

Dynamic Vehicle Routing Systems (DVRP): Eine Übersicht

Basierend auf der Doktorarbeit „The Dynamic
Vehicle Routing Problem“ von Allen Larsen

Mathias Mierswa

13.12.2009

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
1 Einführung.....	1
2 Das dynamische VRP	1
2.1 Relevanz.....	2
2.2 Technische Anforderungen.....	3
2.3 Beispiele aus der Realität	4
3 Bereits untersuchte Methoden und Probleme.....	4
3.1 A-priori optimierungsbasierte Methoden	4
3.2 Echtzeit Optimierungsmethoden	5
3.3 Chronologischer Überblick.....	5
4 Grad der Dynamik	7
4.1 Dynamik ohne und mit Zeitfenster	7
4.2 Framework für dynamische Systeme und Klassifikation.....	9
5 Partiiell dynamisches Vehicle Routing.....	10
5.1 Partiiell dynamisches Traveling Repairman Problem (PDTRP).....	10
5.2 Routing Policies.....	10
5.3 Erkenntnisse aus der Simulation.....	11
5.4 Zusammenfassung	12
6 Kapazitatives Vehicle Routing Problem mit Zeitfenstern.....	12
6.1 Batching-Strategien	13
6.2 Erkenntnisse aus der Simulation.....	14
6.3 Zusammenfassung	14
7 A-priori dynamisches TSP mit Zeitfenstern.....	14
7.1 Beschreibung dynamisches TSP mit Zeitfenstern	15
7.2 A-priori DTSPW und Routing Policies.....	16
7.3 Erkenntnisse aus der Simulation.....	16
7.4 Zusammenfassung	17
8 Fallstudie aus der Realität.....	17
9 Zusammenfassung.....	18
10 Fazit.....	19
Literaturverzeichnis	IV

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Beispiel dynamisches VRP	2
Abbildung 2: Beispiel eines Informationsflusses in GPS-basierten Routing Systemen	3
Abbildung 3: chronologischer Überblick	6
Abbildung 4: Ankunftszeiten dynamischer Requests	8
Abbildung 5: effektiver Grad der Dynamik	8
Abbildung 6: Klassifikation dynamischer Systeme	9
Abbildung 7: Beispiel Größe- und Zeit-getriebenes Batching	13
Abbildung 8: Beispiel DTSPTW	15

1 Einführung

Die Erstellung von Touren bedeutet für die Planer immer größere und komplexere Problemstellungen, da zusätzliche Beschränkungen, wie beispielsweise zeitliche Restriktionen, in die Planung mit einbezogen werden müssen. Gefördert wird diese Entwicklung durch den Stand der Kommunikations- und Informationstechnik, wodurch der Fokus auf Geschwindigkeit und Pünktlichkeit liegt. Zudem werden dynamische Transportmodelle wichtig, in denen die Daten als zeitabhängig betrachtet werden können.¹

Zusätzlich steht eine Menge an Echtzeitinformationen (aktuelle Reisezeiten, Staus, Kapazitätsauslastung) zur Verfügung, mit denen parallel zum Herausfinden einer geeigneten Route umgegangen werden muss. Auf Änderungen dieser Informationen muss schnell reagiert werden.²

Das dynamische VRP ist ein Musterbeispiel, in dem das intelligente Benutzen der Echtzeitinformationen eine Firma von einer anderen unterscheiden kann. Das Ziel ist die Erstellung von Routen, mit denen ein Problem innerhalb gegebener Randbedingungen (bspw. gegebene Zeitfenster, begrenzte Systemressourcen) optimal gelöst werden kann.³

2 Das dynamische VRP

Das dynamische VRP zeichnet im Gegensatz zu seinem Gegenstück dem statischen VRP aus, dass nicht alle planungsrelevanten Informationen zum Planungszeitpunkt bekannt sind und dass sich diese Informationen nach der Routenerstellung ändern können. Informationen sind in diesem Zusammenhang beispielsweise die geografische Lage der Kunden, die Fahrzeugkapazitäten und die Reisezeiten. Die zeitliche Dimension ist im Zusammenhang mit derartigen Problemen immer wichtig.

In Abbildung 1 ist ein einfaches Beispiel für ein dynamisches VRP aufgezeigt. Zu sehen sind zwei Routen, die beide im Depot beginnen und enden. Der schwarze Pfeil steht für die aktuelle Position. Die schwarzen Knoten sind Kunden, von denen vor der Routenplanung bekannt war, dass sie eine Serviceleistung in Anspruch nehmen wollen. Die weißen Knoten repräsentieren dynamische Kunden, von denen Serviceaufträge nach der Routenplanung zu einem beliebigen Zeitpunkt in das Routing System gelangen. Diese dynamischen Kunden müssen in geeigneter Form Berücksichtigung finden. In der rechten Route, die den Idealfall

¹ Vgl. Larsen, Allen: The Dynamic Vehicle Routing Problem, 2000, S. 5.

² Vgl. Larsen, Allen / Madsen, Oli B.G. / Solomon, Marius M.: The Vehicle Routing Problem: Latest Advances And New Challenges, 2008, S. 199.

³ Vgl. Larsen, Allen / Madsen, Oli B.G. / Solomon, Marius M.: The Vehicle Routing Problem: Latest Advances And New Challenges, 2008, S. 199.

darstellt, besteht nach dem Eintreffen des dynamischen Requests genug Zeit, um auf diesen reagieren und an geeigneter Position in der geplanten Route einfügen zu können. Die Reihenfolge der bereits geplanten Kunden sowie die Verzögerung werden nur geringfügig verändert.

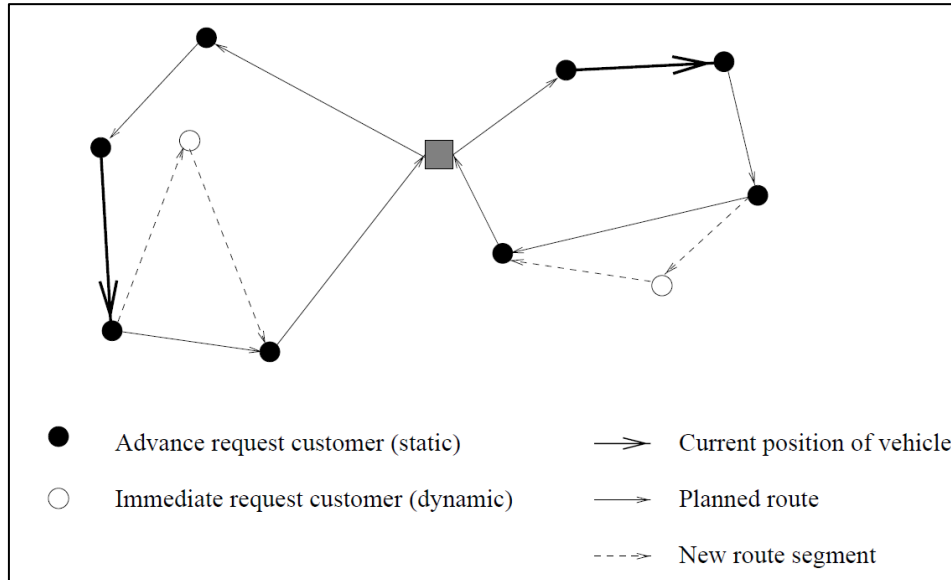


Abbildung 1: Beispiel dynamisches VRP⁴

Die Realität sieht aber eher wie in der linken Route aus. Dynamische Aufträge kommen zu späten Zeitpunkten in das System, so dass nur wenig Zeit bleibt, diese Aufträge in die Route einzufügen. Der neue Einsatzort liegt ungünstig, was zu starken Verzögerungen führt. Das Einfügen dieser Requests ist weitaus komplizierter als im Idealfall. Eine Neuplanung der Route wird häufig in Betracht gezogen, damit die neue Lösung wieder mit den aktuellen Informationen korrespondiert.

2.1 Relevanz

Sich mit dynamischen Vehicle Routing Problemen zu beschäftigen, liegt darin begründet, dass der Fokus auf Just-in-Time liegt. Zudem ermöglicht die vorhandene Technik die Nutzung von vielen in Echtzeit zur Verfügung stehenden Informationen, um kosteneffizient Routen zu können. Die Kosten, die entstehen, werden auf circa 10% bis 15% des Bruttoinlandsproduktes eines Landes dotiert. Somit wäre auch eine relativ kleine Verbesserung sehr wichtig.⁵

⁴ Larsen, Allen: The Dynamic Vehicle Routing Problem, 2000, S. 6.

⁵ Vgl. Larsen, Allen: The Dynamic Vehicle Routing Problem, 2000, S. 11f.

Außerdem lässt sich eine Vielzahl von praktischen Anwendungen modellieren.⁶ Einige sind im Abschnitt „2.3 Beispiele aus der Realität“ erläutert.

2.2 Technische Anforderungen⁷

Um das Routing System mit aktuellen Informationen versorgen zu können, müssen einige technische Anforderungen erfüllt sein. Es wurde zwischen Equipment zur Positionsbestimmung und zur Kommunikation unterschieden.

Die Position des Fahrzeuges sollte, wie in Abbildung 2 zu sehen ist, mittels GPS bestimmt werden. In der Realität sollte die Positionsübermittlung zu fixen Zeitpunkten erfolgen. Zwischen diesen Zeitpunkten wird die Position mittels eines Interpolationsschemas bestimmt. Dieses Vorgehen spart Systemressourcen.

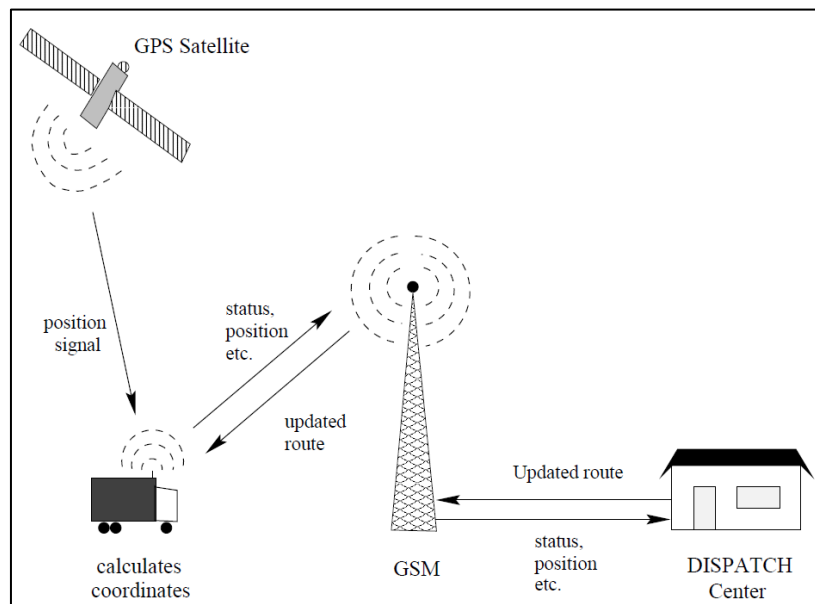


Abbildung 2: Beispiel eines Informationsflusses in GPS-basierten Routing Systemen⁸

Für die Kommunikation wurde ein Vergleich zwischen Mobilfunk- und speziellen Rundfunknetzen durchgeführt. Bevorzugt wurde, wie auch in Abbildung 2 zu sehen, die Mobilfunkvariante. Die Anschaffungskosten sind praktisch nicht gegeben, da das Netz bereits existiert und die Preise für die Nutzung derartiger Netze Jahr für Jahr gefallen sind. Außerdem lässt es sich flexibel einsetzen.

⁶ Vgl. Larsen, Allen / Madsen, Oli B.G. / Solomon, Marius M.: The Vehicle Routing Problem: Latest Advances And New Challenges, 2008, S. 200.

⁷ Vgl. Larsen, Allen: The Dynamic Vehicle Routing Problem, 2000, S. 12ff.

⁸ Larsen, Allen: The Dynamic Vehicle Routing Problem, 2000, S. 14.

2.3 Beispiele aus der Realität⁹

In diesem Abschnitt sollen einige Beispiele aus der Realität kurz beschrieben werden. Den Anfang macht das Traveling Repairman Problem, in dem ein Techniker von Kunde zu Kunde reist, um etwas zu reparieren. Dabei kann die zu fahrende Strecke oder die Wichtigkeit des Auftrages und somit die Wartezeit des Kunden bei der Routenplanung in Betracht gezogen werden.

Ein anderes Problem stellt der Kurierdienst dar, dessen Aufgabe in Delivery (Pakete austragen) und Pick-up (Pakete einsammeln) geteilt werden kann. Der Delivery-Teil bezeichnet ein statisches Routing Problem, da alle Kunden bekannt sind. Der Pick-up-Teil ist dynamisch in dem Sinne, dass nicht alle Informationen über Zeitpunkt und Ort des Einsammelns bekannt sind.

Ein weiteres Problem ist in der Verteilung von Heizöl an Privathaushalte zu finden. Ein Großteil der Kunden ist den Unternehmen durch interne Kundeninformationen bekannt. Die Bedarfe können aber durch verschiedene Einflüsse von den Informationen abweichen. Zudem zeigten Erfahrungen, dass ungefähr 20% der Kunden dynamisch sind.

Notfalldienste beschreiben ein sehr dynamisches VRP, da Aufträge in Echtzeit eingehen und nur wenig Zeit zum reagieren bleibt. Die Routen für derartige Requests sind bereits vorberechnet, so dass das Problem darin besteht, diesem Request das beste Fahrzeug zuzuweisen.

3 Bereits untersuchte Methoden und Probleme

In diesem Abschnitt sollen die Ideen von einigen Methodenklassen beschrieben sowie einige Probleme erwähnt werden, die durch diese Methodenklassen gelöst werden. Diese Ideen wurden, wie auch der später folgenden chronologischen Übersicht zu entnehmen ist, bereits vor der Arbeit von Allen Larsen entwickelt.

3.1 A-priori optimierungsbasierte Methoden¹⁰

Die Idee bei derartigen Methoden im Kontext des Vehicle Routings ist, dass der Planer Informationen über zukünftige unsichere Ereignisse, wie beispielsweise zukünftige Servicerequests, Kundenbedarfe oder Reisezeiten, nutzt, um eine oder mehrere Routen zu bestimmen. In diesen Routen berücksichtigt man dynamische Requests, die im Falle von reoptimierungsbasierten Methoden zu einer Neuberechnung der Lösung geführt hätten. Diese Neuberechnungen sind zudem sehr zeitaufwändig. Zusätzlich zu der Berücksichtigung

⁹ Vgl. Larsen, Allen: The Dynamic Vehicle Routing Problem, 2000, S. 15ff.

¹⁰ Vgl. Larsen, Allen: The Dynamic Vehicle Routing Problem, 2000, S. 21.

dynamischer Requests sind die Routen stabiler bezüglich ihrer Veränderung, was dem Fahrer und dem eventuellen Aufbau von Kundenbeziehungen dient.

A-priori optimierungsbasierte Methoden lösen Probleme wie beispielsweise das probabilistische Traveling Salesman Problem (PTSP), das probabilistische Vehicle Routing Problem (PVRP) und das stochastische Vehicle Routing Problem (SVRP).

3.2 Echtzeit Optimierungsmethoden

Die im Abschnitt 3.1 A-priori optimierungsbasierte Methoden vorgestellten Methoden nutzen wahrscheinliche Informationen zur Routenplanung, bevor ein Fahrzeug das Depot verlässt. Echtzeit Optimierungsmethoden konstruieren Routen in Echtzeit während eines Geschäftstages und somit auch während sich die Fahrzeuge auf ihren Routen befinden.¹¹ Dazu werden je nach Zielsetzung¹² verschiedene Policies oder Heuristiken eingesetzt.

Mittels derartigen Methoden sind Probleme wie beispielsweise das dynamische Traveling Salesman Problem (DTSP) oder das dynamische Traveling Repairman Problem (DTRP) lösbar.

3.3 Chronologischer Überblick

In Abbildung 3 sind einige der wichtigsten Probleme im Bereich DVRP bis zum Jahr 1999 chronologisch dargestellt. Eine virtuelle Linie durch die Mitte der Abbildung teilt die bis zu diesem Zeitpunkt untersuchten Probleme in zwei Bereiche auf.

¹¹ Vgl. Larsen, Allen: The Dynamic Vehicle Routing Problem, 2000, S. 28.

¹² Optimierung der Distanz, der Verspätung oder Teile von beiden.

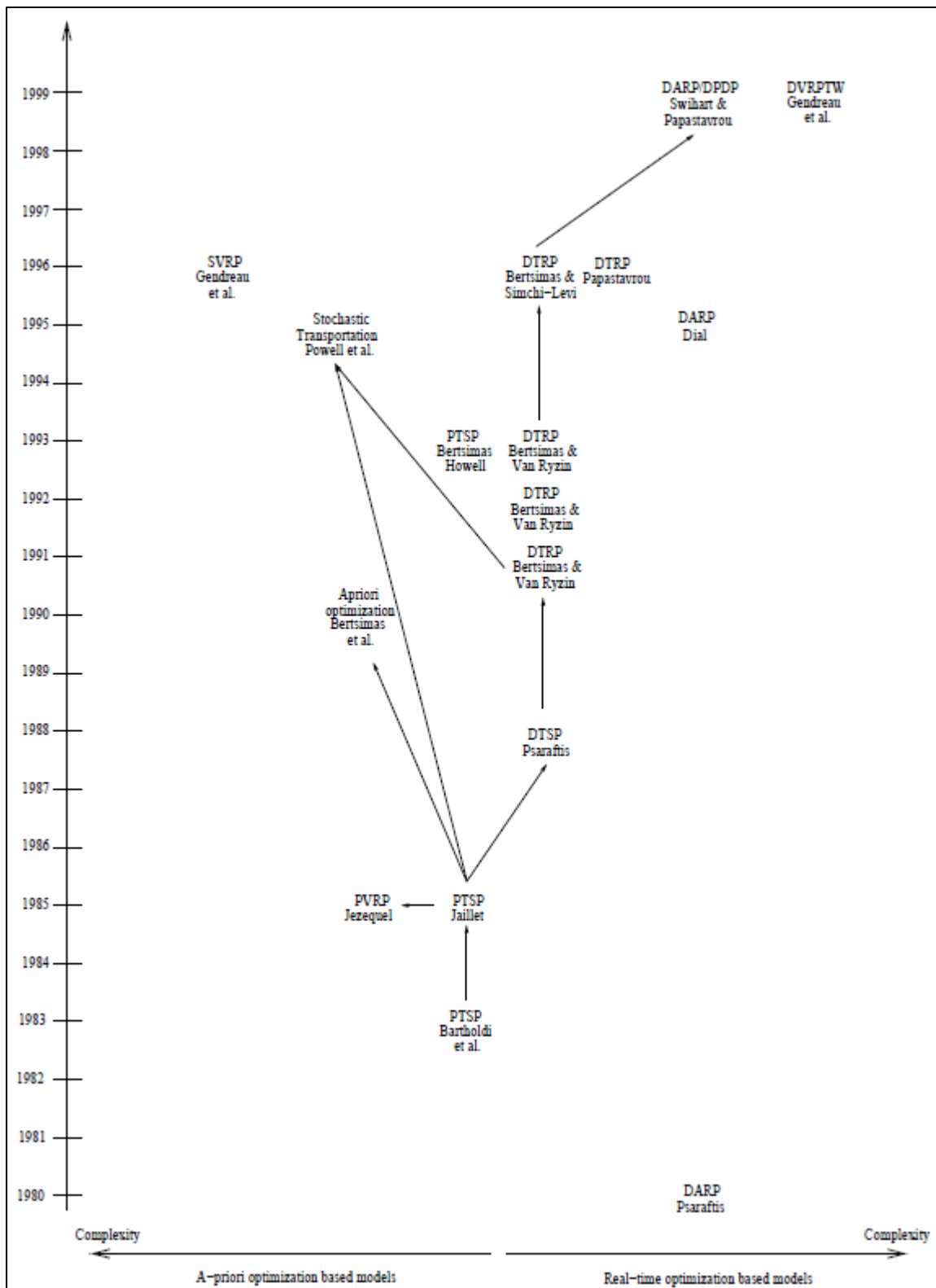


Abbildung 3: chronologischer Überblick¹³

Je weiter man sich von der gedachten Mittellinie nach links bewegt, desto komplexer werden die Probleme bezüglich a-priori Optimierung. Im Gegensatz dazu werden die Probleme

¹³ Larsen, Allen: The Dynamic Vehicle Routing Problem, 2000, S. 41.

immer komplexer bezüglich Echtzeit Optimierung, je weiter man von der virtuellen Mittellinie nach rechts wandert. Probleme auf oder in der Nähe von dieser Trennlinie, wie beispielsweise das PTSP oder das DTRP, werden als Basisprobleme bezeichnet.¹⁴

4 Grad der Dynamik

Die Leistung von dynamischen Vehicle Routing Systemen ist nicht nur von der Anzahl der Kunden und deren räumlicher Verteilung, sondern auch von der Anzahl dynamischer Events und deren Zeit des Eintreffens abhängig. Deshalb soll ein neues Maß eingeführt werden, das die Dynamik eines Systems beschreibt und mit dessen Hilfe man verschiedene Algorithmen unter sich ändernden Bedingungen testen kann.¹⁵

Es werden die Bereiche Dynamik mit und Dynamik ohne Zeitfenster unterschieden, die nachfolgend kurz beschrieben werden sollen. Anschließend erfolgt die Vorstellung eines Frameworks für praktische Anwendungen, das, basierend auf dem Grad der Dynamik und der Zielfunktion der Anwendung, eine Klassifikation dieser Anwendungen ermöglicht.

4.1 Dynamik ohne und mit Zeitfenster¹⁶

Der Grad der Dynamik kann im einfachen Fall ohne und im komplizierteren mit Zeitfenster bestimmt werden. Hierbei wird im Fall ohne Zeitfenster die Anzahl dynamischer Requests ins Verhältnis zur Gesamtanzahl an Requests gesetzt. Im Fall mit Zeitfenster gilt als zusätzliche Restriktion, dass Kunden innerhalb eines Zeitfensters bedient werden müssen. Jedoch werden die Ankunftszeiten der dynamischen Requests nicht in Betracht gezogen. Abbildung 4 zeigt zwei Szenarios A und B, wobei alle dynamischen Requests in Szenario A relativ früh und in Szenario B über den gesamten Zeitraum T verteilt empfangen werden. Diese in der Realität sehr unterschiedlichen Szenarios werden als gleich betrachtet.

¹⁴ Vgl. Larsen, Allen: The Dynamic Vehicle Routing Problem, 2000, S. 40.

¹⁵ Vgl. Larsen, Allen: The Dynamic Vehicle Routing Problem, 2000, S. 55.

¹⁶ Vgl. Larsen, Allen: The Dynamic Vehicle Routing Problem, 2000, S. 56ff.

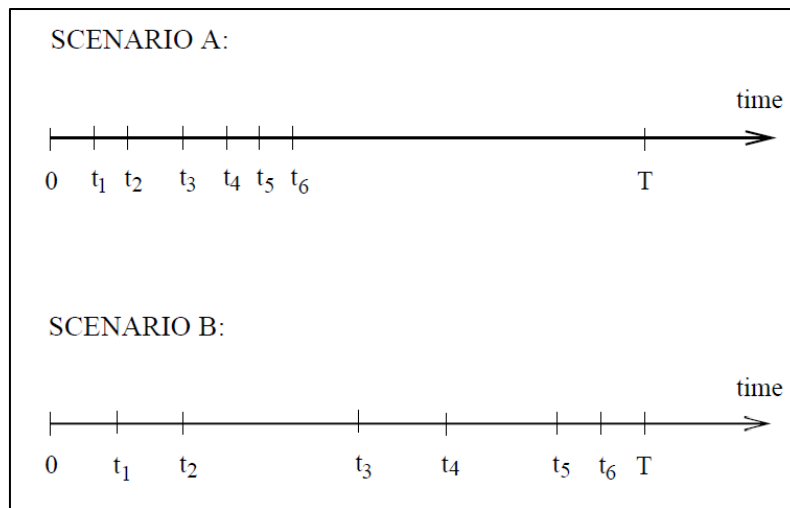


Abbildung 4: Ankunftszeiten dynamischer Requests¹⁷

Allen Larsen hat für beide Fälle, also Dynamik ohne und mit Zeitfenster, den Grad der Dynamik zum effektiven Grad der Dynamik erweitert, indem die Ankunftszeiten der dynamischen Requests bei der Berechnung mit berücksichtigt wurden. Abbildung 5 zeigt, dass anstatt der Anzahl der dynamischen Requests das Verhältnis aus Ankunftszeit t_i und spät möglicher Empfangszeit T über alle dynamischen Requests aufsummiert und diese Summe ins Verhältnis zur Gesamtanzahl an Requests gesetzt wird. Ist der effektive Grad der Dynamik gleich 0, so handelt es sich um ein rein dynamisches System. Ist er hingegen gleich 1, so ist das System rein statisch.

$$edod = \frac{\sum_{i=1}^{n_{imm}} \left(\frac{t_i}{T} \right)}{n_{tot}}$$

Abbildung 5: effektiver Grad der Dynamik¹⁸

Somit sind die in Abbildung 4 dargestellten Szenarios unterscheidbar. Szenario A hätte einen kleineren Wert für den erweiterten Grad der Dynamik als Szenario B, da die dynamischen Requests früher empfangen werden.

¹⁷ Larsen, Allen: The Dynamic Vehicle Routing Problem, 2000, S. 57.

¹⁸ Larsen, Allen: The Dynamic Vehicle Routing Problem, 2000, S. 58.

4.2 Framework für dynamische Systeme und Klassifikation

Wie der Abbildung 6 zu entnehmen ist, wurden, basierend auf dem Grad der Dynamik, drei Bereiche unterschieden: schwach, moderat und stark dynamische Systeme. In stark dynamischen Systemen, die sich in der oberen rechten Ecke befinden und die eine große Anzahl dynamischer Requests auszeichnet, liegt der Fokus auf der Minimierung der Reaktionszeiten auf Servicerequests. Je mehr man sich in Richtung schwach dynamischer Systeme bewegt, die in der linken unteren Ecke von Abbildung 6 angesiedelt sind, desto weniger muss das Routing System mit dynamischen Requests umgehen. Dadurch ist der überwiegende Teil der Kunden bekannt, was den Fokus der Hauptzielsetzung auf die Minimierung der Routing Kosten lenkt.¹⁹

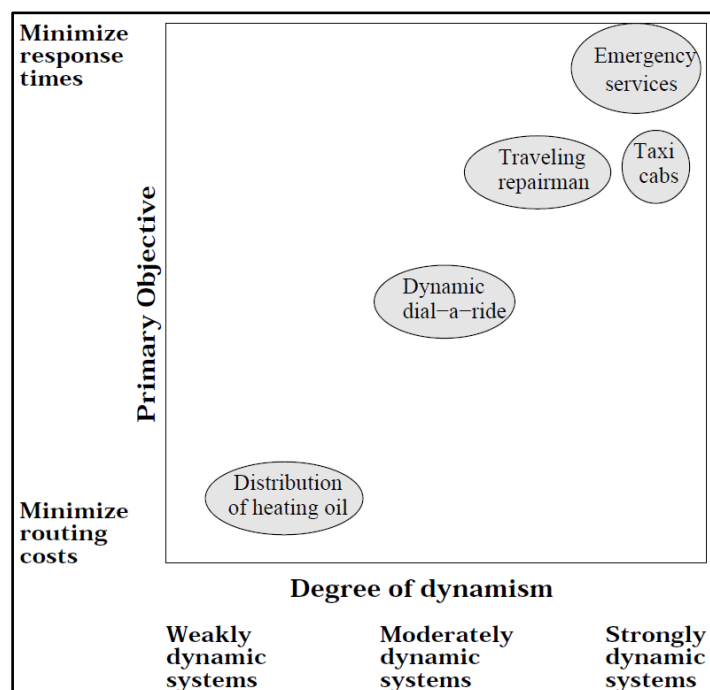


Abbildung 6: Klassifikation dynamischer Systeme²⁰

Schwach dynamische Systeme zeichnen sich dadurch aus, dass dynamische Requests je nach verfügbaren Ressourcen bearbeitet werden und dass die Reaktionszeiten im Vergleich zu dynamischeren Systemen länger sind. Bei jedem der seltenen Informationsupdates (bspw. neuer dynamischer Request) wird ein statisches Routingproblem durch angepasste Prozeduren vom rein statischen VRP gelöst.²¹

Moderat dynamische Systeme weisen im Vergleich zu schwach dynamischen Systemen bereits eine Vielzahl dynamischer Requests und zusätzliche stochastische Elemente (bspw.

¹⁹ Vgl. Larsen, Allen: The Dynamic Vehicle Routing Problem, 2000, S. 63f.

²⁰ Larsen, Allen: The Dynamic Vehicle Routing Problem, 2000, S. 63.

²¹ Vgl. Larsen, Allen: The Dynamic Vehicle Routing System, 2000, S. 61.

unbekannte Kundenbedarfe) auf. Oftmals wird versucht, eine Entscheidung auf einen möglichst späten Zeitpunkt zu verschieben, um dadurch im Zuge sinkender Unsicherheit über wahrscheinliche zukünftige Events eine höhere Entscheidungsqualität zu erlangen.²²

In stark dynamischen Systemen verändern sich Daten sehr schnell und alle Servicerequests sind wichtig. Informationen über wahrscheinliche zukünftige Events haben zwar eine schlechte Qualität, sollten aber bei Vorhandensein in die Entscheidungsfindung mit einbezogen werden.²³

5 Partiiell dynamisches Vehicle Routing

Dieses Problem wurde eingeführt, um den Grad der Dynamik weiter zu entdecken. Es liegt bezogen auf den Grad der Dynamik zwischen dem statischen und dem dynamischen Vehicle Routing, das heißt, dass mit bereits bekannten und dynamischen Kunden umgegangen werden muss. Der Fokus lag in der Anwendung von angepassten Routing Policies aus dem rein dynamischen TRP auf den partiell dynamischen Fall. Dafür wurden das partiell dynamische TRP eingeführt und verschiedene Szenarios mit unterschiedlicher Dynamik simuliert, die diese Policies einsetzen.

5.1 Partiiell dynamisches Traveling Repairman Problem (PDTRP)

Als Erweiterung des rein dynamischen TRP um bekannte Kunden, unterscheidet sich das PDTRP in zwei Hauptpunkten vom DTRP. Der eine Punkt besagt, dass durch das Vorhandensein bereits bekannter Kunden eine Teilmenge von Einsatzorten des Technikers bekannt ist. Der andere Punkt beinhaltet, dass versucht wird, verschiedene Ziele zu optimieren. Das Hauptziel besteht darin, eine kürzeste Route für den Techniker zu finden. Jedoch sollten die dynamischen Kunden in einer priorisierten Reihenfolge abgearbeitet werden, so dass lange wartende Kunden möglichst vor denen bedient werden, die erst eine kurze Zeit gewartet haben.²⁴

5.2 Routing Policies

Für die spätere Simulation wurden vier Policies aus dem DTRP ausgewählt, die rein Wartezeit-optimierend, rein Distanz-optimierend und ein Mix aus beiden sind.²⁵

Als Distanz-optimierende Policy wird Nearest Neighbor (NN) eingesetzt, in der der Techniker nach Beendigung des Services zu dem zu ihm nächst befindlichen Kunden mit entsprechendem Auftrag reist.

²² Vgl. Larsen, Allen: The Dynamic Vehicle Routing System, 2000, S. 61f.

²³ Vgl. Larsen, Allen: The Dynamic Vehicle Routing System, 2000, S. 62.

²⁴ Vgl. Larsen, Allen: The Dynamic Vehicle Routing System, 2000, S. 66.

²⁵ Vgl. Larsen, Allen: The Dynamic Vehicle Routing System, 2000, S. 67.

Die Wartezeit-optimierende First Come First Serve (FCFS) plant die bereits bekannten Kunden in der Reihenfolge, in der sie in das Routing System kamen. Dynamische Kundenaufträge werden in der Abfolge, in der sie empfangen wurden, zu den noch zu bearbeitenden Aufträgen hinzugefügt. Sollten mehrere Aufträge zur selben Zeit in das System gekommen sein, werden die entsprechenden Einsatzorte für diese Kunden in Betracht gezogen und zwischen ihnen eine Route mittels Nearest Neighbor konstruiert.²⁶

Eine Abwandlung von FCFS ist die ebenfalls Wartezeit-optimierende FCFS Stochastic Queue Median (FCFS-SQM) Policy, in der der Techniker vom Median der Serviceregion aus zum nächsten Kunden reist. Ist der Service beendet, erfolgt die Rückkehr zum Median, um von dort aus den nächsten Auftrag zu bearbeiten.²⁷

Die Partitioning Policy (PART), als Mix aus Wartezeit- und Distanz-optimierender Policy, arbeitet in m^2 aufgeteilte Subregionen der Serviceregion, wobei m für die Anzahl der Fahrzeuge steht. Jede einzelne Subregion wird mittels NN abgearbeitet.²⁸ Die geeignete Anzahl an Subregionen ist durch Optimierung zu finden.²⁹

Das Verhalten der Policies soll in Varianten dieses Problems mit jeweils unterschiedlicher Anzahl dynamischer Kunden betrachtet werden.³⁰

5.3 Erkenntnisse aus der Simulation

Durch Simulation sollten die Auswirkungen des Grads der Dynamik bezüglich zurückgelegter Distanz und die relative Leistungsfähigkeit der vorgestellten Policies untersucht werden.³¹ Die wichtigsten Ergebnisse sind nachfolgend erläutert. Es war beobachtbar, dass kurze Routen eine lange Wartezeit für die Kunden bedeuteten, da nur die Distanz optimiert wurde. Des Weiteren zeigten die Ergebnisse, dass die Wartezeit-optimierenden Policies FCFS und FCFS-SQM vom Grad der Dynamik abhängen. Dieses Verhalten ist dadurch begründet, dass je weniger dynamisch ein System ist, desto mehr Kunden sind bekannt, die vor den dynamischen Kunden bedient werden müssen, was zu einer hohen Wartezeit für die dynamischen Kunden führt.³² Im Gegensatz dazu war die durchschnittlich zurückgelegte Strecke dieser Policies fast Dynamik unabhängig.³³

²⁶ Vgl. Larsen, Allen: The Dynamic Vehicle Routing System, 2000, S. 67.

²⁷ Vgl. Larsen, Allen: The Dynamic Vehicle Routing System, 2000, S. 32.

²⁸ Vgl. Larsen, Allen: The Dynamic Vehicle Routing System, 2000, S. 63.

²⁹ Vgl. Larsen, Allen: The Dynamic Vehicle Routing System, 2000, S. 68.

³⁰ Vgl. Larsen, Allen: The Dynamic Vehicle Routing System, 2000, S. 68.

³¹ Vgl. Larsen, Allen: The Dynamic Vehicle Routing System, 2000, S. 68.

³² Vgl. Larsen, Allen: The Dynamic Vehicle Routing System, 2000, S. 73f.

³³ Vgl. Larsen, Allen: The Dynamic Vehicle Routing System, 2000, S. 76.

Durch die Nearest Neighbor Policy, die Distanz-optimierend ist, konnte die kürzeste Route konstruiert werden.³⁴

Die PART Policy hatte als Ergebnis Routen, die bezüglich der Länge zwischen denen der Wartezeit- und Distanz-optimierenden Policies angesiedelt waren.³⁵ Zudem war beobachtbar, dass eine kleinere Anzahl Subregionen zu kürzeren Routen führt.³⁶

Für alle Policies wurde eine gestiegene Distanz für gestiegene Werte der Dynamik festgestellt. Zudem brachte die Verwendung des effektiven Grads der Dynamik nichts Neues, was noch nicht bereits durch den Einsatz der einfachen Form ermittelt wurde.³⁷

5.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde das partiell dynamische Traveling Repairman Problem eingeführt, das sowohl mit bekannten als auch mit dynamischen Kunden umgehen können muss. Zudem fanden einige Policies Betrachtung, die der Minimierung der Routing Kosten dienen sollen. Diese Policies wurden in einer Simulation getestet. Das wichtigste Ergebnis dieser Studie war die Herausstellung eines linearen Zusammenhangs zwischen dem Grad der Dynamik und den Routing Kosten. Die Nearest Neighbor Policy wurde als Empfehlung für die Verwendung angegeben, da sie die kürzesten Routen konstruiert. Bezüglich des effektiven Grads der Dynamik wurden keine Vorteile gefunden, diesen einzusetzen.³⁸

6 Kapazitives Vehicle Routing Problem mit Zeitfenstern

In diesem Abschnitt soll untersucht werden, ob die Verwendung sogenannter Batching-Strategien eine Alternative zur Reoptimierung zu jeder Zeit, zu der neue Informationen in das System gelangen, darstellt. Als Problem ist die bereits im Abschnitt „2.3 Beispiele aus der Realität“ beschriebene Verteilung von Heizöl denkbar, da dieses Problem nur schwach dynamisch ist und die Reoptimierung hier auf Grund der wenigen dynamischen Requests Sinn macht. Dieses Problem ist kapazitativ, da die Fahrzeugkapazität Berücksichtigung findet, was zur Folge hat, dass Fahrzeugkapazitäten ausschöpfbar sind und diese bei Rückkehr im Depot aufgefüllt werden. Zudem müssen Kunden innerhalb eines gewissen Zeitfensters bedient werden. In einer Simulation mit verschiedenen Szenarios mit unterschiedlicher Dynamik wurden die Auswirkungen auf die Wartezeit der Kunden und die zurückgelegte Strecke betrachtet.

³⁴ Vgl. Larsen, Allen: The Dynamic Vehicle Routing System, 2000, S. 71.

³⁵ Vgl. Larsen, Allen: The Dynamic Vehicle Routing System, 2000, S. 77.

³⁶ Vgl. Larsen, Allen: The Dynamic Vehicle Routing System, 2000, S. 72.

³⁷ Vgl. Larsen, Allen: The Dynamic Vehicle Routing System, 2000, S. 75.

³⁸ Vgl. Larsen, Allen: The Dynamic Vehicle Routing System, 2000, S. 79.

6.1 Batching-Strategien

Durch Batching-Strategien werden dynamische Kundenaufträge gesammelt. Die Idee ist, die Planung von Routen solange zu verzögern, bis eine bestimmte Anzahl an Aufträgen eingegangen (Größe-getrieben) oder eine gewisse Zeit seit der letzten Planung vergangen ist (Zeit-getrieben). Durch das Aufschieben der Planung sollen zu diesen Zeitpunkten mehr detaillierte und aktuelle Informationen vorhanden sein, wodurch sich eine Verbesserung der Lösungsqualität erhofft wird. Das größte Hindernis in der Realität ist, dass dynamische Kunden innerhalb eines gewissen Zeitfensters bedient werden müssen.³⁹

Bei Verwendung von derartigen Strategien schlägt Larsen einen Mix aus Echtzeit-Einfügen und Batching-Strategie vor. Zunächst soll bei Eintreffen eines dynamischen Requests versucht werden, eine Stelle zu finden, an der der Auftrag so eingefügt werden kann, dass keine Neuplanung der bereits geplanten Aufträge zu erfolgen hat. Ist dies nicht möglich, wird der Request gesammelt und gemäß Batching-Strategie dann eine Reoptimierung durchgeführt, wenn eine gewisse Zeit gewartet oder eine bestimmte Anzahl an dynamischen Requests gesammelt wurde.⁴⁰ Beim Einfügen handelt es sich um eine Heuristik, in der gewichtete Summen aus Umweg und Verzögerung minimiert werden, um den besten Platz zum Einfügen für jeden Kunden zu finden. Diese Heuristik wurde bereits 1987 von Marius Solomon veröffentlicht.⁴¹

In Abbildung 7 ist zur Veranschaulichung ein einfaches Beispiel für Größe- und Zeit-getriebenes Batching dargestellt.

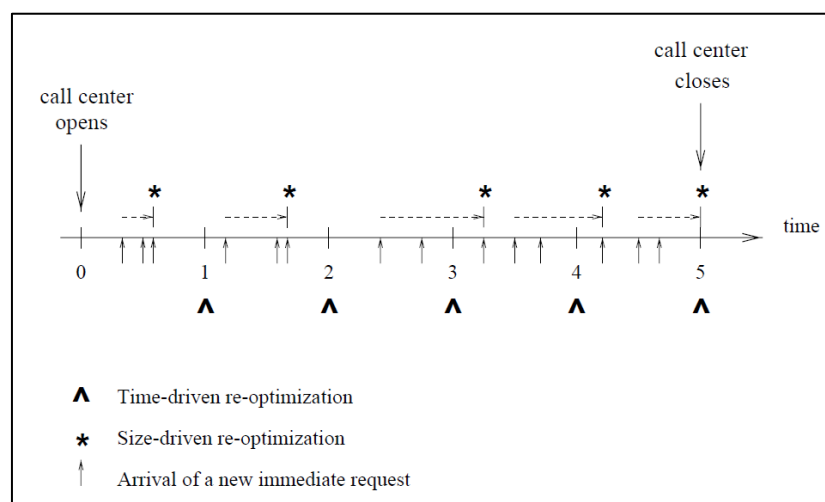


Abbildung 7: Beispiel Größe- und Zeit-getriebenes Batching⁴²

³⁹ Vgl. Larsen, Allen: The Dynamic Vehicle Routing System, 2000, S. 86f.

⁴⁰ Vgl. Larsen, Allen: The Dynamic Vehicle Routing System, 2000, S. 87f.

⁴¹ Vgl. Larsen, Allen: The Dynamic Vehicle Routing System, 2000, S. 85.

⁴² Larsen, Allen: The Dynamic Vehicle Routing System, 2000, S. 88.

6.2 Erkenntnisse aus der Simulation

In einer Simulation mit verschiedenen Szenarios sollte untersucht werden, ob die Heuristik, die zum Einfügen neuer dynamischer Requests verwendet wird, durch die Anwendung von Batching-Strategien in ihrer Leistung verbessert werden kann. Die Batching-Strategien wurden als Alternative zur Reoptimierung zu jeder Zeit, zu der neue Informationen in das System gelangen, gegen dieses Verfahren getestet.

Basierend auf der durchgeführten Simulation konnten keine Verbesserungen bei der Verwendung von Batching-Strategien festgestellt werden. In einigen Fällen wurde eine kürzere Distanz bei der Benutzung von Größe-getriebenen Strategien beobachtet, was aber zu längeren Routen führte.⁴³

Außerdem gilt es herauszustellen, dass die durchschnittlich zurückgelegte Distanz nicht nur vom Grad der Dynamik sondern zusätzlich von der Struktur der Daten für das Routing System abhängt. Zudem stieg die Verspätung mit steigendem Grad der Dynamik.⁴⁴

6.3 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde untersucht, ob die Verwendung von Batching-Strategien das Einfügen von neuen dynamischen Requests verbessert und damit eine Alternative zur Reoptimierung darstellt. In durchgeführten Simulationen war keine Verbesserung festzustellen. Jedoch glauben Allen Larsen und andere Autoren daran, dass Batching-Strategien Vorteile bringen können, wenn Verbesserungen durchgeführt werden, während das Routing System nicht benutzt wird.⁴⁵

7 A-priori dynamisches TSP mit Zeitfenstern

Dieser Abschnitt soll das von Allen Larsen eingeführte a-priori dynamische TSP mit Zeitfenstern beschreiben. Dazu wurde das dynamische TSP mit Zeitfenstern (DTSPW), das in diesem Fall sowohl mit bekannten als auch mit dynamischen Kunden umgeht, um a-priori Informationen bezüglich dem Wissen über die Ankunftsintensitäten der Servicerequests in den Subregionen der Serviceregion erweitert. Zudem werden speziell für dieses Problem entwickelte Policies vorgestellt, die mit diesen Informationen arbeiten können. Die Policies selbst wurden mittels Simulation getestet. Zunächst erfolgt die Beschreibung des DTSPW.⁴⁶

⁴³ Vgl. Larsen, Allen: The Dynamic Vehicle Routing System, 2000, S. 105f.

⁴⁴ Vgl. Larsen, Allen: The Dynamic Vehicle Routing System, 2000, S. 105.

⁴⁵ Vgl. Larsen, Allen: The Dynamic Vehicle Routing System, 2000, S. 106.

⁴⁶ Vgl. Larsen, Allen: The Dynamic Vehicle Routing System, 2000, S. 107.

7.1 Beschreibung dynamisches TSP mit Zeitfenstern

Wie bereits erwähnt soll das dynamische TSP mit Zeitfenstern mit bekannten und dynamischen Kunden arbeiten. Zudem muss ein Service innerhalb eines Zeitfensters beginnen. Dabei handelt es sich um weiche Zeitfenster, die verletzt werden dürfen, was aber eine Strafe für die Zielfunktion nach sich zieht.⁴⁷ Die Zielfunktion selbst ergibt sich aus der Summe der tatsächlichen Reisekosten addiert mit den Kosten für die Strafe bei Verletzung des Zeitfensters. Das Ziel besteht darin, eine möglichst kostenoptimale Route zu finden, so dass alle Kunden innerhalb des Zeitfensters bedient werden.⁴⁸ In Abbildung 8 ist ein einfaches Beispiel des dynamischen TSP mit Zeitfenstern dargestellt. Das Quadrat in der Mitte der Abbildung soll das Depot kennzeichnen.

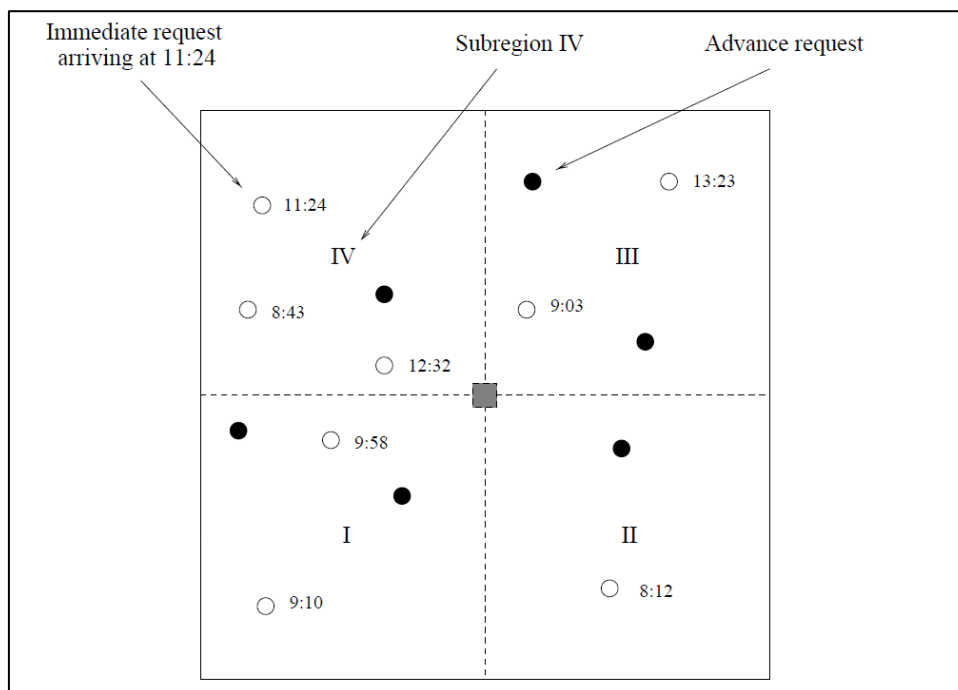


Abbildung 8: Beispiel DTSPW⁴⁹

Die Serviceroute wird in n Subregionen gleicher Größe aufgeteilt. In Abbildung 8 kann man sehen, dass die Anzahl an Subregionen vier entspricht. Zudem werden sogenannte Idle-Points definiert. Dies sind spezielle Rastpositionen, auf die im Abschnitt „7.2 A-priori DTSPW und Routing Policies“ noch näher eingegangen wird. Es ist zu beachten, dass ein Service nicht beginnen kann, wenn das Zeitfenster noch geschlossen ist. Das bedeutet, dass ein Fahrzeug eventuell warten muss. Die Servicezeiten beim Kunden sind unbekannt bis der

⁴⁷ Vgl. Larsen, Allen: The Dynamic Vehicle Routing System, 2000, S. 108.

⁴⁸ Vgl. Larsen, Allen: The Dynamic Vehicle Routing System, 2000, S. 110.

⁴⁹ Larsen, Allen: The Dynamic Vehicle Routing System, 2000, S. 109.

Service endet. Allerdings wird angenommen, dass diese Servicezeiten logarithmisch normalverteilt⁵⁰ sind.⁵¹

7.2 A-priori DTSPTW und Routing Policies⁵²

Das im vorherigen Abschnitt beschriebene dynamische TSP mit Zeitfenstern wird um a-priori Informationen bezüglich der Ankunftsintensitäten der Servicerequests in den Subregionen erweitert. Dadurch soll eine Verbesserung der Gesamtdistanz oder der Gesamtverspätung erreicht werden.

Nachdem ein Service beendet wurde, können zwei Situationen eintreten: In der ersten Situation ist das Zeitfenster des nächsten bereits offen oder es wird offen sein, wenn das Fahrzeug den Kunden erreicht hat. Situation zwei ist der Gegensatz zu Situation eins mit dem Zusatz, dass eventuell kein nächster Kunde existiert. Es muss gewartet werden, was beim letzten Kunden oder an den speziell definierten Idle-Points geschehen kann.

Im Zusammenhang mit der Nutzung von a-priori Informationen und dem Warten an Idle-Points hat Allen Larsen drei Policies entwickelt, die basierend auf den Informationen eine gezielte Repositionierung der Fahrzeuge zu bestimmten Idle-Points veranlassen. Diese Policies sollen kurz vorgestellt werden. Die NEAREST-Policy besagt, dass ein Fahrzeug, das nichts zu tun hat, zum nächsten Idle-Point relativ zur eigenen Position fährt. Bei der BUSIEST-Policy wird das Fahrzeug dazu veranlasst, zum Idle-Point mit der höchsten Ankunftsintensität zu fahren. Wird die HI-REQ-Policy verwendet, wird zunächst ein Wert für die Attraktivität der Idle-Points berechnet. Dieser ergibt sich aus der Anzahl erwarteter dynamischer Kundenaufträge in einem bestimmten Zeitintervall. Die Wahl fällt auf den Idle-Point mit der höchsten Attraktivität.

In einer Simulation wurden die drei vorgestellten Repositionierungspolicies gegen die Policy NO REPOS getestet. Hierbei werden keine Repositionierungen von Fahrzeugen veranlasst, was bedeutet, dass die Fahrzeuge immer an ihrer aktuellen Position warten.

7.3 Erkenntnisse aus der Simulation

In der Simulation wurden zwei Serien gestartet. NO REPOS diene als Referenz, wobei mit jedem Empfang eines dynamischen Requests ein neues TSPTW-Problem gelöst wurde. In Serie I wurden die Policies unter der Zielsetzung Minimierung der Distanz gegeneinander getestet. Dabei produzierten alle Repositionierungspolicies in allen Testszenarien

⁵⁰ Eine stetige Zufallsvariable X ist logarithmisch normalverteilt, wenn $\log(X)$ normalverteilt ist. Vgl. Storm, Regina: Wahrscheinlichkeitsrechnung, mathematische Statistik und statistische Qualitätskontrolle, 2007, S. 70.

⁵¹ Vgl. Larsen, Allen: The Dynamic Vehicle Routing System, 2000, S. 108.

⁵² Vgl. Larsen, Allen: The Dynamic Vehicle Routing System, 2000, S. 114ff.

schlechtere Ergebnisse als NO REPOS, da jede Repositionierung die zurückgelegte Distanz erhöht, wenn der Idle-Point nicht auf dem direkten Weg zum nächsten Kunden liegt.⁵³ Dieses Verhalten ist ähnlich wie dem zwischen den Routing-Policies FCFS und FCFS-SQM des partiell dynamischen TRP, die im Abschnitt „5.2 Routing Policies“ beschrieben wurden. Da der Techniker in FCFS-SQM nach Beenden des Service immer erst zum Depot zurückreist, wird sein Weg zum nächsten Kunden länger sein als der direkte Weg mittel FCFS.

In Serie II wurden die Policies unter der Zielsetzung Minimierung der Verspätung untersucht. Alle Repositionierungspolicies hatten mehr bessere Ergebnisse als NO REPOS. HI-REQ erbrachte in beiden Serien die besten Ergebnisse von den Repositionierungspolicies. Die Verspätung wurde im Vergleich zu NO REPOS nur wenig verbessert.⁵⁴ Die Reduzierung der Verspätung erfolgte durch eine im Gegenzug höhere Distanz.⁵⁵

7.4 Zusammenfassung

In diesem Abschnitt wurde das a-priori dynamische TSP mit Zeitfenstern vorgestellt. Dabei handelt es sich um ein um a-priori Informationen bezüglich Ankunftsintensitäten erweitertes dynamisches TSP mit Zeitfenstern. Die Idee war es, diese Informationen in speziellen Policies zu verwenden, um Fahrzeuge gezielt an anderen Orten, den Idle-Points, zu positionieren. Dadurch kann die Verspätung auf Kosten einer längeren Distanz reduziert werden, was auch durch die Ergebnisse der Simulation bestätigt wurde.⁵⁶

8 Fallstudie aus der Realität

Neben den vorangegangenen Simulationen wurde eine Fallstudie in der Realität durchgeführt. Bei UPS wurden zwei Wochen lang Daten gesammelt, aufbereitet und zur Verarbeitung vorbereitet. Da das hier vorliegende Problem ähnlich dem Problem aus Kapitel 7 ist, wurden die Repositionierungspolicies angewendet, um zu untersuchen, ob mit den Daten der Realität ähnliche Ergebnisse produziert werden, wie mit generierten Daten.

Die Ergebnisse bezüglich einer Verbesserung der Verspätung waren nur gering. Begründet wurden die Resultate mit einer kleinen zeitlichen Beschränkung für die Fahrer, da es möglich ist, die Mehrheit der Kunden innerhalb eines bestimmten Zeitfensters zu bedienen, auch wenn sie weit zerstreut sind. Dadurch ist die Möglichkeit einer Reduzierung der Verspätung

⁵³ Vgl. Larsen, Allen: The Dynamic Vehicle Routing System, 2000, S. 120.

⁵⁴ Vgl. Larsen, Allen: The Dynamic Vehicle Routing System, 2000, S. 120f.

⁵⁵ Vgl. Larsen, Allen: The Dynamic Vehicle Routing System, 2000, S. 127.

⁵⁶ Vgl. Larsen, Allen: The Dynamic Vehicle Routing System, 2000, S. 127.

nur gering. Zudem wurde die Datenmenge im Nachhinein als nicht ideal betrachtet, um die Leistungsfähigkeit bezüglich der Reduzierung der Verspätung zu testen.⁵⁷

9 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde basierend auf den Informationen der Doktorarbeit „The Dynamic Vehicle Routing Problem“ von Allen Larsen ein Überblick über den Bereich dynamisches Vehicle Routing gegeben.

Zunächst galt es, nach einer Einführung in Kapitel 1, eine Beschreibung des dynamischen Vehicle Routing Problems in Kapitel 2 vorzunehmen.

Anschließend erfolgten im Kapitel 3 die Erläuterung bereits untersuchter Methodenklassen sowie die Darstellung einer chronologischen Übersicht der Erforschungen der wichtigsten Probleme.

In Kapitel 4 wurden der Grad der Dynamik und die Erweiterung von diesem Maß zum effektiven Grad der Dynamik erläutert. Allen Larsen hat diese Erweiterung für die Fälle mit und ohne Zeitfenster entwickelt.

Anschließend erfolgte im Kapitel 5 die Einführung des partiell dynamischen TRP, für das ein linearer Zusammenhang zwischen Grad der Dynamik und Routenlänge ermittelt werden konnte. Außerdem wurden für das Problem adaptierte Policies in einer Simulation getestet, mit dem Ergebnis, dass die Nearest Neighbor Policy zur Verwendung in derartigen Problemen empfohlen wurde.

Im kapazitiven VRP aus Kapitel 6 wurden die von Allen Larsen eingeführten Batching-Strategien vorgestellt, die eine Alternative zur reinen Reoptimierung zu jeder Zeit, zu der neue Informationen eintreffen, darstellen sollen. In Simulationen wurde ermittelt, dass die gefahrene Distanz nicht nur vom Grad der Dynamik, sondern auch von der Datenstruktur für das Routing System abhängt. Zudem konnte beobachtet werden, dass eine höhere Dynamik zu einer größeren Verspätung führt.

Kapitel 7 beschäftigte sich mit dem von Allen Larsen um a-priori Informationen erweiterten dynamischen TRP mit Zeitfenstern und den entsprechend dafür entwickelten Policies, die diese Informationen zur gezielten Repositionierung von Fahrzeugen nutzen, um die Verspätung zu reduzieren. Die Ergebnisse der Simulation zeigten nur geringe Verbesserungen.

⁵⁷ Vgl. Larsen, Allen: The Dynamic Vehicle Routing System, 2000, S. 140.

Im Kapitel 8 wurde eine Fallstudie aus der Realität vorgestellt, in der die Policies aus Kapitel 7 Anwendung bei einem Kurierdienst fanden. Die Ergebnisse waren ähnlich den Ergebnissen der Simulation, so dass nur kleine Verbesserungen bezüglich der Verspätung erreicht wurden.

10 Fazit

Allen Larsen hat in seiner Doktorarbeit einige bekannte Probleme und Verfahren aus dem Bereich des dynamischen Vehicle Routing aufgegriffen und diese um theoretisch sinnvolle Aspekte erweitert, von deren praktischen Nutzen aber teilweise noch nichts zu erkennen war. Als Beispiel sei der effektive Grad der Dynamik genannt, der zwar in Kapitel 5 und 6 mit untersucht wurde, aber zu keinen neuen Erkenntnissen führte.

Des Weiteren entstanden aus den Erweiterungen neue Ideen, die Potential für eine sinnvolle praktische Nutzung aufzeigen. Zu nennen sind in diesem Zusammenhang die Nutzung von a-priori Informationen zur Routenplanung sowie die Verwendung von Policies zur gezielten Repositionierung von Fahrzeugen, um die Verspätung zu minimieren.

Außerdem hat sich Larsen Gedanken darüber gemacht, wie man Systemressourcen sinnvoller einsetzen kann. Zu diesem Zweck hat er Batching-Strategien entwickelt, von denen, bisher lediglich theoretischem Verbesserungspotential er und andere Autoren überzeugt sind. Zudem wurde die Empfehlung für die Nutzung einer bestimmten Strategie im partiell dynamischen TRP vorgenommen, was zu einer Minimierung der Routing Kosten führt.

Die in der Doktorarbeit von Allen Larsen vorgestellten Ideen zeigen, dass diese nicht allgemein auf jede Problemstellung im Zusammenhang mit der Planung von Routen angewendet werden können. Um in der Praxis optimale Lösungen zu erhalten, die auch der Zielsetzung der einzelnen Firmen genügen, sind anwendungsspezifische Anpassungen der verwendeten Verfahren vorzunehmen. Daher kann man nicht sagen, dass es eine einzige Möglichkeit gibt, die in jedem Fall Anwendung findet, sondern dass die verschiedenen Lösungsmöglichkeiten auf den Einzelfall angepasst werden müssen.

Literaturverzeichnis

Larsen, Allen: The Dynamic Vehicle Routing Problem, ohne Ort: 2000

Larsen, Allen / Madsen, Oli B.G. / Solomon, Marius M.: The Vehicle Routing Problem: Latest Advances And New Challenges, ohne Ort: Springer, 2008

Storm, Regina: Wahrscheinlichkeitsrechnung, mathematische Statistik und statistische Qualitätskontrolle, München: Carl Hanser Verlag, 2007