezeiten an den einzelnen Zielpunkten. Insgesamt wird die Zeit des Gehilfen als Fitnesswert abgespeichert, der am längsten für die Erledigung seiner Aufgaben benötigt. Über dieses Verfahren wird erreicht, dass alle aufzubauenden Punkte gut auf die Gehilfen verteilt werden und dass die Gehilfen möglichst die Punkte in der Nähe ihrer Position aufbauen. Die beste Aufteilung und Kombination der Punkte liefert schließlich die geringste Gesamtdauer als den besten Fitnesswert.

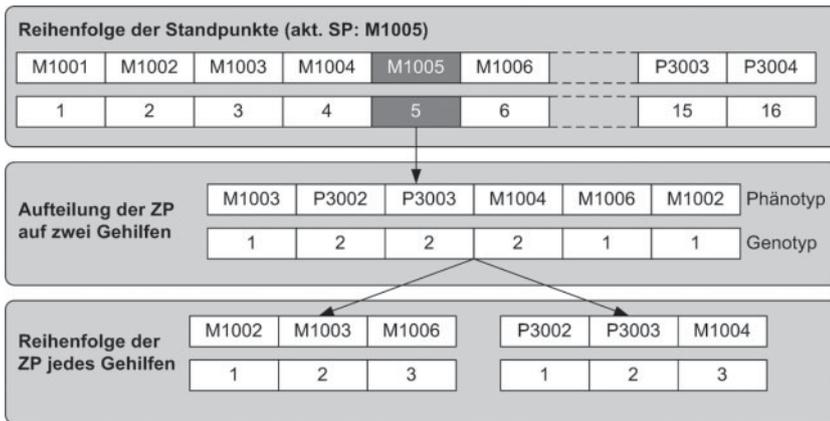


Abb. 8: Reihenfolge der Standpunkte und Aufbau der Zielpunkte

Das Individuum mit dem besten Fitnesswert wird damit als Ergebnis der Optimierung der Aufbaureihenfolge der Zielpunkte zurückgegeben und geht in die Gesamtberechnung der Optimierung der Standpunktreihenfolge als Teilprozess ein.

4 Beispiele

4.1 Ausgangsdaten

4.1.1 Testgebiete

Zum Testen des entwickelten Verfahrens wurden zwei Messgebiete ausgewählt. Bei dem ersten Testgebiet handelt es sich um ein einfaches Netz mit sechs Punkten (vgl. Abbildung 9). Innerhalb des Netzes sind 20 Beobachtun-

gen vorgesehen und es besteht eine direkte Wegverbindung zwischen den Punkten. Von der zusätzlichen Modellierung eines Wegenetzes wurde in diesem kleinen Beispiel abgesehen; hier entspricht das Wegenetz dem Beobachtungsnetz.

Als zweites Messgebiet wurde eine größere Netzmessung mit 16 Messpunkten und 84 Beobachtungen gewählt (Abbildung 10 links). Da keine direkte Wegverbindung zwischen den meisten Messpunkten besteht, wurde zusätzlich ein Wegenetz modelliert (Abbildung 10 rechts), indem Wegpunkte eingeführt und die Wegverbindungen in Form eines gerichteten Graphen abgespeichert wurden. Die Wegekanten besitzen als zusätzliches Attribut die typische Geschwindigkeit und die daraus resultierende Dauer, die für den Wegabschnitt benötigt wird.

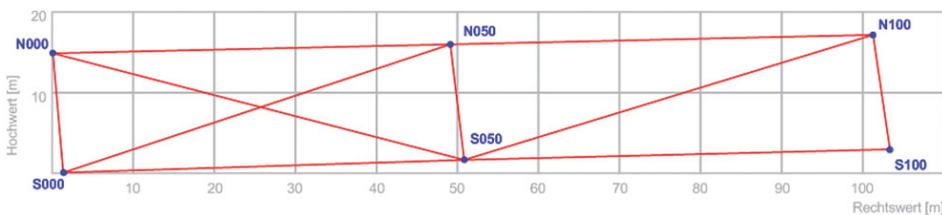


Abb. 9: Einfaches Beobachtungs- und Wegenetz mit sechs Punkten

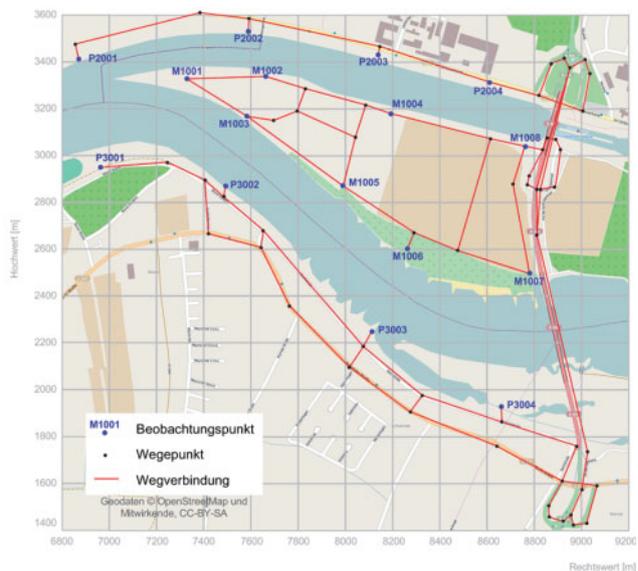
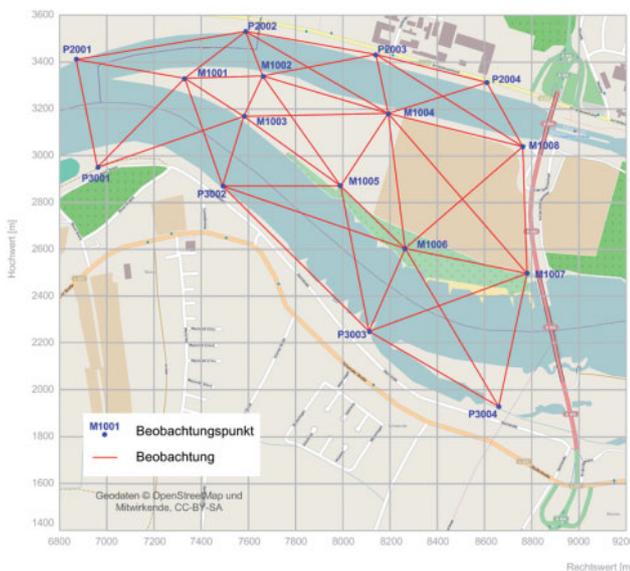


Abb. 10: Beobachtungsnetz (links) und Wegenetz (rechts) mit 16 Punkten

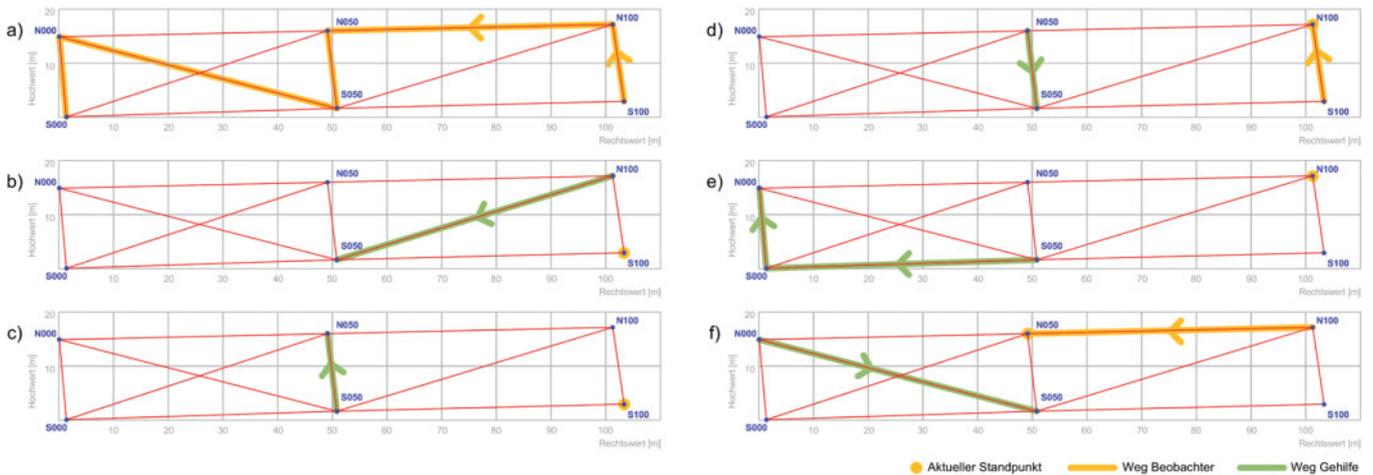


Abb. 11: Ablaufplan der Netzmessung für die ersten drei Standpunkte: a) Reihenfolge der Standpunkte b) Aufbau der Zielpunkte N100 und S050 für den ersten Standpunkt S100 und Aufbau des Standpunktes S100 c) Aufbau des Zielpunktes N050 für den nächsten Standpunkt N100, während der Messung von S100 d) Drehen des Zielpunktes S050 zum nächsten Standpunkt N100 und Umbau S100 und N100 für nächsten Standpunkt N100 e) Aufbau der Zielpunkte S000 und N000 für den nächsten Standpunkt N050, während der Messung von N100 f) Drehen des Zielpunktes S050 zum nächsten Standpunkt N050 und Umbau N100 und N050 für nächsten Standpunkt N050

4.1.2 Angesetzte Kosten

In den Beispielen wurden die Personalkosten des Beobachters mit 60 Euro/Stunde und die der Gehilfen mit 30 Euro/Stunde angesetzt. Für die zurückgelegten Kilometer mit einem Fahrzeug wurden 0,30 Euro/km angenommen, wobei in dem zweiten Messgebiet jeder an der Netzmessung beteiligten Person ein Fahrzeug zur Verfügung stand und die Anfahrtkosten zum Messgebiet nicht berücksichtigt wurden. Im ersten Beispiel wurden die Wege zu Fuß zurückgelegt. Für das Instrumentarium und das Messzubehör wurden in den Beispielen keine Kosten veranschlagt, da es in erster Linie um den Vergleich verschiedener Durchführungsvarianten ging und nicht um die vollständige Kostenkalkulation eines Messauftrags. Alle genannten Parameter können über die Eingabemaske des entwickelten Programms SimPle-Net (Simulation und Planung effizienter Netzmessungen) individuell eingestellt werden.

4.2 Ergebnisse

4.2.1 Testgebiet mit sechs Punkten

Für Netze mit sehr wenigen Punkten kann zur Evaluierung des implementierten Optimierungsverfahrens eine Lösung mit der Brute-Force-Methode berechnet werden. Für das Beispiel mit sechs Punkten gibt es $6! = 720$ mögliche Standpunktreihenfolgen und für jeden Standpunkt bis zu 5! Möglichkeiten die Reihenfolge der aufzubauenen Zielpunkte zu wählen. Die aus der Berechnung aller Lösungen erhaltene optimale Lösung mit Optimierungsziel *kosteneffizient* benötigt bei der Durchführung mit einem Beobachter und einem Gehilfen 1,8 Stunden, bei einer zurückgelegten Distanz von 0,742 km und Kosten von 162 Euro. Die Steigerung gegenüber der schlechtesten Lösung (2,3 Stunden/1,067 km/206 Euro) beträgt damit für dieses Beispiel 27 %. Der Anfang des Ablaufplans

für die optimale Mess- und Aufbaureihenfolge mit zwei Personen ist in Abbildung 11 dargestellt.

Anschließend wurde der Ablauf der Netzmessung mit dem implementierten Optimierungsverfahren (20 Individuen, 20 Generationen) in zehn Testdurchläufen berechnet. Das optimale Ergebnis wird für dieses kleine Netz in neun Fällen erreicht. In einem Fall verlängert sich die zurückgelegte Strecke um 1,5 %. Auf die Kosten und die Dauer hat dies jedoch keine Auswirkungen.

4.2.2 Testgebiet mit 16 Punkten

Für das Beispiel mit 16 Punkten ist eine Berechnung der optimalen Lösung mit der Brute-Force-Methode nicht mehr durchführbar, da es allein für die Anordnung der Standpunkte $16! \approx 21$ Billionen Möglichkeiten gibt. Dazu kommen noch die verschiedenen Varianten des Aufbaus der Zielpunkte. Hier wurde deshalb nur der Vergleich verschiedener Lösungen durchgeführt, die mit dem entwickelten Verfahren berechnet wurden. Das bisher beste Ergebnis bei einer Optimierung mit dem Effizienzziel *kosteneffizient* wurde in einem Testdurchlauf mit 50 Individuen und 50 Generationen erzielt. Es führte zu einem Ergebnis von 751 Euro Gesamtkosten, einer Dauer von 6,07 Stunden und einer zurückgelegten Distanz von 170,6 km bei der Durchführung der Netzmessung mit drei Personen. In Abbildung 12 (rechts) ist die Route des Messenden dieser Variante in Orange eingezeichnet. Die Reihenfolge der Standpunkte ist in diesem Fall nicht der kürzeste Weg zwischen den Punkten, sondern eine leicht abgewandelte Route. Es ist zu erkennen, dass die Personen zwar insgesamt weitere Wege zurücklegen (etwa 20 km), die Abläufe sind allerdings zeitlich besser aufeinander abgestimmt. Die Wartezeiten der einzelnen Personen sind geringer und die Aufteilung der Punkte kann gleichmäßiger erfolgen als bei der kürzesten Route, so dass beide Gehilfen gleich stark ausgelastet sind. Die Kosten bei der Wahl der kürzesten Verbindung



Abb. 12: Vergleich zwischen der kürzesten Route (links) und der ermittelten besten Route (rechts) zwischen den Standpunkten

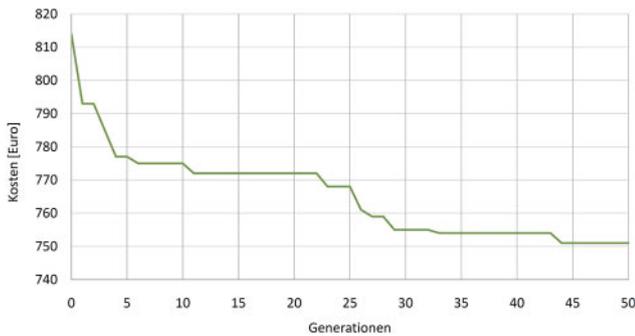


Abb. 13: Evolutionsverlauf bei 50 Individuen und 50 Generationen

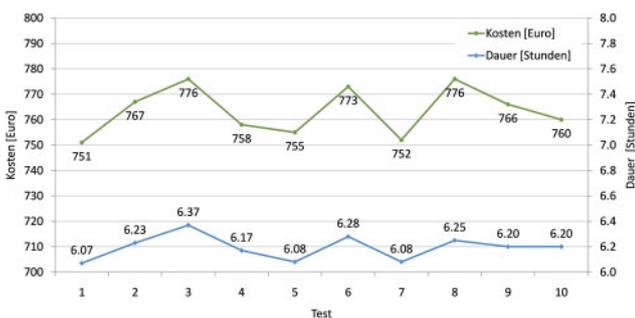


Abb. 14: Lösungen aus zehn Durchläufen

zwischen den Standpunkten (Abbildung 12 (links)) würden 803 Euro betragen, bei einer Dauer von 6,52 Stunden und einer zurückgelegten Entfernung von 149,5 km. Der Kostenersparnis für dieses Beispiel beträgt somit 7 %.

Der Evolutionsverlauf für die bislang beste Lösung wird in Abbildung 13 gezeigt. Es ist zu erkennen, dass die Abnahme der Kosten in den ersten Generationen verhältnismäßig groß ist, während es später nur noch leichte Verbesserungen von Generation zu Generation gibt.

Die Berechnungen wurden mit 50 Individuen und 50 Generationen mehrfach wiederholt, um zu überprüfen, wie

stark die Lösungen voneinander abweichen. Die Ergebnisse der Optimierung mit 16 Punkten aus zehn Testdurchläufen sind in Abbildung 14 dargestellt. Entsprechend der Eigenschaft der genetischen Algorithmen werden bei verschiedenen Durchläufen leicht abweichende Ergebnisse erzielt. Die maximale Abweichung im Bereich der Kosten liegt bei 25 Euro zwischen den Testdurchläufen 1 und 3 bzw. 8. Zwischen Test 1 und 3 ist auch die größte Abweichung im Bereich der Durchführungsdauer mit 18 Minuten festzustellen. Die Standardabweichung der Kosten beträgt bei zehn Testdurchläufen 9,6 Euro und die der Dauer 6 Minuten.

Insgesamt ist festzustellen, dass die Lösungen nur leicht voneinander abweichen. Es kann aber aufgrund des großen Lösungsraums keine Aussage darüber getroffen werden, wie nah die bisher beste Lösung an der optimalen Lösung liegt.

4.2.3 Rechenzeit

Die Rechenzeit der Optimierung ist eng an die Anzahl der Individuen einer Population und an die Anzahl der Generationen gebunden. Außerdem besteht eine Abhängigkeit von der Anzahl der Messpunkte im Netz, da daran direkt die Optimierungsaufgaben zur Aufteilung und zur Aufbaureihenfolge der Zielpunkte gekoppelt sind. Steht mehr als ein Gehilfe für die Netzmessung zur Verfügung, ist die Rechenzeit höher als bei genau einem Gehilfen, da eine Aufteilung der Messpunkte auf die Gehilfen vorgenommen werden muss. Bei einem Gehilfen entfällt diese Aufteilung und die Rechenzeit ist dementsprechend geringer. Dagegen gibt es keinen wesentlichen Laufzeitunterschied, wenn drei statt zwei Gehilfen vorgesehen werden, da weiterhin nur eine Aufteilung vorgenommen werden muss (die die hauptsächlich Rechenzeit in Anspruch nimmt).

In dem Programm zur Optimierung einer Netzmessung wird die Fitnessberechnung der einzelnen Individuen einer Population auf mehrere Simulationsprozesse aufge-

teilt. Bei Rechnern mit Mehr-Kern-Prozessoren können genau so viele Simulationsprozesse parallel ausgeführt werden, wie Kerne zur Verfügung stehen. Dementsprechend richtet sich die Rechenzeit auch nach der Leistungsstärke des Computers, mit dem die Optimierung durchgeführt wird.

Für das Netz mit sechs Punkten beträgt die Rechenzeit mit 20 Individuen und 20 Generationen auf einem Rechner mit 4-Kern-Prozessor 3 Minuten. Für das Netz mit 16 Punkten und derselben Anzahl von Individuen und Generationen beträgt die Rechenzeit etwa 20 Minuten. Dasselbe Netz benötigt bei einer Berechnung mit 50 Individuen und 50 Generationen auf demselben Rechner etwa 3 Stunden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Das vorgestellte Verfahren zur Effizienzoptimierung einer tachymetrischen Netzmessung beantwortet alle eingangsgestellten Fragen hinsichtlich der Laufzeit- und Kosteneffizienz. Es liefert einen ausführlichen Ablaufplan zur Durchführung der Netzmessung für alle beteiligten Personen und gibt eine Empfehlung ab, mit wie vielen Personen die Netzmessung durchgeführt werden sollte, um möglichst *kosten-* oder *laufzeiteffizient* zu arbeiten. Die Reihenfolge der zu messenden Standpunkte und die Aufteilung/Aufbaureihenfolge der Zielpunkte werden mit heuristischen Verfahren, hier den genetischen Algorithmen, optimiert. Die Simulation der Netzmessung zur Berechnung der Gesamtdauer und der insgesamt zurückgelegten Entfernung erfolgt mithilfe von Petri-Netzen. In dem Petri-Netz werden die parallel stattfindenden Prozesse, wie beispielsweise Messung und Aufbau, als nebenläufige Prozesse modelliert, wodurch eine einfache Berechnung der Gesamtdauer möglich ist. Aus der Gesamtdauer und der Gesamtentfernung können mithilfe der Personalkosten und km-Kosten der zurückgelegten Distanz die Gesamtkosten des Prozesses berechnet werden.

Die Optimierung großer Netze ist zum jetzigen Zeitpunkt recht rechenintensiv. Da das Verfahren aber automatisiert abläuft, stellt dies in der Praxis der Netzplanung nicht unbedingt ein Problem dar.

Die Zusammenstellung der Daten für die Durchführung der Modellierung und Optimierung ist bisher über die Auflistung der Punkte, Beobachtungen und Wegekanten in Textdateien möglich und dadurch verhältnismäßig aufwendig. An einer grafischen Umsetzung der Dateneingabe über eine georeferenzierte Karte oder ein Luftbild wird derzeit gearbeitet.

Die nächsten Schritte zur Verbesserung des vorgestellten Optimierungsverfahrens zur Planung von geodätischen Netzmessungen sind die Beschleunigung der Rechenzeit und die Implementierung zusätzlicher Messverfahren, wie GPS, z.B. nach SALEH und CHELOUAH (2004), oder Nivellement. Außerdem soll die Integration der Qualität (Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsparameter) berücksichtigt werden. Zur Realisierung dieses Vorhabens sind Qualitätsparameter in der Simulation der Netzmessung mitzuführen, die am Ende für jeden Netzpunkt Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsgrößen ausgeben.

Da die Messungen von tachymetrischen Netzen häufig nicht an einem Tag durchführbar sind, ist eine Anpassung des Verfahrens auf mehrtägige Vermessungsarbeiten notwendig. Das aktuell implementierte Verfahren berücksichtigt bisher keine Pausen, sondern optimiert die Netzmessung, als würde sie kontinuierlich durchgeführt werden. Bei der Messung sehr großer Netze, ggf. mit Zeitvorgaben, kann es außerdem sinnvoll sein, mehr als einen Messtrupp für die Netzmessung einzusetzen. Die Implementierung dieser Variante gestaltet sich aufwendig, da insbesondere bei den Zielpunkten eine Doppelnutzung aus verschiedenen Messrichtungen ausgeschlossen werden muss, sofern keine Rundum-Prismen genutzt werden können, was bei ingenieurgeodätischen Netzmessungen aufgrund der hohen Genauigkeitsanforderungen der Fall ist. Das bedeutet, es sind Zusatzbedingungen in den Optimierungsalgorithmus einzuführen.

Die gelieferten Ergebnisse des Verfahrens sind vielversprechend und könnten in der Praxis ein gutes Hilfsmittel sein, um Netzmessungen wirtschaftlich zu planen. Ein großer Vorteil ist die Ausgabe der Ablaufpläne, so dass alle beteiligten Personen zu jedem Zeitpunkt informiert sind, welche Schritte als nächstes durchzuführen sind. Außerdem könnte das Programm für Schulungszwecke eingesetzt werden, um Ungeübten zu zeigen, wie sich der Ablauf einer Netzmessung gestaltet oder wie viel Zeit für eine Netzmessung mindestens einzukalkulieren ist.

Für einen effizienten Einsatz des Programms Simple-Net in der Praxis ist, neben der Verbesserung der Rechengeschwindigkeit, auch die Nutzerinteraktion zu verbessern. Die Software soll intuitiv bedienbar sein, so dass nur eine geringe Einarbeitungszeit der Mitarbeiter erforderlich wird. Außerdem soll in der nächsten Projektphase an der Echtzeitfähigkeit der Effizienzoptimierung gearbeitet werden. Bei unvorhergesehenen Störungen im Feld könnte dann eine erneute Berechnung erfolgen und der Ablaufplan aufdatiert werden.

Als weitere Verbesserung des Verfahrens ist eine Erweiterung der Petri-Netze um stochastische Transitionen vorgesehen, sogenannte stochastische Petri-Netze (s. AJMONE MARSAN u.a. 1994). Hierin können die Unsicherheiten der Modellannahmen, insbesondere Unwägbarkeiten in der Dauer einzelner Arbeitsschritte, mit Verteilungsfunktionen versehen werden. Dadurch ist eine bessere Anpassung der Abläufe an die Realität zu erwarten.

Literatur

- [1] AJMONE MARSAN, M.; BALBO, G.; CONTE, G.; DONATELLI, S.; FRANCESCHINI, G.: Modelling with Generalized Stochastic Petri Nets. New York, NY, USA: John Wiley and Sons, 1994 (Wiley series in parallel computing). – ISBN 0-471-93059-8
- [2] 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
- [3] BOERSCH, I.; HEINSON, J.; SOCHER, R.: Wissensverarbeitung: Eine Einführung in die künstliche Intelligenz für Informatiker und Ingenieure. 2. Auflage. München: ELSEVIER Spektrum Akademischer Verlag, 2007. – ISBN 978-3-8274-1844-9

- [4] 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
- [5] DOMSCHKE, W.; DREXL, A.: Einführung in Operations Research. 6., überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2005 (Springer-Lehrbuch). – ISBN 978-3-540-26942-7
- [6] HOFMANN, F.: Flussoptimierung in angepassten Petrinetzen durch genetische Algorithmen. In: Forum Bauinformatik (2008)
- [7] OBERWEIS, A.: Modellierung und Ausführung von Workflows mit Petri-Netzen: Univ., Habil.-Schr.-Karlsruhe, 1995. Stuttgart, Leipzig: Teubner Verlag, 1996 (Teubner-Reihe Wirtschaftsinformatik). – ISBN 978-3-8154-2600-5
- [8] POHLHEIM, H.: Entwicklung und systemtechnische Anwendung Evolutionärer Algorithmen, Technische Universität Ilmenau, Dissertation, 1998
- [9] REHR, I.; KUTTERER, H.: Effizienzoptimierung ingenieurgeodätischer Prozesse im Bauwesen. In: DVW e.V. (Hrsg.): Schriftenreihe des DVW – Interdisziplinäre Messaufgaben im Bauwesen, Bd. 62, Wißner Verlag, 2010, S. 307-321
- [10] REISIG, W.: Petrinetze: Eine Einführung. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 1982. – ISBN 3-540-11478-5
- [11] RINKE, N.; Hofmann, F.: Hybride Prozessoptimierung unter Berücksichtigung geometrischer Nebenbedingungen: am Beispiel der geodätischen Messung. In: Forum Bauinformatik (2009), S. 287-297
- [12] SALEH, H.; 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
- [13] SCHMITT, G.: Zur Numerik der Gewichtsoptimierung in geodätischen Netzen. München, DGK, Reihe C, Nr. 256, Dissertation, 1979
- [14] STAUDINGER, M.: A Cost Orientated Approach to Geodetic Network Optimisation. Vienna, University of Technology, Dissertation, 1999
- [15] WEICKER, K.: Evolutionäre Algorithmen. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2007. – ISBN 978-3-8351-0219-4

Danksagung

Die vorgestellten Forschungsergebnisse wurden im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Projektes *EQuIP – Effizienzoptimierung und Qualitätssicherung ingenieurgeodätischer Prozesse im Bauwesen* (unter den Kennzeichen BE2159/11-1 und KU1250/10-1) erzielt. Die Autoren danken der DFG für die finanzielle Unterstützung.

Außerdem danken die Autoren dem anonymen Gutachter für die konstruktiven Hinweise und Anregungen.

Anschrift der Verfasser

Dipl.-Ing. ILKA REHR, Prof. Dr.-Ing. habil. HANSJÖRG KUTTERER, Geodätisches Institut Hannover (GIH), Leibniz Universität Hannover, Nienburger Straße 1, 30167 Hannover,

E-Mail: rehr@gih.uni-hannover.de

Dipl.-Ing. NILS RINKE, PD Dr.-Ing. habil. VOLKER BERKHAHN, Institut für Bauinformatik (IfB), Leibniz Universität Hannover, Callinstraße 34, 30167 Hannover