

Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 20996 N

Thema

Tauschbörse für Zeitfenster - Flexibilitätssteigerung bei der Tourenplanung mit
Zeitfenstervorgaben im Straßengüterverkehr

Berichtszeitraum

01.02.2020 bis 31.03.2023

Forschungsvereinigung

Bundesvereinigung Logistik (BVL) e.V.
Schlachte 31
28195 Bremen

Forschungseinrichtung(en)

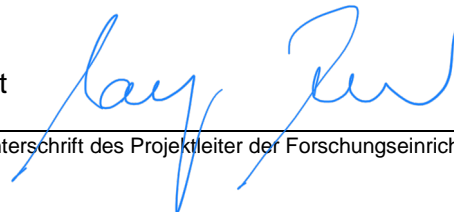
Technische Universität Darmstadt
Fachgebiet Unternehmensführung und Logistik
Hochschulstr. 1
64289 Darmstadt

13.07.2023 Darmstadt

Ort, Datum

Ralf Elbert

Name und Unterschrift des Projektleiter der Forschungseinrichtung(en)



Gefördert durch:

Zusammenfassung

Webbasierte Zeitfenstermanagementsysteme (ZMS) sind heutzutage bei Industrie- und Handelsunternehmen weit verbreitet, um die internen Prozesse zur Be- und Entladung von Lkw an der Laderampe zu optimieren. Betriebstage werden hierbei in eine Menge Zeitfenstern unterteilt, die zuvor von Spediteuren nach dem First-Come First-Served (FCFS)-Prinzip über die webbasierten ZMS gebucht werden müssen. Sind die Ankunftszeiten von Lkw bekannt, können die internen Ressourcen (wie Personal, Flurförderzeuge, etc.) bestmöglich den einzelnen Zeitfenstern und Laderampen zugeteilt werden. Eine Herausforderung, die durch die Anwendung des FCFS-Prinzips zur Buchung der Zeitfenster für Spediteure entsteht, ist, dass Zeitfenster, die für die Tourenplanung optimal sind, gerade für kleine und mittelgroße Spediteure schnell nicht mehr verfügbar sind und so Umwege aufgrund der Zeitfensterrestriktionen gefahren werden müssen.

Mit dem Ziel, die Tourenplanung mit Zeitfensterrestriktionen im Straßengüterverkehr zu verbessern, wurde im Rahmen des Forschungsprojektes „Tauschbörse für Zeitfenster – Flexibilitätssteigerung bei der Tourenplanung mit Zeitfenstervorgaben im Straßengüterverkehr“ erforscht, welche Verbesserungen durch einen nachträglichen Tausch bzw. eine Reallokation von ungünstigen Zeitfenstern erreicht werden können. Hierzu wurden zunächst, basierend auf einer Literaturrecherche sowie einem Fokusgruppeninterview Anforderungen, die von den beteiligten Akteuren an einen Tourenplanungsprozess mit Mechanismus zur Reallokation von ungünstigen Zeitfenster gestellt werden, formuliert. Anschließend, wurde aufbauend auf den Ergebnissen des Vorgängerprojektes „Zeitfenstermanagement im Straßengüterverkehr“ und einer Literaturrecherche ein Tourenplanungsprozess mit Zeitfensterrestriktionen modelliert. Mithilfe der Anforderungen wurde anschließend ein Prozess mit Mechanismus entwickelt, der, bedingt durch die richtige Anordnung der einzelnen Prozessschritte, zu einer Pareto-Verbesserung aller beteiligten Akteure führt. Nach Fertigstellung der modellierten Tourenplanungsprozesse wurden abschließend vier Interviews mit unterschiedlichen Experten geführt sowie ein weiteres Fokusgruppeninterview durchgeführt, um die modellierten Prozesse zu validieren und verifizieren.

Beteiligt am modellierten Tourenplanungsprozess sind insbesondere Spediteure, die, wie bereits beschrieben, Zeitfenster an der Laderampe zur Be- und Entladung buchen müssen und diese in ihrer Tourenplanung berücksichtigen müssen. Weitere Akteure sind Verlader sowie Industrie- und Handelsunternehmen, die als Kunden der Verlader die Ware am Ende des Prozesses erhalten. Beide Akteure profitieren durch den Einsatz der ZMS, in dem die internen Prozesse an der Laderampe optimiert werden können. Weitere Akteure sind die Betreiber

digitaler Plattformen, die webbasierte ZMS ihren Kunden als eine Applikation anbieten sowie über ihre normale Funktion hinaus als Betreiber des Mechanismus zur Reallokation von ungünstigen Zeitfenstern auftreten.

Bei der Suche nach einem geeigneten Mechanismus zum Tausch bzw. der Reallokation von ungünstigen Zeitfenstern fiel die Auswahl aufgrund der hohen Allokationseffizienz des Mechanismus auf eine verdeckte Zweitpreisauktion mit Nebenzahlungen, die auch als Vickrey-Clarke-Groves (VCG) Mechanismus bezeichnet wird. Zur Untersuchung, ob durch den Einsatz eines VCG-Mechanismus zur Reallokation von ungünstigen Zeitfenstern Verbesserungen in der Tourenplanung mit Zeitfensterrestriktionen erzielt werden können, wurde methodisch ein agentenbasiertes Simulationsmodell gewählt, das mit einem exakten Optimierungsverfahren kombiniert wurde. Zur Überführung des Tourenplanungsprozesses mit VCG-Mechanismus in das Simulationsmodell wurden vier Spediteure als einzelne Agenten modelliert, vier Agentenpopulationen zur Modellierung der Verlagerer und Industrie- und Handelsunternehmen verwendet sowie ein ZMS-Anbieter als Betreiber des VCG-Mechanismus als Agent modelliert. Das Modell beschränkt sich hierbei auf die Ebene der Disposition bzw. auf die Tourenplanung. Eine Betrachtung der operativen Prozesse (Ausführung der Transportaufträge) findet im Simulationsmodell nicht statt.

Die Ergebnisse der simulationsbasierten Optimierung zeigen, dass durch die Reallokation ungünstiger Zeitfenster im Rahmen der Tourenplanung von den Auktionsgewinnern (Spediteuren) durch die Reduzierung der Distanz bereits auf Planungsebene Kosteneinsparungen in Höhe von durchschnittlich 13% bei einer zufahrenden Tour pro Lkw erzielt werden können. ZMS-Anbieter als Betreiber des Mechanismus, können ebenfalls einen Gewinn durch den Betrieb des VCG-Mechanismus erzielen. Außerdem verkürzt sich die Zustellzeit zum Kunden, was zu einem verbesserten Lieferservice führt. Findet die Reallokation der ungünstigen Zeitfenster statt bevor die interne Zuweisung der Ressourcen zu den Laderampen von Verlagerern und Industrie- und Handelsunternehmen erfolgt (vor Einfrierung des Zeitfensters) können alle am Prozess beteiligten Akteure bessergestellt werden, ohne den Nutzen von ZMS bei anderen Akteuren zu mindern. Zusammenfassend lässt sich somit sagen, dass durch den Einsatz des VCG-Mechanismus zur Reallokation von ungünstigen Zeitfenstern eine Pareto-Verbesserung für die direkt und indirekt am Prozess beteiligten Akteure erreicht werden kann. Zur Erreichung der vorgestellten Verbesserungen sowie dem Transfer der erzielten Ergebnisse in die Praxis werden am Ende dieses Schlussberichtes Handlungsempfehlungen für Spediteure und ZMS-Anbieter aufgezeigt, wie eine Umsetzung in der Praxis bestmöglich gelingen kann.

Ausführlicher Sachbericht des Forschungsvorhabens

Inhaltsverzeichnis

1. VORBEMERKUNG	5
2. DURCHGEFÜHRTE ARBEITEN UND ERGEBNISSE IM BERICHTSZEITRAUM.....	6
2.1 ARBEITSPAKET 1 – PROZESSAUFNAHME UND ANFORDERUNGSANALYSE	7
2.2 ARBEITSPAKET 2 – ERMITTLUNG DER TAUSCHBEREITSCHAFT VON ZEITFENSTERN	15
2.3 ARBEITSPAKET 3 – ENTWICKLUNG VON TAUSCHMECHANISMEN.....	17
2.4 ARBEITSPAKET 4 – AKTEURSÜBERGREIFENDE SIMULATION DER TAUSCHBÖRSE.....	21
2.4.1 Generierung der Netzwerkknoten sowie Erzeugung Distanzmatrix.....	23
2.4.2 Lösung des PDPTW und Generierung Kanten	25
2.4.3 Generierung und Auswahl der Gebote.....	27
2.4.4 Ergebnisanalyse.....	29
2.5 ARBEITSPAKET 5 – ABLEITUNG VON HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN / LEITFADEN	31
3. VERWENDUNG DER ZUWENDUNGEN	33
4. NOTWENDIGKEIT UND ANGEMESSENHEIT DER GELEISTETEN ARBEIT	34
5. BEWERTUNG DES WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHEN UND WIRTSCHAFTLICHEN NUTZENS DER ERZIELTEN ERGEBNISSE INSBESONDERE FÜR KMU SOWIE IHRES INNOVATIVEN BEITRAGS UND IHRER INDUSTRIELLEN ANWENDUNGSMÖGLICHKEITEN	36
6. ERGEBNISTRANSFER IN DIE WIRTSCHAFT.....	38
6.1 TRANSFERMAßNAHMEN WÄHREND DER PROJEKTLAUFZEIT.....	38
6.2 TRANSFERMAßNAHMEN NACH ABSCHLUSS DES VORHABENS	41
LITERATURVERZEICHNIS	44
ANHANG – LEITFADEN EXPERTENINTERVIEW (AP1).....	46

1. Vorbemerkung

Das Vorhaben „Tauschbörse für Zeitfenster – Flexibilitätssteigerung bei der Tourenplanung mit Zeitfenstervorgaben im Straßengüterverkehr“ (Kurztitel: „Tauschbörse für Zeitfenster“) wurde im Förderzeitraum von Februar 2020 bis März 2023 unter der Leitung von Prof. Dr. Ralf Elbert und Felix Roeper am Fachgebiet Unternehmensführung und Logistik der Technischen Universität Darmstadt durchgeführt. An der Projektbearbeitung waren außerdem sieben studentische Hilfskräfte sowie eine wissenschaftliche Mitarbeiterin zur Unterstützung der Projektbearbeitung aktiv. Im Zusammenhang mit dem Projekt sind außerdem acht wissenschaftliche Arbeiten entstanden. Dabei handelte es sich um drei Bachelor-, drei Master- sowie zwei Seminararbeiten. Eine Dissertation auf dem Gebiet der digitalen Plattformen und Tourenplanung mit Zeitfensterrestriktion ist derzeit am Fachgebiet Unternehmensführung und Logistik in Arbeit. Im Rahmen des Projektes wurden zudem mit den Unternehmen des Projektbegleitenden Ausschusses sowie mit weiteren Experten aus der Praxis Interviews und Workshops zur Validierung und Verifizierung sowie zur Sicherstellung der Praxistauglichkeit der erzielten Ergebnisse durchgeführt.

Das IGF-Vorhaben 20996 N der Forschungsvereinigung Logistik wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Die Erforschung der im Projektantrag gestellten und zu Beginn der Laufzeit konkretisierten Aufgabenstellung erfolgte entsprechend dem Projektplan in fünf Arbeitspaketen. Die Beschreibung der einzelnen Arbeitspakete und der erzielten Ergebnisse erfolgt in Kapitel 2 dieses Berichts. Anschließend wird die Verwendung der Zuwendungen in Kapitel 3 begründet erläutert. In Kapitel 4 wird die Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit thematisiert bevor in Kapitel 5 eine Bewertung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen vorgenommen wird. Der Bericht schließt mit der Beschreibung der Maßnahmen zum Transfer in die Wirtschaft in Kapitel 6 ab.

2. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse im Berichtszeitraum

Im Rahmen dieses Projektes wurden fünf zentrale Arbeitspakete bearbeitet, die laut Projektantrag vorgesehen waren. Sie sind in Abbildung 1 dargestellt. Die Bearbeitungszeit erstreckte sich, aufgrund von zwei kostenneutralen Verlängerungen um 14 Monate, auf insgesamt 38 Monate.

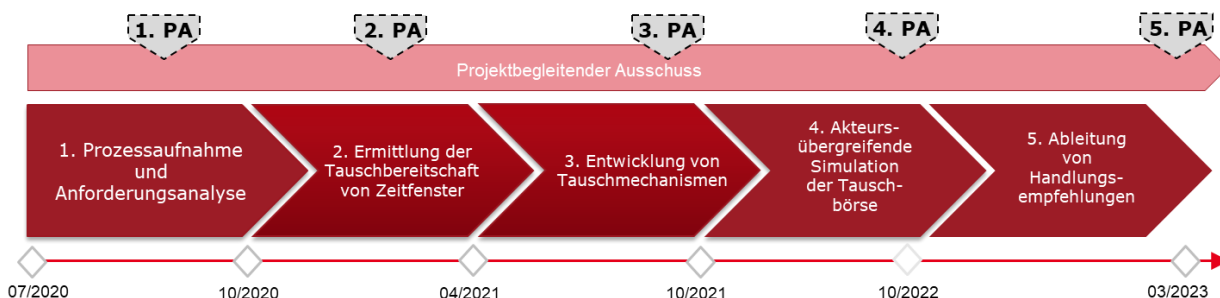


Abbildung 1: Durchgeführte Arbeitspakete

Grund hierfür waren zum einen, dass zum Zeitpunkt der Bewilligung des IGF-Vorhabens zum 01.02.2020 dem Fachgebiet Unternehmensführung und Logistik das Personal fehlte, um zu Beginn des Bewilligungszeitraums direkt mit der Bearbeitung des IGF-Vorhabens starten zu können. Zum anderen kam es bedingt durch die Pandemie und die damit einhergehende Umstellung auf Home-Office zu weiteren Verzögerungen im Projektablauf, was zu einer kostenneutralen Verlängerung von zwölf Monaten führte. Aufgrund der dreimonatigen Elternzeit des Projektleiters wurde zudem eine weitere kostenneutrale Verlängerung um drei Monate beantragt. Die kostenneutralen Verlängerungen sowie die in diesem Zusammenhang stehenden Ratenverschiebungen wurden genehmigt. Das Projekt startete somit am 01.07.2020 und endete am 31.03.2023. Im Folgenden werden detailliert die Ziele, das Vorgehen sowie die Forschungsergebnisse der einzelnen Arbeitspakete vorgestellt.

2.1 Arbeitspaket 1 – Prozessaufnahme und Anforderungsanalyse

Ziele: Die Erfassung von aktEURsspezifischen Anforderungen sowie die darauf aufbauende Gestaltung eines Tourenplanungsprozesses mit Mechanismus zur Reallokation von ungünstigen Zeitfenstern waren Forschungsziel im ersten Arbeitspaket.

Vorgehen: Zunächst wurde eine systematische Recherche in der wissenschaftlichen sowie praxisnahen Literatur durchgeführt. Die in der Literatur gefundenen Anforderungen sowie weitere grundlegende Fragestellungen zur Gestaltung des Prozesses, wurden anschließend im Projektbegleitenden Ausschuss (PA) präsentiert und diskutiert. Basierend auf den Ergebnissen des PAs und der Literaturrecherche wurde dann zunächst ein Tourenplanungsprozess mit Zeitfensterrestriktionen modelliert. Hierbei wurde insbesondere auch auf die Ergebnisse des Vorgängerprojektes zurückgegriffen. Aufbauend darauf wurde der modellierte Tourenplanungsprozess mit Zeitfensterrestriktionen um einen Mechanismus zur Reallokation von ungünstigen Zeitfenstern erweitert. Die beiden Prozesse wurden anschließend in Experteninterviews sowie im zweiten PA validiert und verifiziert.

Ergebnisse: Bei der Suche nach geeigneten Anforderungen wurde nach prozess-, Mechanismus und aktEURsspezifischen Anforderungen unterschieden. Bei den aktEURsspezifischen Anforderungen wurde zudem noch zwischen den drei Hauptakteuren Verloader/Lagerhausbetreiber, Spediteur und Zeitfenstermanagementsystem (ZMS)-Anbieter unterschieden. Wobei im weiteren Verlauf des Berichtes der Begriff Lagerhausbetreiber verwendet wird, um Industrie- und Handelsunternehmen zu beschreiben, die im Tourenplanungsprozess den Endkunden repräsentieren. Zudem wurden auf Grund von ähnlichen Interessen die Akteure Verloader und Lagerhausbetreiber bei der Formulierung von Anforderungen zusammengefasst.

Alle drei Akteure haben eine sehr unterschiedliche Sichtweise auf die Ausgestaltung des Prozesses. Spediteure organisieren den Transport und führen ihn durch. Wobei im weiteren Verlauf des Berichtes Frachtführer der Einfachheit halber auch als Spediteure bezeichnet werden sollen. Der Verloader produziert das vom Lagerhausbetreiber nachgefragte Gut und vergibt den Transportauftrag an den Spediteur. Bei der Organisation des Transportes bzw. der Durchführung der Tourenplanung müssen stets, in dem von uns betrachteten Szenario, Zeitfenster an den Laderampen von Verladern und Lagerhausbetreibern über standardisierte digitale Plattformen von ZMS-Anbietern gebucht werden, die zur Be- oder Entladung von Lkw zur Verfügung stehen. Lagerhausbetreiber sowie Verloader nutzen die gebuchten Zeitfenster im Anschluss, um ihre internen Prozesse an der Laderampe zu optimieren indem zur Verfügung stehende Ressourcen mithilfe der Zeitfenster möglichst optimal den entsprechenden

Laderampen zugeordnet werden. So kann eine optimale Abfertigung der ankommenden Lkw gewährleistet werden (Elbert & Roeper 2021; Dr. Meier & Schmidt GmbH 2023; LOGSOL GmbH 2023; Transporeon 2023). Eine Herausforderung besteht laut Projektbegleitenden Ausschuss im Zusammenhang mit ankommenden Lkw die bedingt durch Stau oder andere Vorkommnisse auf der Strecke zu spät das gebuchte Zeitfenster erreichen. Das gebuchte Zeitfenster bleibt ungenutzt oder ein anderer Lkw wird vorgezogen. Für den Spediteur bedeutet dies, dass der betroffene Lkw auch weitere Zeitfenster nicht einhalten kann. Die geplante Tour muss verworfen werden und ad-hoc neu geplant. Eine weitere Herausforderung entsteht für Spediteure bei der Tourenplanung mit Zeitfensterrestriktionen. Bedingt durch das First-Come-First-Serve (FCFS)-Prinzip bei der Buchung von Zeitfenstern sind die für die individuelle Tourenplanung günstigsten Zeitfenster schnell vergeben. Dies führt für Transportunternehmen bereits in der Planung oft zu langen Umwegen bei der zu fahrenden Tour (Hackius & Kersten 2014). Eine Möglichkeit die Touren während der Planung zu verkürzen und die Tourenplanung mit Zeitfensterrestriktionen zu flexibilisieren, ist es, unvorteilhafte Zeitfenster mit anderen Transportunternehmen zu tauschen. Ziel dieses Forschungsprojektes ist es daher einen Mechanismus für den Tausch bzw. die Reallokation von ungünstigen Zeitfenstern in den Tourenplanungsprozess zu implementieren, der zu einer Pareto-Verbesserungen für alle am Prozess beteiligte Akteure führt.

Die Erarbeitung von Anforderungen, die von den Akteuren an den neuen Prozess gestellt werden, hatte im ersten Schritt Priorität. So ist es für Verlader und Lagerhausbetreiber wichtig, dass ein Tausch von Zeitfenster an einer Laderampe zwischen Spediteuren nicht zu kurzfristigen internen Umplanungen an der Laderampe führt. Hierdurch würde der Nutzen, den ZMS für Verlader und Lagerhausbetreiber mit sich bringen, gemindert. Weitere Anforderungen die von Verladern und Lagerhaus formuliert wurden, sind, dass durch den Tausch von Zeitfenstern die Servicequalität gesteigert werden sollte, indem durch die verbesserte Tourenplanung bzw. verkürzte Tour und gleichbleibender Auftragszeit mehr Puffer beim Transport eingeplant werden kann. Für ZMS-Anbieter ist es hingegen wichtig, für ihre Hauptkunden die Lagerhausbetreiber und Verlader weiterhin zu gewährleisten, dass der Nutzen des Systems, nämlich die Transparenz über die Ankünfte von Lkw nicht verloren geht oder gemindert wird durch die kurzfristige Reallokation von ungünstigen Zeitfenstern. Weiter ist es für ZMS-Anbieter wichtig, wenn sie als Betreiber des Mechanismus auftreten, dass genügend Teilnehmer den Mechanismus zum Tausch von Zeitfenster nutzen und das durch den Betrieb des Mechanismus ein Gewinn erzielt werden kann. Sollte der Mechanismus von einem anderen ZMS-Anbieter betrieben werden, müssen Ausgleichzahlungen für die Datenweitergabe und die Umplanung ausgezahlt werden. Spediteure auf der anderen Seite, werden nur bereit sein an dem Mechanismus teilzunehmen, wenn Kosten in der Tourenplanung durch eine Reallokation von ungünstigen Zeitfenster reduziert werden können. Zudem sollte für den Disponenten

bedingt durch die Gebotsabgabe und Neuplanung der Tour der Arbeitsaufwand gering gehalten werden und keine zusätzlichen Kosten in der Administration entstehen.

Weitere Anforderungen die formuliert wurden, beziehen sich insbesondere auf den Prozess und den Mechanismus. Es ist wichtig, dass durch die Gestaltung eines neuen Tourenplanungsprozesses die Qualität des Lieferservices nicht verringert wird. Weiterhin muss ein reibungsloser Informationsfluss zwischen den Akteuren stattfinden sowie alle am Tausch beteiligten Parteien über den Ausgang des Tausches informiert werden. Bei Abgabe von Geboten sollte die Bonität des bietenden Spediteurs überprüft werden und zu dem sichergestellt werden, dass ausstehende Zahlungen auch geleistet werden können. Um weiterhin zu gewährleisten, dass der Nutzen des ZMS für Verlader und Lagerhausbetreiber nicht gemindert wird, muss der Tausch der Zeitfenster vor dem Zeitpunkt stattfinden, an dem das Zeitfenster eingefroren wird. Bedeutet, dass Zeitfenster ab diesem Zeitpunkt nicht mehr getauscht werden können und die Verlader sowie Lagerhausbetreiber die Zuteilung der internen Ressourcen zu den Laderampen durchführen können. So kann weiterhin die reibungslose Abfertigung des Lkw gewährleistet werden und der Nutzen, den ZMS für Verlader und Lagerhausbetreiber bieten, erhalten werden.

Anforderungen die an den Mechanismus gestellt werden, ergeben sich insbesondere aus den Anforderungen der einzelnen Akteure. So sollte der Mechanismus die Eigenschaft besitzen, einen Gewinn für den Betreiber des Mechanismus zu generieren. Die Eigenschaft der Anreizkompatibilität, also die Möglichkeit die Regeln eines Mechanismus so zu gestalten, dass sie kompatibel mit den Anreizen der Spediteure sind, führt dazu, dass der strategische Anreiz für die Spediteure falsche Gebotsangaben zu machen, ausgeschlossen wird und derjenigen Spediteur das Zeitfenster erhält, für den es am meisten Wert ist. Wird diese Anforderung erfüllt, führt dies gleichzeitig zu einer hohen Allokationseffizienz des Mechanismus, welches ebenfalls eine wichtige Anforderung darstellt (Steimle 2008, S.33). Denkt man von der Angebotsseite her, bieten Mechanismen mit der Eigenschaft der individuellen-rationalität die Möglichkeit, die Nachfrage zu stimulieren und die Anzahl der Teilnehmer im Mechanismus zu erhöhen, in dem mithilfe von Nebenzahlungen ausgeschlossen wird, das bei Teilnahme am Mechanismus der Nutzen einen negativen Wert annimmt (Steimle 2008, S.29). Alle erarbeiteten Anforderungen sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Prozessspezifische Anforderungen	Mechanismus-spezifische Anforderungen	Akteursspezifische Anforderungen		
		Verlader / Lagerhausbetreiber	Transportunternehmen	ZMS
Beibehaltung der Qualität des Lieferservice	Gewinn durch Betrieb des Mechanismus	Tausch sollte nicht zu kurzfristigen Umplanungen an der Laderampe führen	Kostensenkung durch Nutzung des Mechanismus	Gewährleistung hoher Service-qualität für Verlader / Lagerhausbetreiber
Reibungsloser Informationsfluss	Anreiz-kompatibilität	Steigerung der Pünktlichkeit	Flexibilitätssteigerung in der Tourenplanung	Ausreichend Teilnehmer am Mechanismus / Plattform
Einfachheit	Individuelle Rationalität	Optimierte Wareneingangs- & ausgangsprozesse	Kein großer zusätzlicher Arbeitsaufwand für Disponenten	Gewinn durch den Betrieb eines Mechanismus
Beendigung des Tausches vor „Einfrierung“ der Zeitfenster	Hohe Allokationseffizienz	Verringerung Lkw-Staus an der Laderampe	Einfache Bedienbarkeit	Ausgleichszahlungen bei Betrieb durch anderen Anbieter
Weitergabe von relevanten Informationen an alle beteiligten Akteure	Ausgleichszahlung für Spediteure bei hohen administrativen Kosten	Steigerung der Servicequalität	Keine zusätzlichen administrativen Kosten	Automatisierung des Tausches
Standardisierte Zeitfenster	Bei zentraler Plattform Ausgleichszahlung für Teilnahme an ZMS-Anbieter	Automatisierung des Tausches	Hohe Nutzerfreundlichkeit der Plattform (Usability)	
Datensicherheit			Automatisierung des Tausches	
Bonitätsnachweis				
Integrationsmöglichkeit bestehender Systeme				
Berücksichtigung der intersubjektiven Kompatibilität				

Tabelle 1: Anforderungen an den Tourenplanungsprozess mit Mechanismus zur Reallokation ungünstiger Zeitfenster

Aufbauend auf den Ergebnissen die im Rahmen des ersten Projektes „Zeitfenster-Management im Straßengüterverkehr - Effizienzsteigerung durch Integration von Zeitfenstervorgaben in Planungs- und Dispositionsprozessen“ erzielt wurden und um die Modellierbarkeit des Tourenplanungsprozess mit Zeitfenstertausch in späteren Verlauf des Projektes gewährleisten zu können, wurde in einem ersten Schritt, dass für einen Dispositionsprozess zu betrachtende Netzwerk gewählt. Dabei beschränkt sich die Forschung in diesem Projekt im weiteren Verlauf auf die Betrachtung von Sammelgutverkehren in der Distributionslogistik und dabei insbesondere auf die Ausführung von Transportaufträgen, bei denen von einem oder mehreren Verladern Ware abgeholt und ausgeliefert wird (Pfohl 2018, S.6; Tripp 2021 S. 247 ff.). Mit Blick in die Theorie handelt es sich dabei um One-to-one und One-to-many Probleme. Von One-to-one Problemen spricht man dabei, wenn jedes Gut von einer Quelle (Verlader) zu einer Senke (Lagerhausbetreiber) gebracht werden muss. Von One-to-many Problemen hingegen wird gesprochen, wenn das Gut bei einem Verladern abgeholt und zu mehreren Lagerhausbetreibern ausgeliefert wird. Man spricht zusammenfassend auch von Pickup and Delivery Problemen (Berbeglia et al. 2007). Abbildung 1 und 2 sollen die Probleme noch mal verdeutlichen.

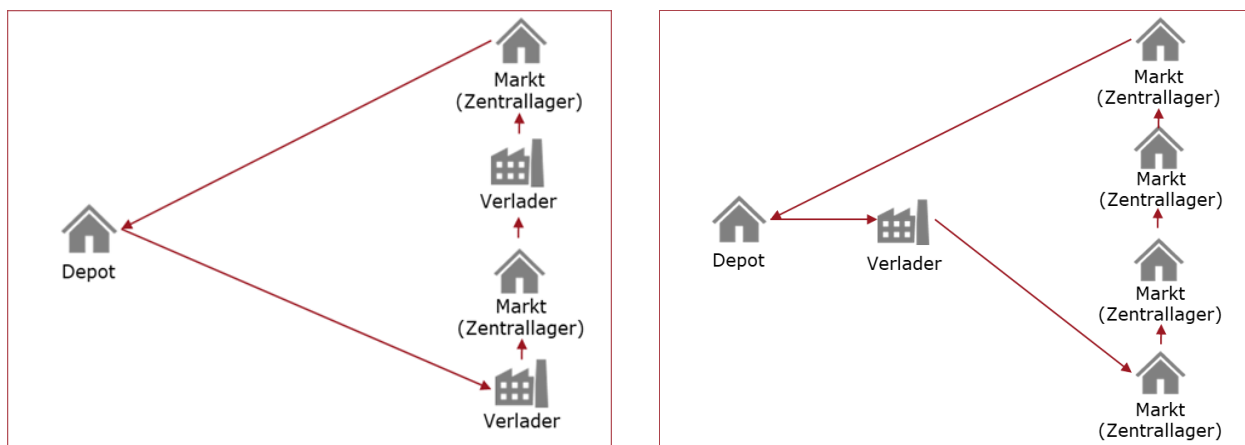


Abbildung 2: One-to- one Problem (links) und One-to-many Problem (rechts)

Zur Modellierung eines Tourenplanungsprozesses mit Zeitfenstertausch wurde zunächst der bestehende Prozess im Detail erarbeitet. Insbesondere die Ergebnisse aus dem Vorgängerprojekt wurden hierbei herangezogen und erweitert bzw. ergänzt (siehe: Elbert et al. 2018a; Elbert et al. 2018b). Abbildung 4 zeigt den Prozess der nun beispielhaft für einen Transportauftrag aufgezeigt werden soll. Beginnend beim Endkunden, dem Lagerhausbetreiber, wird ein Auftrag für den Transport der Güter ausgelöst. Dieser Auftrag geht beim Verladern ein und die Güter werden produziert. Anschließend oder parallel wird eine Spedition mit der Auslieferung der Güter beauftragt. Mit Erhalt des Transportauftrages beginnt das Unternehmen mit der Tourenplanung. Zunächst werden hierfür mithilfe der Auftragsnummer nach dem FCFS-Prinzip beim Verladern und Lagerhausbetreiber über eine webbasierte Applikation, Zeitfenster bei einem oder zwei ZMS-Anbietern gebucht. Die Länge des zu buchenden Zeitfensters und die

Zuordnung des Lkw zu einer Laderrampe, hängen dabei von den Eigenschaften der aufzuladenden bzw. abzuladenden Gütern ab sowie von der Ladeinheit (Einzelstückpalette oder Mischstückpalette) und dem Ladungsträger (Palette oder Container) auf denen die Güter transportiert werden. Die Länge des Zeitfenster wird dabei in der Praxis häufig von den ZMS-Anbietern auf Basis der eben beschriebenen Anforderungen dynamisch berechnet (Dr. Meier & Schmidt GmbH 2023; LOGSOL GmbH 2023; Transporeon 2023).

	Verlader/Lagerhausbetreiber			
	Laderrampe 1	Laderrampe 2	Laderrampe 3	Laderrampe für Container
09:30 Uhr		Spediteur 3	Spediteur 5	Spediteur 7
10:00 Uhr	Spediteur 1			Spediteur 7
10:30 Uhr				
11:00 Uhr		Spediteur 4		
11:30 Uhr			Spediteur 6	
12:00 Uhr	Spediteur 2			Spediteur 8
12:30 Uhr				
13:00 Uhr				

Abbildung 3: Oberfläche zur Buchung von Zeitfenster (basierend auf <https://www.logsol.de/de/rampman-rampenmanagement.html>)

Nachdem die Zeitfenster berechnet und dem Transportunternehmen zur Verfügung gestellt wurden, plant der Spediteur die Tour unter Berücksichtigung der Zeitfensterrestriktionen und führt den Transport durch. Parallel zur Tourenplanung werden beim Verlader und Lagerhausbetreiber Ressourcen für die Abfertigung des Lkw dem gebuchten Zeitfenster zugeordnet und der Lkw am Ende abgefertigt.

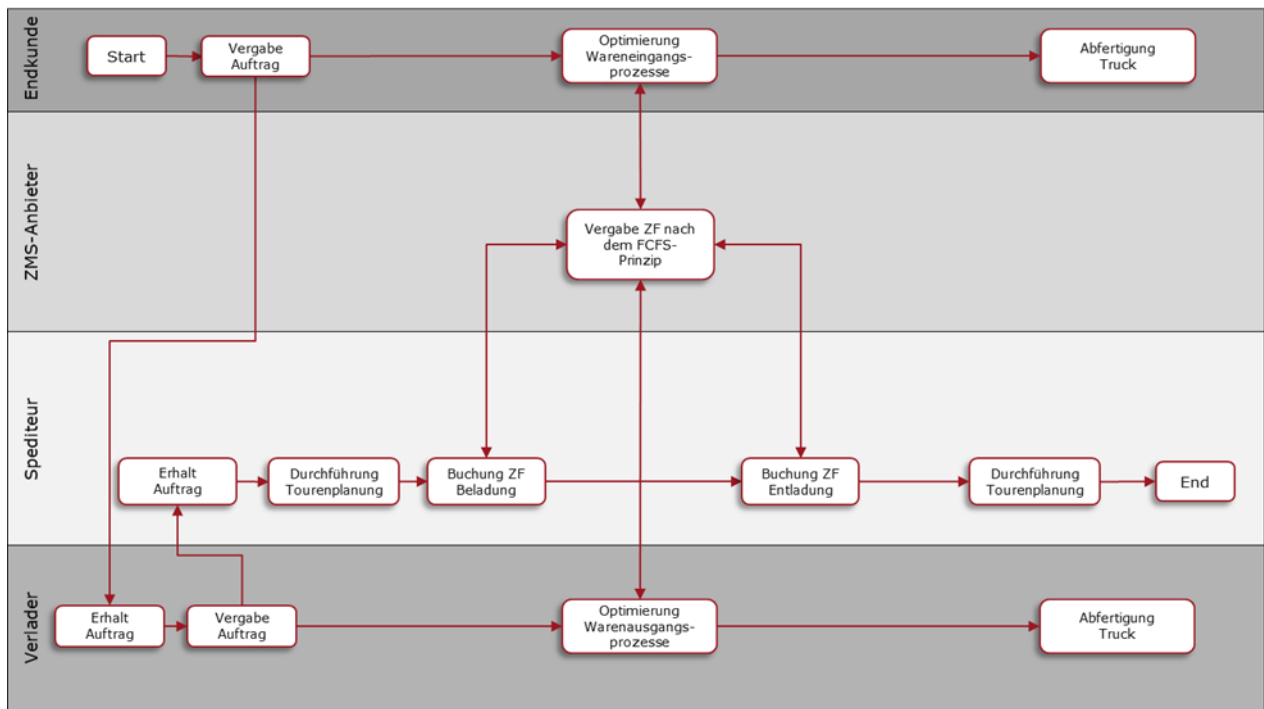


Abbildung 4: Modellierter Tourenplanungsprozess mit Zeitfensterrestriktionen (basierend auf (Elbert et al. 2018a; Elbert et al. 2018b))

Aufbauend auf dem eben beschriebenen Prozess, ist, unter Berücksichtigung der erarbeitenden Anforderungen, ein Prozess neugestaltet worden, der einen Tausch bzw. die Reallokation von ungünstigen Zeitfenstern mithilfe einer verdeckten Zweitpreisauktion mit Nebenzahlungen, auch Vickrey-Clarke-Groves Mechanismus genannt, ermöglicht (Ausubel & Milgrom 2006; Krishna 2009). Für das bessere Verständnis, soll auch hier der Prozess mit dem gleichen Beispiel eines Transportauftrages beschrieben werden.

Zunächst wird auch hier der Auftrag vom Endkunden, dem Lagerhausbetreiber, ausgelöst. Der Auftrag geht beim Verlader ein und die Produktion der Güter wird gestartet. Parallel wird auch hier ein Transportauftrag vom Verlader an eine Spedition vergeben. Mit dem Erhalt des Transportauftrages sowie der Auftragsnummer, startet das Unternehmen mit dem Dispositionsprozess. Wie bereits im ersten Prozess beschrieben, werden im ersten Schritt Zeitfenster nach dem FCFS-Prinzip beim Lagerhausbetreiber und Verlader gebucht werden. Passen die gebuchten Zeitfenster in die Tourenplanung, wird die Tour finalisiert und der Transport durchgeführt. Passt eines der gebuchten Zeitfenster nicht in die Tourenplanung, wird das ungünstige Zeitfenster für eine Plattform freigegeben, auf der die Zeitfenster dann mithilfe eines Algorithmus versteigert werden. Sollte es kein Zeitfenster geben, das besser in die Tourenplanung des Spediteurs passt, ist es wichtig, dass das angebotene Zeitfenster wieder von der Plattform genommen werden kann. Zur Bewertung der angebotenen Zeitfenster werden die Kosten für die Tourenplanung für die relevanten Zeitfenster berechnet und

gegenübergestellt. Ist ein besseres Zeitfenster verfügbar, wird das eigene Zeitfenster zur Versteigerung freigegeben, der Wert des zu ersteigernden Zeitfensters wird berechnet und ein Gebot abgegeben. Gewinnt der Spediteur die Auktion, erhält er das neue Zeitfenster, plant die Tour mit dem neuen Zeitfenster und führt die Tour durch. Nach Abschluss der Auktion erhalten zudem die Verlader und Lagerhausbetreiber Information über den Ausgang der Auktion und ordnen den Zeitfenstern die geeigneten Ressourcen zu. Dabei ist dieses Vorgehen sowohl für den Tausch an einer Laderampe als auch über mehrere Laderampen hinweg an einem Standort möglich.

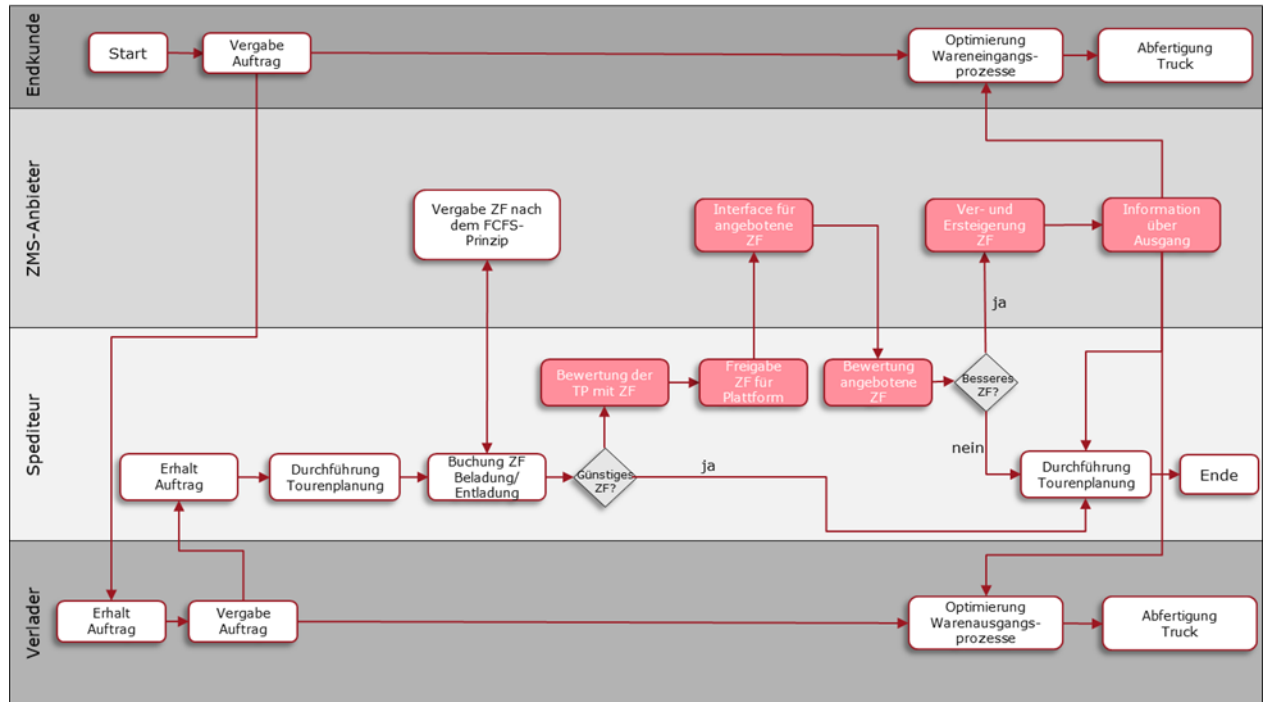


Abbildung 5: Modellierter Tourenplanungsprozess mit Mechanismus zur Reallokation von ungünstigen Zeitfenster

Zur Verifikation und Validierung der modellierten vorgestellten Tourenplanungsprozesse mit und ohne Mechanismus zur Reallokation von ungünstigen Zeitfenster wurden drei Experteninterviews mit zwei Anbietern von Zeitfenstermanagementsystemen, einem Verlader sowie einer Spedition durchgeführt. Gestellt wurden in den durchgeführten Interviews Fragen zu folgenden Blöcken:

- Verifizierung des modellierten Tourenplanungsprozesses ohne Tauschmechanismus
- Validierung und Verifizierung des modellierten Tourenplanungsprozesses mit Tauschmechanismus
- Anforderungsanalyse Tauschmechanismus

Der Interviewleitfaden befindet sich im Anhang.

2.2 Arbeitspaket 2 – Ermittlung der Tauschbereitschaft von Zeitfenstern

Ziele: Das Ziel dieses Arbeitspaketes ist es, die subjektive Tauschbereitschaft von Spediteuren zu quantifizieren. Dafür werden insbesondere nutzensteigernde sowie nutzenmindernde Wirkungen herausgearbeitet und die Wertigkeit eines Zeitfenster festgestellt.

Vorgehen: Zur Erarbeitung der Wertigkeit eines Zeitfensters wurde, aufbauend auf der Anforderungsanalyse aus Arbeitspaket 1, eine Literaturrecherche im Bereich von Tourenplanungsproblemen mit Zeitfenstern durchgeführt. Dabei wurden insbesondere wissenschaftliche Arbeiten zu Vehicle Routing Problems with Time Windows (VRPTW) als auch Pickup and Delivery Problems with Time Windows (PDPTW) betrachtet.

Ergebnisse: Für die Ermittlung der Tauschbereitschaft ist insbesondere von Interesse, welchen subjektiven Nutzen ein einzelnes Zeitfenster für den jeweiligen Spediteur hat. Um dies zu untersuchen, wurden, aufbauend auf den Ergebnissen der Anforderungsanalyse, Literaturrecherchen durchgeführt. Betrachtet wurde hierbei insbesondere die Wertigkeit von Zeitfenstern im Kontext von Tourenplanungsproblemen mit Zeitfensterrestriktionen, bei denen sowohl die Abholung des Gutes bei einer Quelle als auch die Auslieferung des Gutes bei der Senke berücksichtigt werden. Man, spricht auch von Pickup and Delivery Problems with Time Windows. Allerdings kann die entwickelte Idee auch relativ einfach auf Probleme übertragen werden, die sich nur auf die Auslieferung von Gütern beschränken (VRPTW) oder bei denen es um die Betrachtung von Rundreisen geht und Zeitfensterrestriktionen beachtet werden müssen (TSPTW).

Betrachtet man den Wert bzw. den Nutzen eines einzelnen Zeitfensters im Kontext einer Tourenplanung, bei dem mehrere Quellen und Senken mit Zeitfensterrestriktionen angefahren werden müssen, ergibt sich der Nutzen eines einzelnen Zeitfensters aus der Menge aller Zeitfenster, die für diese Tour gebucht wurden. Passt ein Zeitfenster nicht optimal in die Tour, müssen Umwege gefahren werden, die für die Spedition zusätzliche Kosten erzeugen und einen zusätzlichen Ausstoß von Emission bedeuten (siehe Abbildung 6 linke Seite). Passt ein alternatives auf der Plattform angebotenes Zeitfenster in die aktuelle Tourenplanung und können durch den Tausch Umwege und die daraus resultierende Kosten und Emission eingespart werden (siehe Abbildung 6 rechte Seite), kann diesem Zeitfenster der Wert bzw. der Nutzen der Einsparung zugeordnet werden.

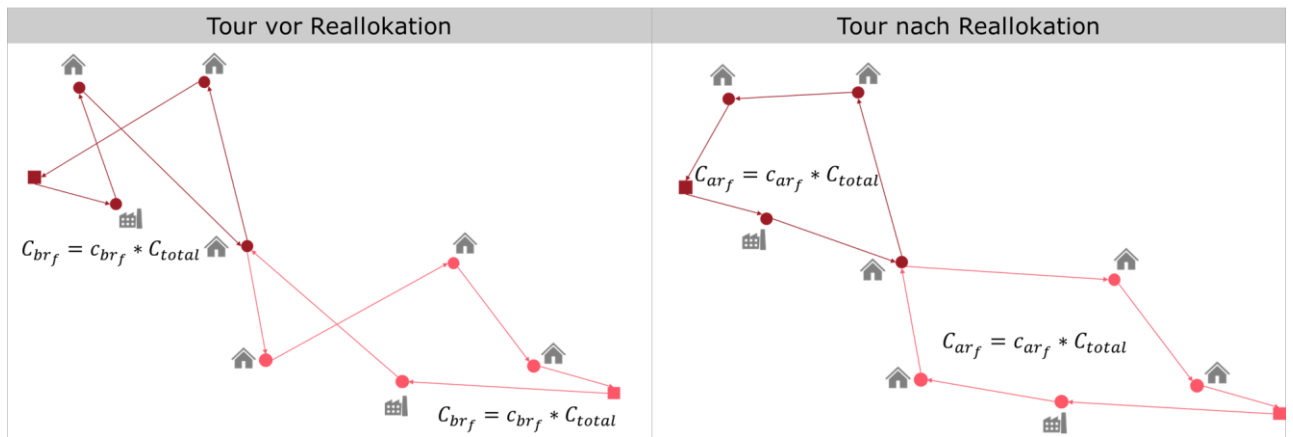


Abbildung 6: Tourenplanung vor (links) und nach (rechts) der Reallokation von ungünstigen Zeitfenster

Der Wert eines Zeitfensters v_i kann somit direkt ermittelt werden, indem die Kosten für eine Tour nach der Reallokation eines Zeitfensters von den Kosten für eine Tour vor dem Reallokation subtrahiert werden.

$$v_i = \sum C_{br_i} - \sum C_{ar_i} \quad (1)$$

C_{br_i} = Kosten vor der Reallokation

C_{ar_i} = Kosten nach der Reallokation

Die Kosten sind dabei insbesondere abhängig von der zufahrenden Distanz und setzen sich zusammen aus den Kosten für den Fahrer C_{dr} , Kosten für Kraftstoff und Schmiermittel C_{fl} , kalkulatorischen Abschreibungskosten C_{dep} , Reifenkosten C_{tire} sowie Mautkosten C_{toll} . Die Bereitschaft der Spediteure, einzelne Zeitfenster zu tauschen, hängt somit direkt damit zusammen, wie hoch die realisierbaren Kosteneinsparungen für eine Tour ausfallen.

2.3 Arbeitspaket 3 – Entwicklung von Tauschmechanismen

Ziele: Herauszuarbeiten, welcher Mechanismus sich für die Reallokation von ungünstigen Zeitfenstern eignet und welche Modelltheoretischen Implikationen sich daraus ergeben, war Ziel des dritten Arbeitspakets.

Vorgehen: Zur Auswahl eines geeigneten Mechanismus, wurden Recherchen im Bereich der Mechanismus Design Theorie, Auktionstheorie sowie der nicht-kooperativen Spieltheorie durchgeführt. Dabei wurde insbesondere Wert daraufgelegt, einen Mechanismus zu finden, der eine hohe Allokationseffizienz besitzt und die Anforderungen erfüllt, die im ersten Arbeitspaket formuliert wurden.

Ergebnisse: Bevor die Ergebnisse vorgestellt werden, soll kurz zum besseren Verständnis auf die theoretischen Grundlagen der Mechanismus Design Theorie eingegangen werden. Sie lässt sich einordnen in das Forschungsgebiet der nicht-kooperativen Spieltheorie und kann beschrieben werden als ein Spiel, bei dem ein Planer, in unserem Kontext der Betreiber einer digitalen Plattform, ein Spiel bzw. ein Mechanismus so designt, sodass ein gewünschter Spielausgang eintritt (Grüner 2008 S.19 ff). Fasst man eine Auktion als Spiel auf und geht davon aus, dass alle Spieler (hier Spediteure) einen strategischen Anreiz haben, den Wert für ein zu ersteigerndes Objekt (hier Zeitfenster) so anzugeben, dass der eigene Nutzen maximiert wird, kann ein Mechanismus vom Betreiber der Plattform gestaltet bzw. gewählt werden, der den Gesamtnutzen aller Spediteure maximiert. Eine weitere Möglichkeit einen Mechanismus zu gestalten bzw. zu wählen, besteht beispielsweise darin, dass der Nutzen des Plattformbetreibers maximiert wird. Im weiteren Verlauf dieses Projektes soll die Maximierung des Nutzens aller beteiligter Spediteure im Vordergrund stehen. Abbildung 7 zeigt den Ablauf eines Mechanismus.

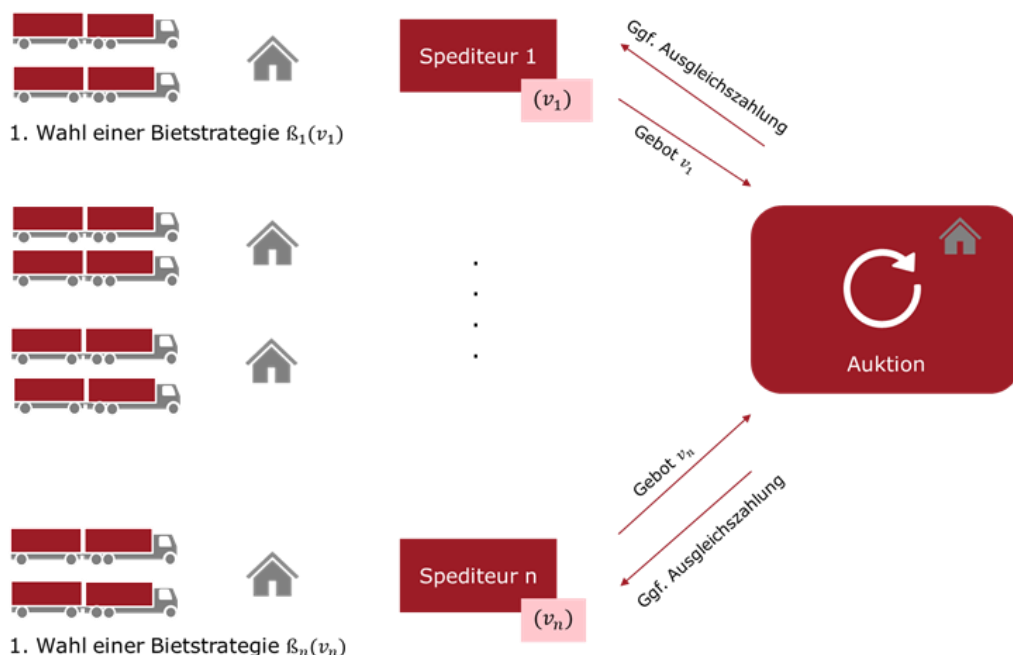


Abbildung 7: Ablauf der Generierung von Geboten für Zeitfenster bei einem VCG-Mechanismus (basierend auf (Steimle 2008, S. 19))

Ausgewählt wurde für dieses Projekt der sogenannte Vickrey-Clarke-Groves (VCG) Mechanismus, der das Potential besitzt, gleichzeitig ein effizienter, anreizkompatibler, (ex-post) individuell rationaler Mechanismus zu sein der zusätzlich ein schwaches Budgetgleichgewicht aufweist. Als effizient gilt ein Mechanismus, wenn er eine effiziente Allokationsregel besitzt. Daher es gewinnt derjenige Spediteur (Bieter) die Auktion, der für ein Zeitfenster das höchste Gebot abgegeben hat (Krishna 2009 S.75 ff.). Die Grundlage des VCG-Mechanismus bildet die verdeckte Zweitpreisauktion die auch als Vickrey-Auktion bezeichnet wird (Ausubel und Milgrom 2006). Dieses Auktionsformat ist sehr nützlich, da es für die beteiligten Spediteure eine schwach dominante Strategie darstellt, den wahren Wert für ein Zeitfenster zu bieten. Bedeutet, dass der VCG-Mechanismus die Auszahlung des Spediteurs maximiert, falls er wahrheitsgemäß bietet. Somit ist die Anforderung erfüllt, dass der Mechanismus anreizkompatibel ist. Die Entscheidung eines einzelnen Spediteurs, an dem Mechanismus teilzunehmen, ist entscheidend, um eine hohes Verbesserungspotential für alle Spediteure zu erreichen. Daher ist die individuelle Rationalität eine weitere wichtige Eigenschaft, die der Mechanismus haben sollte. Dies ist der Fall, wenn der teilnehmende Spediteur bzw. Bieter jederzeit mindestens eine Gleichgewichtsauszahlung von Null hat. Daher der Spediteur stellt sich besser, wenn er sich am Mechanismus beteiligt. Um außerdem sicherzustellen, dass der Plattformbetreiber als Auktionator einen Gewinn mithilfe des Mechanismus erzielt, sollte dieser ein schwaches Budgetgleichgewicht aufweisen. Somit ist am Ende der Auktion die Summe aller Zahlungen größer als Null, und es wird ein Überschuss erwartet (Krishna 2009).

Um den VCG-Mechanismus einzuführen, wird zunächst die Allokationsregel mit einer Menge von möglichen Allokationen A betrachtet. Es wird angenommen, dass die wahren Bewertungen $v \in V$ der Spediteure auf einem Intervall $v_f = [\rho_f, \gamma_f] \subset \mathbb{R}$ liegen und dass negative Werte $\rho_f < 0$ möglich sind. Mit einer effizienten Allokationsregel $q^*: V \rightarrow A$ wird dann die soziale Wohlfahrt maximiert.

$$q^*(v) \in \arg \max_{q \in A} \sum_{f \in F} q_f x_f \quad (2)$$

Gleichung (3) zeigt nun die Regel mit der die soziale Wohlfahrt maximiert wird, falls Spediteur i mit $i \in F$ an der Auktion teilnimmt.

$$w(v) \equiv \sum_{f \in F} q_f^*(v) x_f \quad (3)$$

Gleichung (4) hingegen, maximiert die soziale Wohlfahrt der anderen Spediteure, falls Spediteur i nicht an der Auktion teilnimmt.

$$w_{-i}(v) \equiv \sum_{f \neq i} q_f^*(v) x_f \quad (4)$$

Der VCG Mechanismus $M^{VCG} = (q^*, m^{VCG})$ mit der Zahlungsregel $m^{VCG}: V \rightarrow \mathbb{R}$ ist dann ein effizienter Mechanismus falls die folgende Zahlungsregel gilt:

$$m^{VCG} = w(\rho_i, v_{-i}) - w_{-i}(v) \quad (5)$$

Weiter erfüllt der VCG Mechanismus, die in den Anforderungen gestellten Eigenschaften der Anreizkompatibilität, (ex-post) individuellen Rationalität sowie der (ex-post) schwachen Budgetausgeglichenheit. Weil die Auktion der Zeitfenster s nach der offiziellen Vergabe nach dem FCFS-Prinzip stattfindet, kurz bevor die Zeitfenster eingefroren werden und nur Zeitfenster versteigert werden, die nicht in die aktuelle Tourenplanung passen, kann eine Pareto Verbesserung aller beteiligten Akteure erreicht werden. Es wird weiter angenommen, dass keine negative Externalitäten für die beteiligten Akteure entstehen. Unter der Annahme, dass der Mechanismus keine zusätzlichen Kosten $\rho_f = 0$ für die beteiligten Akteure verursacht und $v_i \geq \max_{f \neq i} v_f$ gilt, erhalten wir folgende endgültige Zahlungsregel:

$$m_i^{VCG} = w_{-i}(0, v_{-i}) - w_{-i}(v) \quad (6)$$

Mit diesen Annahmen kann die Zahlung des Gewinners m_i^{VCG} mit dem zweithöchsten Gebot gleichgesetzt werden. Dies impliziert, dass es für die teilnehmenden Spediteure wie in der verdeckten Zweitpreisauktion eine schwach dominante Strategie darstellt, den wahren Wert des Zeitfensters in der Auktion preiszugeben (Krishna 2009). Falls der Mechanismus weiter die

Eigenschaft besitzt, dass der Auktionator bzw. Betreiber des Mechanismus einen Profit aus dem Betrieb des Mechanismus erzielen kann, so besitzt der Mechanismus die Eigenschaft der (ex-post) schwachen Budget Ausgeglichenheit. In dem Spezialfall das ausschließlich ein Spediteur an der Auktion teilnimmt, entspricht der Wert für das zweithöchste Gebot, dem Mindestprofit des Auktionators.

2.4 Arbeitspaket 4 – Akteursübergreifende Simulation der Tauschbörse

Ziele: Ziel dieses Arbeitspaketes ist es, ein akteursübergreifendes Modell zu entwickeln, indem die Wirkungen eines Tausches bzw. der Reallokation von ungünstigen Zeitfenstern auf die Tourenplanung von Spediteuren untersucht wird.

Vorgehen: Basierend auf den in Arbeitspaket 1 modellierten Prozessen, wurde ein agentenbasiertes Simulationsmodell mithilfe der Simulationssoftware AnyLogic erstellt und mit einem exakten Optimierungsverfahren, dem Branch-and-Cut (B&C) Algorithmus kombiniert. Der B&C Algorithmus wird hierbei dazu genutzt, den Wert eines Zeitfensters zu ermitteln. Um das beste Gebot am Ende auszuwählen, wird ein Winner Determination Problem (WDP) gelöst. Zur Lösung der Optimierungsverfahren wurde eine IBM®ILOG CPLEX 12.6.2 (IBM ILOG CPLEX Optimization Studio 22.1.0) API in AnyLogic integriert. Die Zahlungen für den Plattformbetreiber und die Höhe der möglichen Nebenzahlungen für die Spediteure werden mithilfe der Zahlungsregel aus Arbeitspaket 3 ermittelt.

Ergebnisse: In Arbeitspaket 4 werden der Aufbau des Simulations- sowie des Optimierungsmodells dargestellt und die zentralen Forschungsergebnisse vorgestellt. Der Ablauf des Modells kann im Flussdiagramm in Abbildung 8 nachvollzogen werden. Der Grobverlauf wird einmal vorgestellt, bevor im Detail auf die einzelnen verwendeten Algorithmen eingegangen wird. Im Modell gibt es vier Agenten die jeweils einen Spediteur repräsentieren. Vier Agentenpopulationen mit deren Hilfe die Kunden der vier Spediteure sowie die Endkunden erzeugt werden. Weiter gibt es einen Agenten, der den Betreiber der digitalen Plattform repräsentiert und auf dem die Auktion durchgeführt wird. Innerhalb der Agenten, welche die Spediteure repräsentieren, werden die Netzwerke sowie die Gebote für die Auktion von den einzelnen Spediteuren erzeugt. Zur Berechnung der Gebote im Agenten wird der implementierte B&C Algorithmus genutzt. Im Agenten der digitalen Plattform, wird ein WDP gelöst und das beste Gebot ausgewählt.

Zu Beginn des Modells werden, wie in Abbildung 8 dargestellt, für jeden Spediteur $f \in F$, basierend auf einer literaturbasierten Instanz die Knoten des Netzwerks mithilfe von Algorithmus 1 generiert sowie eine Distanzmatrix mit Algorithmus 2 für die jeweilige Instanz erzeugt. Nach Generierung der Knoten und der Distanzmatrix des Netzwerks werden mithilfe des B&C Algorithmus für jeden Spediteur die kürzesten Touren berechnet, indem ein Pickup and Delivery Problem with Time Windows (PDPTW) gelöst wird. Anschließend werden mithilfe von Algorithmus 3 die Kanten im Simulationsmodell erzeugt. Nach diesem Schritt wird ein vollständiges Netzwerk mit Knoten und Kanten im Simulationsmodell angezeigt.

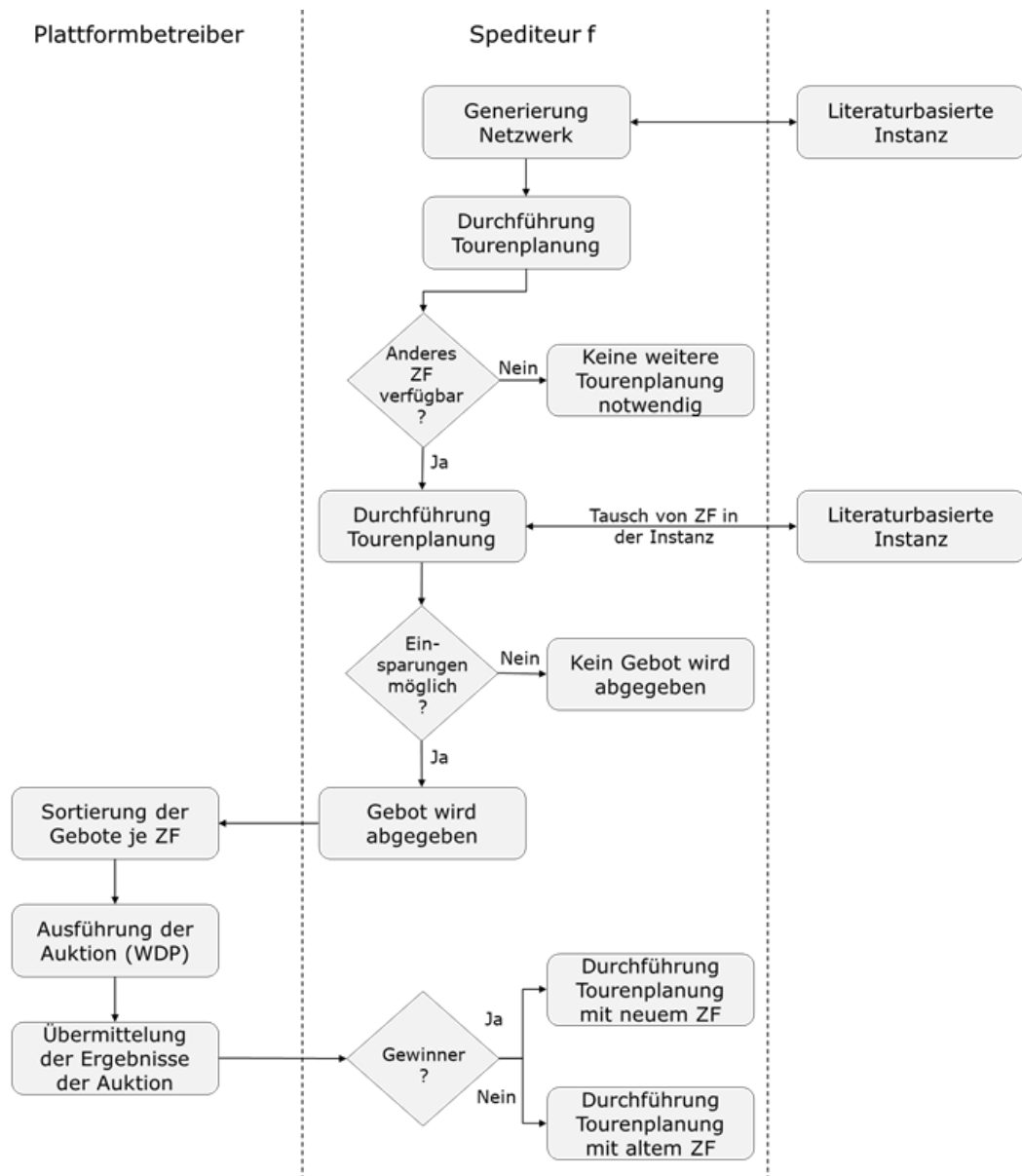


Abbildung 8: Beschreibung des Ablaufes des Simulationsmodells

Weiter wird dann Algorithmus 4 genutzt, um zu überprüfen, ob auf der Plattform ein verfügbares Zeitfenster existiert, das in die eigene Tourenplanung passt. Ist dies nicht der Fall, wird die bereits berechnete Tour weiter genutzt. Ist jedoch ein anderes Zeitfenster verfügbar, das in die eigene Tourenplanung passt, werden die Zeitfenster in der Instanz ausgetauscht und erneut ein PDPTW gelöst sowie mithilfe von Formel (1) der Wert des verfügbaren Zeitfensters berechnet. Handelt es sich um ein Zeitfenster bei dem Kosten eingespart werden können, wird ein Gebot in Höhe der Kosteneinsparungen abgegeben und beim Plattformbetreiber eingereicht. Im Agenten des Plattformbetreiber werden dann die Gebote für jedes Zeitfenster sortiert, es wird ein WDP gelöst und somit die Gewinner für jede Auktion bestimmt. Nach Ausgang der Auktion werden die Zeitfenster den Spediteuren zugewiesen. Am Schluss wird der zu zahlende Betrag in Höhe des zweiten Gebots, an den Plattformbetreiber überwiesen.

2.4.1 Generierung der Netzwerkknoten sowie Erzeugung Distanzmatrix

Um nun stärker in die Modellierung einzusteigen, sollen in einem ersten Schritt die Algorithmen zur Erzeugung der Netzwerkknoten sowie der Distanzmatrix beschrieben werden. Als Input für die Erzeugung der Knoten für jeden Spediteur dienen literaturbasierte Instanzen von (Li & Lim 2001). Grundlage für den von uns entwickelten und in diesem Abschnitt vorgestellten Algorithmus, bildet der Algorithmus von (Leyton-Brown et al. 2000) der von (Elbert et al. 2020) weiterentwickelt und in diesem Projekt für unser Problem angepasst wurde.

Starten tut der Algorithmus mit der Erzeugung der Knoten des Netzwerkes. Sie werden mithilfe einer Agentenpopulation in AnyLogic erzeugt. Zunächst werden hierfür jedem Agenten in der Agentenpopulation, einzeln, die Informationen zu den kartesischen Standortdaten sowie zum Typ des Knotens (Verlader, Kunde, Depot) zugewiesen. Anschließend werden die Agenten mithilfe einer if-else-Abfrage sowie der Typangabe mit entsprechender Grafik im Modell bzw. im jeweiligen Agenten sichtbar geschaltet. Dabei wird dem Kunden als Grafik ein Kaufhaus zugewiesen, dem Verlader eine Fabrik sowie dem Spediteur eine Lagerhalle. Das Kaufhaus das dem Kunden als Grafik zugewiesen wird, kann allerdings ebenfalls als Lager aufgefasst werden. Hier wird modelltechnisch keine Abgrenzung vorgenommen, da es sich bei beiden Knoten um eine Senke handeln kann. Zum Schluss werden die Informationen über Typ und Nummer des Agenten innerhalb der Agentenpopulation an den Main-Agenten gesendet und dort veröffentlicht, sodass die Grafik an dem zugewiesenen Standort mit der zugewiesenen Grafik auf dem Main-Agenten sichtbar wird.

Algorithmus 1: Agentenbasierte Generierung von Knoten eines Netzwerks

input: Kleine Instanz basierend auf Instanzen von Li&Lim für PDPTW, Menge aller Knoten N in der Instanz

output: Erzeugte Knoten des Netzwerks basierend auf einer Agentenpopulation

```
1: for  $i = 0$  to  $N - 1$  do
2:   set Standort der Knoten;
3:   set Typ des Knoten;
4:   if Typ = Verlader then
5:     set Abbildung eines Warehaus nicht sichtbar;
6:     set Abbildung eines Kaufhauses nicht sichtbar;
7:     set Abbildung einer Fabrik sichtbar;
8:   else if Typ = Kunde then
9:     set Abbildung eines Warehaus nicht sichtbar;
10:    set Abbildung eines Kaufhauses sichtbar;
11:    set Abbildung einer Fabrik nicht sichtbar;
12:   else if Typ = Depot then
13:     set Abbildung eines Warenhauses sichtbar;
14:     set Abbildung eines Kaufhauses nicht sichtbar;
15:     set Abbildung einer Fabrik nicht sichtbar;
16:   end if
17:   send (typ, Nummer Agent in Agentenpopulation in Netzwerk); Informationen werden an Main Agenten gesendet
18: end for
```

Mit den Standortdaten der erzeugten Knoten, kann anschließend mithilfe von Algorithmus 2, für jede zu fahrende Tour der vier Spediteure eine Distanzmatrix erzeugt werden. Hierfür werden, unter zur Hilfenahme der von AnyLogic angebotenen Funktion `distanceTo()` die Distanzen zwischen den einzelnen Knoten berechnet und jede Zeile der Distanzmatrix einzeln beschrieben. Um zudem die Nutzung von Distanzen zwischen den gleichen Knoten zu verbieten, wird diesen Distanzen ein Wert von 999999 zugewiesen. Am Ende des Algorithmus wird die Tourenplanung gestartet.

Algorithmus 2: Generierung einer Distanzmatrix

input: Menge aller erzeugten Knoten K der Instanz, Standortdaten der erzeugten Knoten K

output: Distanzmatrix für eine Instanz (bzw. erzeugte Agentenpopulation)

```
1: for  $i = 0$  to  $K - 1$  do
2:   for  $j = 0$  to  $K - 1$  do
3:     if  $j \neq i$  then
4:       distance[i][j] = standortErzeugterKnoten(i).distanceTo(standortErzeugterKnoten(j));
5:     else if  $j = i$  then
6:       distance[i][j] = 999999
7:     end if
8:   end for
9: end for
10: durchführungTourenplanung(); Das Optimierungsmodell wird aufgerufen, um die Kürzeste Wege zu bestimmen.
```

2.4.2 Lösung des PDPTW und Generierung Kanten

Die Berechnung der Touren und die Erzeugung der Kanten erfolgt im nächsten Schritt mithilfe des dritten Algorithmus. Als Input dienen dabei die erzeugte Distanzmatrix, die aktuell gebuchten Zeitfenster, die Servicezeit sowie die Nachfrage pro Knoten. Allen Daten werden dabei aus den bereits beschriebenen Instanzen entnommen.

Algorithmus 3: Durchführung Tourenplanung

input: Distanzen c_{ij} aus erzeugter Distanzmatrix, Aus Instanz: Aktuelle Zeitfenster $[e_i; l_i]$ pro Knoten, Servicezeiten d_i pro Knoten; Nachfrage q_i pro Knoten,

output: Erzeugte Kanten basierende auf den kürzesten Distanzen

```

1: for  $i = 0$  to  $N$  do
2:   set  $e[i]$ 
3:   set  $l[i]$ 
4:   set  $d[i]$ 
5:   set  $q[i]$ 
6 end for
7: for  $i = 0$  to  $N$  do
8:   for  $j = 0$  to  $N$  do
9:     set  $c[i][j] = \text{distance}[i][j]$ 
10:    set  $t[i][j] = \text{distance}[i][j]$ 
11:   end for
12: end for
12: Initialisierung aller benötigten Parameter in Cplex ( $e[i]$ ,  $l[i]$ ,  $q[i]$ ,  $Q[i]$ , etc.)
13:  $\min \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} c_{ij} x_{ij}$ ; Minimierung der Distanzen eines PDPTW (Modell siehe unten)
14: for  $i = 0$  to  $N$  do
15:   for  $j = 0$  to  $N$  do
16:     set  $\text{distanceOpt}[i][j]$ ; Die optimale Lösung des B&C Algorithmus wird in einer neuen Distanzmatrix festgehalten
17:   end for
18: end for
19: Erzeugung der Kanten in AnyLogic basierend auf  $\text{distanceOpt}[i][j]$ 

```

Die Tourenplanung erfolgt dann mithilfe von Cplex. Zur Lösung der Tourenplanungsprobleme bzw. PDPTWs vor und nach der Reallokation von Zeitfenstern wurde in der java-basierten Umgebung von AnyLogic auf der Ebene des Spediteur-Agenten ein B&C-Algorithmus implementiert, der von Ropke et al (2007) entwickelt wurde. Das PDPTW basiert hierbei auf einem direkten Graph $G = (N, A)$ bei dem N die Menge von Knoten $\{0 \dots 2n + 1\}$, A die Menge von Kanten und n die Anzahl der Aufträge repräsentiert. Das Depot des Spediteurs wird durch den Starknoten 0 und den Endknoten $2n + 1$ abgebildet. Die Menge von Pickup Knoten werden durch $P = \{1 \dots n\}$ repräsentiert und die Menge von Knoten die eine Senke abbilden durch $D = \{n + 1 \dots 2n\}$ repräsentiert. Für beide gilt das $P, D \subset N$.

An jedem Knoten $i \in N$ muss der Truck eine Menge von Gütern $q_i \geq 0$ mit $i \in P$ entweder aufladen oder falls es sich um eine Senke handelt, eine Menge von Gütern $-q_i$ mit $i \in D$, in einer vorgegebenen Servicezeit $d_i \geq 0$, abladen. Zur Erfüllung der Aufträge, stehen den Spediteuren eine unbegrenzte Anzahl an Lkw mit einer maximalen Ladekapazität von Q zur Verfügung. Die Distanzen jeder Kante $(i, j) \in A$ werden als Kosten c_{ij} für jede Tour angenommen und die Reisezeit entlang jeder Kante als t_{ij} . Zur Vereinfachung wird dabei angenommen, dass die Reisezeit der Distanz entspricht $c_{ij} = t_{ij}$. An jeden Knoten $i \in P \cup D$ muss ein Zeitfenster zur An- bzw. Auslieferung $[e_i, l_i]$ berücksichtigt werden, bei dem e_i die früheste mögliche und l_i späteste mögliche Anlieferungszeit repräsentieren. Die Zeitfenster am Depot $[e_0, l_0]$ and $[e_{2n+1}, l_{2n+1}]$ repräsentieren in unserem Modell den Beginn und das Ende der Arbeitszeit der Lkw-Fahrer. Zusätzlich gilt für das Depot $q_0 = q_{2n+1} = 0$ und $d_0 = d_{2n+1} = 0$. Für die binäre Variable x_{ij} gilt, dass $x_{ij} = 1$ falls ein Lkw entlang einer Kante $(i, j) \in A$ reist und $x_{ij} = 0$ falls nicht. Mit der Variable Q_i wird die aktuelle Kapazität des Lkws abgebildet, wenn der Lkw die Laderampe von Knoten i verlässt. Die Variable B_i gibt die Zeit an, zu der die Be- bzw. Entladung des Lkws an der Laderampe des Knoten i startet. Für beide Variablen B_i und Q_i gilt zudem das $i \in P \cup D$.

$$\min \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} c_{ij} x_{ij} \quad (7)$$

unter den Nebenbedingungen

$$\sum_{i \in N} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in P \cup D \quad (8)$$

$$\sum_{j \in N} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in P \cup D \quad (9)$$

$$e_i \leq B_i \leq l_i \quad \forall i \in N \quad (10)$$

$$B_j \geq B_i + d_i + t_{ij} - M_{ij}(1 - x_{ij}) + (M_{ij} - d_i - t_{ij} - \max\{d_i + t_{ij}, e_i - l_i\})x_{ij} \quad \forall i, j \in N \quad (11)$$

$$\max\{0, q_i\} \leq Q_i \leq \min\{Q, Q + q_i\} \quad \forall i, j \in N \quad (12)$$

$$Q_j \geq Q_i + q_j - W_{ij}(1 - x_{ij}) + (W_{ij} - q_i - q_j)x_{ji} \quad \forall i, j \in N \quad (13)$$

$$B_i \geq e_i + \sum_{j \in P \cup D \setminus \{i\}} \max\{0, e_j - e_i + d_i + t_{ij}\} x_{ji} \quad \forall i \in P \cup D \quad (14)$$

$$B_i \leq l_i - \sum_{j \in P \cup D \setminus \{i\}} \max\{0, l_i - l_j + d_i + t_{ij}\} x_{ij} \quad \forall i \in P \cup D \quad (15)$$

$$Q_i \geq \max\{0, q_i\} + \sum_{j \in N \setminus \{i\}} \max\{0, q_j\} x_{ji} \quad \forall i \in N \quad (1)$$

$$Q_i \leq \min\{Q, Q + q_i\} - (Q - \max_{j \in N \setminus \{i\}}\{q_j\} - q_i)x_{0i} - \sum_{j \in N \setminus \{i\}} \max\{0, q_j\} x_{ij} \quad \forall i \in N \quad (2)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad (3)$$

Mit der Zielfunktion (7), werden dann die Transportkosten minimiert. Die Nebenbedingungen (8) und (9) werden eingeführt, um zu garantieren, dass jeder Knoten nur einmal besucht wird. Die Nebenbedingungen (10) und (11) stellen sicher, dass keine Zeitfensterrestriktionen verletzt werden und das keine Subtouren gebildet werden. Die Gleichungen (12) und (13) stellen sicher, dass die Kapazität des Lkws nicht überschritten wird während der Tour. Um die Validität von Gleichung (14) und (15) zu garantieren, muss die Variable M_{ij} so bestimmt werden, dass $M_{ij} \geq \max\{0, l_i + d_i + t_{ij} - e_j\}$ und W_{ij} bestimmt wird mit $W_{ij} \geq \max\{Q, Q + q_i\}$. Die Nebenbedingungen (14) und (15) stärken zudem die Bedingung, dass die Spediteure die Zeitfensterrestriktionen während der Tourenplanung einhalten. Weiter stärken die Nebenbedingung (16) und (17) die Bedingung, dass die Kapazität des Lkw während der Tourenplanung nicht überschritten wird.

Mithilfe des eben vorgestellten Modells, werden dann die kürzesten Touren für die vier Spediteure im Modell berechnet. Zum Schluss werden die ermittelten Kanten im Simulationsmodell erzeugt.

2.4.3 Generierung und Auswahl der Gebote

Nach dem das Optimierungsmodell zur Berechnung der PDPTW eingeführt wurde, ist es nun möglich, den Wert eines Gebotes v_f für ein individuelles Zeitfensters bzw. innerhalb der Tourenplanung eines Spediteurs zu bestimmen. Hierfür müssen, wie bereits beschrieben, die Kosten der Tourenplanung mit dem neuen zu ersteigernden Zeitfenster c_{ar_f} berechnet werden und von den Kosten der Tour c_{br_f} mit dem aktuellen gebuchten Zeitfenster abgezogen werden. Anschließend wird der Wert mit den totalen Kosten C_{total} multipliziert und das Gebot bestimmt. Gleichung (19) zeigt, wie das Gebot für ein Zeitfenster innerhalb der Tourenplanung berechnet wird.

$$v_f = C_{br_f} - C_{ar_f} = (C_{br_f} - C_{ar_f}) * C_{total} =$$

$$\left(\left(\min \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} c_{ij} x_{ij} \right)_{br_f} - \left(\min \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} c_{ij} x_{ij} \right)_{ar_f} \right) * C_{total} \quad \forall f \in F \quad (4)$$

Die Transportkosten aus Gleichung (5) setzen sich dabei aus Kosten für Treib- sowie Schmierstoff C_{fl} , Personal bzw. Kosten für den Fahrer C_{dr} , Abnutzung- C_{tire} , Maut- C_{toll} und kalkulatorischen Abschreibungskosten zusammen.

$$C_{total} = C_{fl} + C_{dr} + C_{dept} + C_{tire} + C_{toll} \quad (6)$$

Im Anschluss an die Berechnung des Wertes des Gebotes, wird das Gebot an den Agenten übermittelt, der den Plattformbetreiber repräsentiert. Hier sind die angebotenen Zeitfenster

bereits bekannt und die eintreffenden Gebote, werden anschließend im Agenten pro Zeitfenster sortiert. Die Auswahl der Gebote bzw. die Formulierung des Allokationsproblems erfolgt dann mit der Lösung eines WDP für einzelne Zeitfenster, die von (Sandholm et al. 2002) entwickelt wurde. Zur Lösung des WDP besitzt der Auktionator bzw. der Betreiber der Plattform eine Menge von Zeitfenstern $s \in S = \{1 \dots |S|\}$, die für die Spediteure zu ungünstigen Touren geführt haben und deswegen zur Auktion freigegeben wurden. Falls jetzt ein angebotenes Zeitfenster für einen anderen Spediteur zu Verbesserungen führt, wird ein Gebot v_f an den Auktionator übermittelt. Der Auktionator erhält dann, wie bereits beschrieben, eine Menge von Geboten $B = \{B_1, B_2 \dots B_f\}$ von unterschiedlichen Spediteuren $f \in F$ für ein Zeitfenster. In diesem Zusammenhang, setzt sich das Gebot zusammen aus einem Tupel $B_f = \langle O_f, v_f \rangle$ bei dem $v_f \geq 0$ die Höhe des Gebotes für ein Zeitfenster repräsentiert und $O_f \subseteq S$.

$$\max \sum_{f \in F} v_f x_f \quad (21)$$

unter den Nebenbedingungen

$$\sum_{f | i \in O_f} x_f \leq 1 \quad \forall i \in S \quad (22)$$

$$x_f \in \{0,1\} \quad (23)$$

Mit der Zielfunktion (21), wird der Wert des abgegebenen Gebotes maximiert und so das höchste Gebot ausgewählt. Die Nebenbedingung (22) stellt sicher, dass ausschließlich ein Spediteur das zu versteigernde Zeitfenster erhält. Anschließend bekommen die Spediteure, die bei der Versteigerung gewonnen haben, das entsprechende Zeitfenster übermittelt, planen die Touren mit den gewonnen Zeitfenstern neu und führen den Transport aus.

2.4.4 Ergebnisanalyse

Zur Analyse, welche Verbesserungen durch die Reallokation ungünstiger Zeitfenster mithilfe der Integration eines VCG-Mechanismus erreicht werden können, werden die Transportkosten der vier Spediteure vor und nach der Durchführung der Auktion miteinander verglichen.

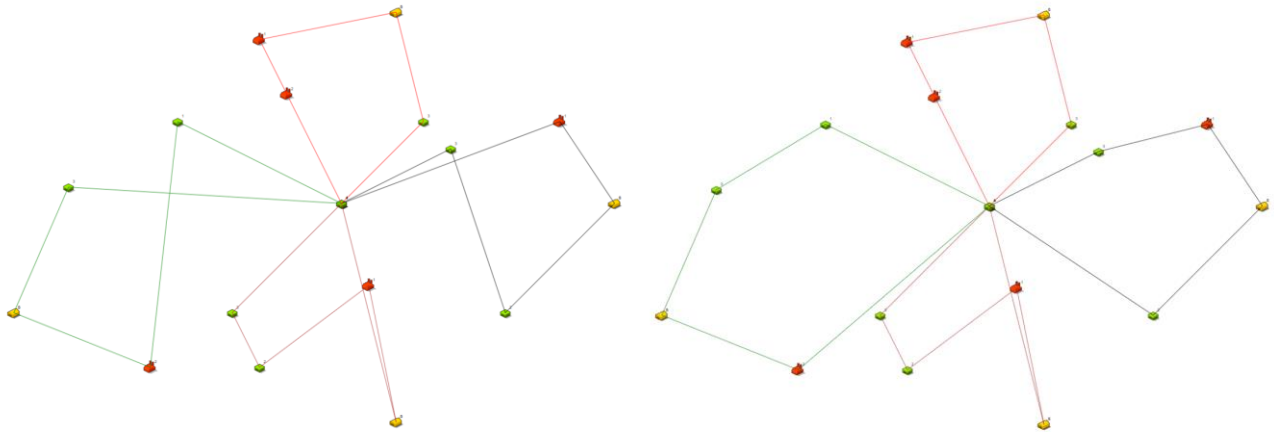


Abbildung 9: Tourenplanung im Modell vor (links) und nach (rechts) der Reallokation von ungünstigen Zeitfenster

Es kann gezeigt werden, dass mit der Reallokation einzelner ungünstiger Zeitfenster unter zur Hilfenahme des vorgestellten VCG-Mechanismus eine Pareto-Verbesserung für alle beteiligten Akteure erreicht werden kann. Abbildung 9 zeigt die Ergebnisse. Rechts ist das Depot von Spediteur eins zu sehen, links gegenüber Spediteur zwei, oben Spediteur drei und unten Spediteur vier. Jeder Spediteur berechnet die optimale Tour mit den gegebenen Einschränkungen. Es ist zu erkennen, dass nach der Berechnung der optimalen Touren mit dem B&C-Algorithmus vor allem bei den Spediteuren eins, zwei und vier aufgrund der gegebenen Zeitfensterrestriktionen vermeidbare Umwege gefahren werden müssen. Für Spediteur drei scheint die beste Lösung bereits gefunden worden zu sein. Des Weiteren ist zu erkennen, dass alle Spediteure am gleichen Tag ein Zeitfenster an der gleichen Laderampe beim Kunden vier gebucht haben. Somit wird eine Neuverteilung der Zeitfenster unter den vier Spediteuren durch den VCG-Mechanismus möglich. Rechts in der Abbildung 9 ist das Ergebnis nach der Reallokation zu erkennen. Die Spediteure eins und zwei können ihre Touren verkürzen. Für die Spediteure drei und vier bleiben die Touren identisch.

In Tabelle 2 sind die Ergebnisse des Modells quantitativ zusammengefasst. Es wird auch hier deutlich, dass Spediteur eins und zwei die Auktion gewinnen. Spediteur drei prüft ebenfalls, ob ein Gebot auf ein angebotenes Zeitfenster, dass alternativ in die Tourenplanung passen würde, abgegeben werden soll. Aufgrund des zu erwartenden Verlustes wird jedoch kein Gebot abgegeben.

Spediteur	Distanzen vor der Reallokation [km]	Distanzen nach der Reallokation [km]	Höhe des Gebotes [€]	Abgabe Gebot / Gewinner	Kosten-einsparungen [€]	Gewinn Betreiber [€]
1	143,02	125,34	27,74	Ja/Ja	22,74	5
2	180,91	154,97	40,73	Ja/Ja	26,43	14,30
3	100,86	119,78	-29,70	Nein/Nein	0	0
4	131,19	122,08	14,30	Ja/Nein	0	0

Tabelle 2: Ergebnisse des Simulationsmodells

Spediteur zwei und vier bieten auf dieselben Zeitfenster. Spediteur eins gibt das höchste Gebot ab, gewinnt die Auktion und muss für das gewonnene Zeitfenster einen Preis zahlen, das dem zweithöchsten Gebot entspricht. Also genau dem Wert, den Spediteur vier geboten hat. Spediteur eins gewinnt die Auktion ebenfalls. Hier ist das zweithöchste Gebot gleich dem Mindestpreis des Auktionators. Keiner der an der Auktion beteiligten Akteure wird schlechter gestellt. Die Spediteure eins und zwei erhöhen ihren Nutzen, da sie ihre Touren verkürzen und somit die Transportkosten senken können. Durch die Neuzuweisung ungünstiger Zeitfenster können, im betrachteten Modell, von den Auktionsgewinnern Einsparungen von durchschnittlich 13% bei den zufahrenden Touren erzielt werden. Der Auktionator macht bei der Versteigerung der beiden Zeitfenster einen Gewinn von 19,30 €. Zusammenfassend lässt sich also sagen, dass durch den Einsatz des einseitigen VCG-Mechanismus eine Pareto-Verbesserung für die direkt und indirekt an der Reallokation beteiligten Akteure erreicht werden kann.

2.5 Arbeitspaket 5 – Ableitung von Handlungsempfehlungen / Leitfaden

Ziele: Ziel dieses Arbeitspaketes ist es, basierend auf den gewonnenen Forschungsergebnissen, die wichtigsten Erkenntnissen herauszuarbeiten und praktische Handlungsempfehlungen für KMU Spediteure sowie ZMS-Anbieter abzuleiten und akteursspezifisch aufzubereiten.

Vorgehen: Zur Darstellung von akteursspezifischen Handlungsempfehlungen wurde der Nutzen einzelner Maßnahmen für KMU Spediteure sowie ZMS-Anbieter überprüft und zu den wichtigsten Handlungsempfehlungen zusammengefasst.

Ergebnisse:

Handlungsempfehlungen für ZMS-Anbieter

Anbieter von ZMS sollten bei der Umsetzung eines Tausches von ungünstigen Zeitfenstern eine zentrale Rolle spielen. Ihnen sollte der Betrieb des Mechanismus obliegen. Dabei können je nach Geschäftsmodell unterschiedliche Mechanismen für den Tausch von Zeitfenstern gewählt werden. Die Autoren empfehlen jedoch zunächst bei der Einführung eines Tausches, einen Mechanismus zu wählen, der eine hohe Allokationseffizienz besitzt und gleichzeitig die Eigenschaft der individuellen Rationalität erfüllt. Weiter wird empfohlen den Mechanismus so zu wählen, dass ein Gewinn mit dem Betrieb des Mechanismus erzielt werden kann und somit keine Subventionen von außen notwendig werden. Wird ein Mechanismus gewählt, der zu einer hohen Allokationseffizienz führt, besteht die Chance, ein systemweites Optimum unter unvollständigen Informationen zu erzielen. Denn hierdurch gewinnt der Spediteur die Auktion, bei dem ein Tausch des Zeitfensters zu den höchsten Einsparungen bei der zu fahrenden Tour führt.

Erfüllt der Mechanismus die Eigenschaft der individuellen Rationalität, ist es für den Spediteur immer vorteilhafter am Mechanismus teilzunehmen als nicht teilzunehmen. Dies sollte zur einer hohen Adoptionsrate führen und insbesondere für den First Mover zu einer Erzielung von hohen Marktanteilen. Zur Erreichung dieser Eigenschaft müssen bereits bei der Gestaltung des Prozesses einige Anforderungen beachtet werden. Beispielsweise führt die Verwendung eines VCG-Mechanismus zur nachträglichen Reallokation von ungünstigen Zeitfenstern zu einem erhöhten administrativen Aufwand für die beteiligten Spediteure, was zu einer Minderung des Nutzens führt. Daher sollte die Teilnahme am Mechanismus kostenfrei und freiwillig sein. Der hohe administrative Aufwand für Spediteure kann durch einen hohen Automatisierungsgrad reduziert werden. Daher alle Prozesse zur Gebotsbestimmung, zur Auswahl der Gebote sowie

der Informations- und Geldfluss sollten automatisiert werden. Wird ein Mechanismus gewählt, der als Basis eine Zweitpreisauktion beinhalten, sollte zudem darauf geachtet werden, dass, falls es nur einen Bieter gibt, ein Mindestpreis eingezogen wird, der die Kosten für den Betrieb des Mechanismus deckt.

Handlungsempfehlungen für Transportunternehmen

Die Teilnahme an einem Mechanismus bei dem ungünstige Zeitfenster getauscht werden können bzw. eine Reallokation ungünstiger Zeitfenster, die im Rahmen der Tourenplanung zu Umwegen führen, stattfindet, bietet für Transportunternehmen einige Vorteile. Umwege können durch eine nachträgliche Reallokation vermieden werden, was zu einer Einsparung von zu fahrenden Distanzen, Emissionen und Kosten führt. Die Teilnahme an einem Mechanismus sollte nur erfolgen, wenn die Kosteneinsparungen in der Tourenplanung die administrativen Kosten übersteigen. Hierbei sollte darauf geachtet werden, ob die Gebotsbestimmung im Rahmen der Tourenplanung automatisiert werden kann. Dies mindert den administrativen Aufwand für den Disponenten und führt gleichzeitig zu höheren Kosteneinsparungen. Ein weiterer Aspekt der beachtet werden sollte, ist, dass die rechtzeitige Auslieferung der Ware auch mit dem neuen Zeitfenster sichergestellt werden kann. Die Zahlung des Preises für ein Gebot, sollte ebenfalls in Kauf genommen werden, falls durch das neue Zeitfenster Kosteneinsparungen innerhalb der Tourenplanung realisiert werden können.

3. Verwendung der Zuwendungen

Die Projektbearbeitung erfolgte in den Jahren 2020 bis 2023 durch zwei wissenschaftliche Mitarbeiter:innen. Der wissenschaftliche Mitarbeiter Felix Roeper bearbeitete das Projekt im Jahr 2020 sechs Personenmonate zu 100 %, im Jahr 2021 neun Personenmonate zu 100 % in Vollzeit sowie in einem Monat zu 41,44 % in Vollzeit an dem Projekt. Im Jahr 2022 arbeitete die wissenschaftliche Mitarbeiterin Anne Friedrich vier Personenmonate zu 50 % in Vollzeit an dem Projekt. Der wissenschaftliche Mitarbeiter Felix Roeper arbeitete im Jahr 2022 fünf Monate zu 100% in Vollzeit, in einem Monat zu 96,78% in Vollzeit sowie in einem weiteren Monat zu 61,78% in Vollzeit an dem Projekt. Durch das von Felix Roeper abgeschlossene Hochschulstudium (Traffic and Transport – M.Sc.) sowie dem von Anne Friedrich abgeschlossenem Hochschulstudium (Wirtschaftsingenieurwesen – M.Sc.) sind sie dem wissenschaftlichen-technischen Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans) zuzuordnen. Durch den notwendigen anspruchsvollen Methodeneinsatz ist das vorliegende Qualifikationsniveau im laufenden Vorhaben unabdingbar. Das Projekt wurde zudem während des Berichtszeitraumes durch die Hilfskräfte Thomas Härtel, Moritz Richter, Marco Ruhs, Lukas Elsner, Gabriel Utomo, Lars Wohlrath und Maximilian Gehring entsprechend des Finanzierungsplans unterstützt. Ausgaben für Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans) und Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans) sind im Finanzierungsplan nicht vorgesehen und dementsprechend im vorliegenden IGF-Vorhaben nicht angefallen (Einzelansatz B des Finanzierungsplans).

4. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die geleistete Arbeit sowie die erzielten Ergebnisse entsprechen in Umfang und Qualität den Vorgaben aus dem Projektantrag. Zur Durchführung einer Anforderungsanalyse sowie anschließenden Modellierung des Tourenplanungsprozesses mit Mechanismus zur Reallokation von ungünstigen Zeitfenstern, wurde die Literatur zunächst systematisch auf Anforderung untersucht und aufbauend darauf literaturbasiert ein Tourenplanungsprozess mit und ohne Mechanismus zur Reallokation ungünstiger Zeitfenster modelliert. Zur Überprüfung der Ergebnisse wurden in halbstrukturierten Fokusgruppeninterviews mit den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses sowie in strukturierten Interviews der modellierte Tourenplanungsprozess ohne Tauschmechanismus verifiziert sowie der modellierte Tourenplanungsprozess mit VCG-Mechanismus validiert und verifiziert. Die Verifizierung sowie Validierung der modellierten Prozesse dienen hierbei dazu, die Richtigkeit der literaturbasiert getroffenen Annahmen zu überprüfen und sicherzustellen.

Zur Identifikation und Auswahl eines geeigneten Mechanismus wurde ebenfalls die aktuelle Literatur im Bereich der dezentralen kooperativen Tourenplanung systematisch zu den Themen Auktionstheorie sowie Mechanismus Design Theorie untersucht. Als Methodik zur Untersuchung, welche Verbesserungspotentiale die durch eine Reallokation von ungünstigen Zeitfenstern mithilfe des gefundenen VCG-Mechanismus erzielt werden können, wurde eine simulationsbasierten Optimierung gewählt. Kombiniert wurden hierbei eine agentenbasierte Simulation mit einem exakten B&C-Algorithmus. Das exakte Verfahren wurde hierbei gewählt, um den exakten Wert eines Zeitfensters im Rahmen der Tourenplanung zu bestimmen und so die vom VCG-Mechanismus geforderte Eigenschaft des wahrheitsgemäßen Bietens zu erfüllen.

Der von (Ropke et al. 2007) entwickelte B&C-Algorithmus zur Lösung von PDPTW wurde gleichermaßen wie der VCG-Mechanismus mithilfe einer Literaturrecherche identifiziert und mit weiteren exakten Verfahren verglichen. Die Auswahl fiel insbesondere wegen der stark gewichteten Zeitfensterrestriktionen auf den von (Ropke et al. 2007) entwickelten B&C-Algorithmus. Um eine Reallokation ungünstiger Zeitfenster sowie die Bestimmung des Wertes eines Zeitfensters im Rahmen der Tourenplanung zu ermöglichen, wurde der B&C-Algorithmus in das agentenbasierte Simulationsmodell implementiert. Das in Arbeitspaket 1 entwickelte konzeptionelle Modell des Tourenplanungsprozesses mit VCG-Mechanismus zur Reallokation ungünstiger Zeitfenster, diente hierbei als Grundlage zur Nachbildung des Prozesses im Simulationsmodell. Weiter wurde zur Auswahl der Gebote für Zeitfenster sowie für die Modellierung des VCG-Mechanismus ein geeignetes Verfahren zur Lösung des WDP basierend auf (Sandholm et al. 2002) ausgewählt. Für die Modellierung der Optimierungsprobleme wurde

CPLEX verwendet und mithilfe einer API in die Java-basierte Umgebung der Simulationssoftware AnyLogic integriert.

5. Bewertung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten

Webbasierte ZMS bieten für ihre Nutzer die Verlader sowie deren Kunden wie Industrie- und Handelsunternehmen große Vorteile. Ankünfte von Lkw an der Laderampe können präzise vorhergesagt werden, was eine Optimierung von internen Prozessen ermöglicht und so Staus auf den Betriebshöfen vermieden werden können. Herausforderungen hingegen entstehen auf Seiten der Transportunternehmen. Bedingt durch die Buchung von Zeitfenstern nach dem FCFS-Prinzip sind Zeitfenster, die für die Tourenplanung von KMU günstig sind, schnell nicht mehr verfügbar. Dies führt dazu, dass aufgrund der Zeitfensterrestriktionen bereits während der Tourenplanung Umwege eingeplant werden müssen.

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurde eine Lösung entwickelt, wie mithilfe der Reallokation ungünstiger gebuchter Zeitfenster, diese Umwege eingespart werden können. Dies hilft KMU Spediteuren ihre Tourenplanung effizienter zu gestalten und löst eine Herausforderung die mit der Buchung von Zeitfenstern zur Be- und Entladung von Lkw an der Laderampe einhergeht. Entwickelt wurde eine Lösung, bei der ein Mechanismus zur Reallokation der ungünstigen Zeitfenster auf einer digitalen Plattform als weitere Applikation angeboten werden kann. Wird ein Mechanismus gewählt, mit dem ein Gewinn erzielt werden kann, führt dies dazu, dass neben KMU Spediteuren auch ZMS-Anbieter von dieser Lösung profitieren. Auch ein volkswirtschaftlicher Nutzen, wie die Reduzierung von negativen Externalitäten die mit dem Straßengüterverkehr verbunden sind, kann durch diese Lösung erzielt werden. Durch die Vermeidung von Umwegen, müssen geringere Distanzen von betroffenen Lkws zurückgelegt werden, was beispielsweise zu einer Vermeidung des Verbrauches von Energie führt.

Der wissenschaftlich-technische Nutzen der erzielten Ergebnisse ist als hoch zu erachten. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurde erstmals der Tausch bzw. die Reallokation von einzelnen ungünstigen Zeitfenstern mithilfe eines VCG-Mechanismus innerhalb von Tourenplanungsplanungsproblemen mit Zeitfensterrestriktionen untersucht. Es wurde ein Mechanismus gefunden, der das Potential besitzt, im Zusammenspiel mit dem modellierten Tourenplanungsprozess, unter Berücksichtigung asymmetrischer Informationen die Vermeidung von Umwegen aller am Mechanismus beteiligter Spediteure zu maximieren. Durch Eigenschaft des gewählten VCG-Mechanismus, dass jeder Spediteur wahrheitsgemäß bietet und der Spediteur die Auktion gewinnt, der das Höchste Gebot für das angebotene Zeitfenster abgibt,

führt dazu, dass die Einsparungen von Umwegen im System maximiert wird. Weiter wurde ein Prozess entwickelt, der es ermöglicht, eine Pareto-Verbesserung für alle am zeitfenstergesteuerten Be- und Entladeprozess beteiligten Akteure herbeizuführen. ZMS-Anbieter werden bessergestellt, indem sie durch den Betrieb des Mechanismus auf ihrer digitalen Plattform einen Gewinn erzielen können. KMU Spediteure können durch die Teilnahme am Mechanismus und die damit einhergehende Vermeidung von Umwegen Kosteneinsparungen erzielen. Für Verlader sowie deren Kunden, die mit ZMS ihre internen Prozesse an der Laderampe und auf dem Betriebshof optimieren, sind keine Nutzeneinbußen verbunden. Wird der Zeitpunkt des Zeitfenstertausches so gewählt, dass die Zeitfenster noch nicht eingefroren sind, während der Tausch bzw. die Reallokation der ungünstigen Zeitfenster stattfindet, können weiterhin, wie gewohnt, die internen Prozesse von den Verladern sowie Industrie- und Handelsunternehmen optimiert werden. Dabei wurde der Prozess so gestaltet, dass es unerheblich ist, ob der Mechanismus von mehreren Anbietern digitaler Plattformen betrieben wird oder nur von einer zentralen Plattform. Der Betrieb einer zentralen Plattform hätte dabei den Vorteil, dass zum einen die Möglichkeiten für einen Tausch steigen würde und so größere Einsparungen bei vermiedenen Umwegen erzielt werden könnten und zum anderen, würde der administrative Aufwand für die Spediteure sinken, da nur eine Lösung angeboten wird.

6. Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Der Transfer von im Projekt erzielten Ergebnissen erfolgte in Teilen bereits während der Projektlaufzeit und wurde im Projektverlauf weiter entsprechend des Zwischenberichts konkretisiert. Die Transferstrategie stützt sich auf Workshops, Veranstaltungen mit der Praxis, Publikationen in praxisnahen und wissenschaftlichen Fachzeitschriften sowie die Vorstellung der Ergebnisse auf Konferenzen und Fachtagungen. Ziel war es, fortlaufend Feedback von Unternehmensvertretern sowie weiteren Stakeholdern zu erhalten, um die Praxistauglichkeit der Ergebnisse zu erhöhen. Im Folgenden werden zunächst die Transfermaßnahmen beschrieben, die während der Projektlaufzeit durchgeführt wurden. Anschließend erfolgt die Schilderung von noch geplanten Transfermaßnahmen.

6.1 Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit

Während der Projektlaufzeit wurden Maßnahmen in vier Bereichen zum kontinuierlichen Transfer der Forschungsergebnisse in die Wirtschaft durchgeführt. Tabelle 3 enthält die durchgeführten Transfermaßnahmen. Diese werden unter der Tabelle mit Verweisen auf zusätzliche Detailinformationen beschrieben.

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Zeitraum	Durchführung
A: Workshops mit PA	Verifizierung und Validierung des Lösungskonzeptes	A1: 5 Sitzungen des PA A2: Experteninterviews in AP1 (A3: Lernspiel („Serious Game“) mit PA und Studierenden-gruppen in AP2 entfällt hier. Es macht mehr Sinn die in AP3 entwickelten Mechanismen nach Fertigstellung des Projektes zu vermitteln. Daher A3 zu G)	Mitte 2020 – Ende 2022	A1: Erste Sitzung des PA durchgeführt am 09.09.2020 Zweite Sitzung des PA durchgeführt am 04.05.2021 Dritte Sitzung des PA durchgeführt am 03.12.21 Vierte Sitzung des PA durchgeführt am 14.10.2022 Fünfte Sitzung des PA durchgeführt am 17.11.2022 Sechste Sitzung des PA durchgeführt am 29.03.2023 A2: Experteninterviews (digital): LOGSOL GmbH (02.02.21); Körper Supply Chain GmbH (15.02.21); Robert Bosch GmbH (04.03.21); Hofmann Internationale Spedition GmbH (26.03.21)

B: Veranstaltungen mit der Praxis	Diskussion von Projektinhalten und -ergebnissen	B1: Darmstädter Logistics Summit B2: Pre-Event des deutschen Logistikkongress	Ab 2022	B1: Darmstädter Logistics Summit am 16.09.2020 B2: Pre-Event des deutschen Logistikkongress am 15.01.2021
C: Publikationen in praxisnahen Fachjournals	Bekanntmachung der Zwischenergebnisse	C1: Magazin der Bundesvereinigung Logistik C2: 10th International Scientific Symposium on Logistics C3: TRB Freight Data Workshop	Ab 2022	C1: Interview zum Projekt im Magazin der Bundesvereinigung Logistik C2: Proceedings of the 10th International Scientific Symposium on Logistics 2021 C3: Extended Abstract TRB Freight Data Workshop 2021
D: Konferenzbesuche/Workshops/Seminare	Diskussion mit Vertretern der Wissenschaft	D1: Int. Scientific Symposium on Logistics (ISSL) 2021 D2: Innovations in Freight Data Workshop 2021 D3: TU Delft Freight and Logistics Lab Seminars	Mitte 2021 – Anfang 2023	D1: Int. Scientific Symposium on Logistics (ISSL) (Vortrag gehalten: 15.07.21) D2: Innovations in Freight Data Workshop TRB (Vortrag gehalten: 22.09.21) D4: TU Delft Freight and Logistics Lab Seminars (Vortrag gehalten: 05.10.2021)

Tabelle 3: Während der Projektlaufzeit durchgeführte Maßnahmen zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

A: Workshops mit dem Projektbegleitenden Ausschuss

Zur stetigen Verifikation und Validierung der entwickelten Forschungsergebnisse sowie zur Sicherstellung der praktischen Relevanz der Ergebnisse wurden die Treffen des Projektbegleitenden Ausschusses sowie zahlreiche Experteninterviews genutzt.

A1: Workshops: In der Projektlaufzeit wurden insgesamt sechs Treffen des Projektbegleitenden Ausschusses durchgeführt. Das erste Treffen wurde am 09.09.2020 mit neun externen

Vertretern der Praxis ausgerichtet. Beim zweiten Treffen am 04.05.2021 waren vier Praxisvertreter anwesend. Das dritte Treffen fand am 03.12.21 mit vier Praxisvertretern statt. Am 14.10.2022 fand die vierte Sitzung des Projektbegleitenden Ausschusses mit fünf Praxisvertretern statt. Das fünfte Treffen fand am 17.11.2022 mit fünf dokumentierten Praxisvertretern statt und das sechste Treffen am 29.03.2023 ebenfalls mit fünf Praxisvertretern. Bis auf das fünfte Treffen wurden alle Treffen aufgrund der Corona-Pandemie digital durchgeführt und von der Technischen Universität Darmstadt veranstaltet.

A2: Experteninterviews: Um die aus der systematischen Literaturrecherche gewonnenen Modellannahmen zu überprüfen und Anforderungen zu formulieren wurden die halbstrukturierten Fokusgruppeninterviews mit dem Projektbegleitenden Ausschuss genutzt sowie vier weitere Interviews mit Vertretern aus der Praxis durchgeführt. Befragt wurden verschiedene Experten aus der Praxis, wobei darauf geachtet wurde, dass alle am Prozess beteiligten Akteure repräsentiert sind.

B: Veranstaltungen mit der Praxis

Neben den Sitzungen des Projektbegleitenden Ausschusses wurden die Projektergebnisse beim Darmstädter Logistics Summit sowie beim Pre-Event des deutschen Logistikkongress am 15.01.2021 präsentiert.

B1: Roper, F. (2020): Tauschbörse für Zeitfenster – Wie eine Effizienzsteigerung im zeitfenstergesteuerten An- und Auslieferungsprozess erreicht werden kann. Anlass: 3. Darmstädter Logistics Summit. Darmstadt, 16.09.2020

B2: Roper, F. (2021): Reducing road freight transport costs and emissions by exchanging time windows on a cross-provider data platform. Anlass: 38. Deutscher Logistik Kongress – News from the Logistics Think Tanks (Science & Research), Online/Berlin, 15.10.2021

C: Publikationen in praxisnahen Fachjournals

Folgende Veröffentlichungen sind mit Schwerpunkt auf das vorliegende Forschungsthema zum Zeitfenstermanagement während der Projektlaufzeit durch die Forschungsstelle erfolgt:

C1: Interview zum Projekt in der zweiten Ausgabe des Magazins „Eins Zwei Drei Vier“ im Jahr 2022 der Bundesvereinigung Logistik

C2: Elbert, R.; Roper, Felix (2021): A pickup and delivery process with an auction-based exchange mechanism for time windows. In: 10th International Scientific Symposium on Logistics, Online

C3: Elbert, R.; Roeper, F. (2021): Reducing road freight transport costs and emissions by means of a data platform for the exchange of time windows in a pick-up and delivery process. online, TRB Freight Data Workshop, 22.09.2021

D: Konferenzbesuch / Workshop / Seminar

Im Jahr 2021 wurden die erzielten Zwischenergebnisse auf einer wissenschaftlichen Konferenz, einem Workshop mit internationalen Wissenschaftlern sowie während eines Seminars bei Wissenschaftlern der TU Delft präsentiert:

D1: Elbert, R., Roeper, F. (2021): A pickup and delivery process with an auction-based exchange mechanism for time windows. Anlass: 10th International Scientific Symposium on Logistics, Digital, 15.06.2021

D2: Elbert, R., Roeper, F. (2021): Reducing road freight transport costs and emissions by means of a data platform for the exchange of time windows in a pick-up and delivery process. Anlass: 3. Innovations in Freight Data Workshop of the TRB, Online/USA, 22.09.2021

D3: Elbert, R., Roeper, F. (2021): Reducing road freight transport costs and emissions by means of a data platform for the exchange of time windows in a pick-up and delivery process. Anlass: TU Delft Freight and Logistics Lab Seminars, Online/Delft, 05.10.2021

6.2 Transfermaßnahmen nach Abschluss des Vorhabens

Nach Abschluss des Projektes sind weitere Transfermaßnahmen geplant. Bereits durchgeführte Maßnahmen sind in Tabelle 12 schwarz markiert. Weitere für das Jahr 2018 vorgesehene Maßnahmen sind in Tabelle 12 rot markiert. Unter der Tabelle werden die Transfermaßnahmen im Detail beschrieben.

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Zeitraum
E: Veröffentlichung der Ergebnisse auf Internetportal	Breite Verteilung der Ergebnisse	E1: Separater Webauftritt	01.01.23 - 31.03.23
F: Publikation der Ergebnisse in Fachzeitschriften	Bekanntmachung der Ergebnisse	F1: Deutsche Verkehrszeitung (Themenheft „Software Lösung in der Logistik“) F2: Transportation Research Part B: Methodological	01.12.23 - 30.06.24

		F3: Transport Science oder EURO Journal on Transportation and Logistics	
G: Veranstaltungen mit der Praxis	Vermittlung der Ergebnisse	G1: Workshop mit PA G2: Transferworkshops mit IHK G3: Lernspiel („Serious Game“) mit PA und Studierendengruppen (bei Bedarf)	31.03.23 - 31.03.24
H: Vorstellung der Ergebnisse auf Fachtagungen / Messen	Ergebnispräsentation für Praxis und Forschung	H1: Winter Simulation Conference (WSC) 2023	01.12.23 - 30.06.24

Tabelle 4: Durchgeführte und geplante Maßnahmen zum Ergebnistransfer nach Abschluss des Vorhabens.

E: Veröffentlichung der Ergebnisse auf Internetportal

Zentrale Projektergebnisse, wie die Ergebnisse der simulationsbasierten Optimierung und der erarbeitete Leitfaden, werden nach Projektabschluss auf einer Projektwebseite der Forschungsstelle zugänglich gemacht.

F: Publikation der Ergebnisse in Fachzeitschriften

Folgende Veröffentlichungen sind nach Abschluss des Vorhabens bereits erfolgt bzw. geplant:

F1: Aktuell (Stand 06.07.2023) entsteht eine Veröffentlichung in Zusammenarbeit mit der INFORM GmbH die voraussichtlich im Themenheft „Software in der Logistik“ der Deutschen Verkehrszeitung am 26.07.2023 veröffentlicht wird.

F2: Für das zweite Halbjahr 2023 ist geplant, eine systematische Literaturrecherche als wissenschaftliche Publikation in einem Fachjournal wie dem Medium „Transportation Research Part B: Methodological“ einzureichen.

F3: Für das erste Halbjahr 2024 ist geplant, die Ergebnisse der simulationsbasierten Optimierung als wissenschaftliche Publikation in einem Fachjournal wie dem Medium „EURO Journal on Transportation and Logistics“ oder „Transportation Science“ einzureichen.

G: Veranstaltungen mit der Praxis

G1: Alle Mitglieder des Projektbegleitenden Ausschusses wurden am 29.03.2023 zu einer offiziellen digitalen Abschlussveranstaltung des Projektes eingeladen. Es waren fünf Vertreter von Unternehmen anwesend. Neben einem Vertreter eines Verladers nahmen vier Anbieter von ZMS an der Abschlussveranstaltung teil. Es wurden zentrale Ergebnisse sowie Handlungsempfehlung zum Transfer der Ergebnisse in Praxis vorgestellt und diskutiert.

G2: Für das Jahr 2023 und 2024 wird angestrebt die Projektergebnisse beim Arbeitskreis Versand und Logistik der IHK Darmstadt Rhein Main Neckar vorzustellen.

G3: Geplant war ein Lernspiel („Serious Game“) mit den Vertretern des PA und Studierendengruppen durchzuführen, um daraus ebenfalls Erkenntnisse über verwendete Mechanismen zu erhalten. Aufgrund der Pandemie war dann die Durchführung des Lernspiels zum richtigen Zeitpunkt leider nicht möglich. Bedingt durch den erfolgten Erkenntnisgewinn insbesondere im Bereich der Auktions- sowie Mechanismus Design Theorie wurde zum Schluss des Projektes kein Bedarf mehr gesehen, so eine Art von Lernspiel durchzuführen.

H: Vorstellung der Ergebnisse auf Fachtagungen / Messen

H1: Eingereicht und angenommen wurde ein Beitrag bei der Winter Simulation Conference 2023 der nach Präsentation der Forschungsergebnisse veröffentlicht wird.

Elbert, R., Roeper, F. (2023): Simulation-based analysis of improvements in vehicle routing with time windows using a one-sided VCG-Mechanism for the reallocation of unfavorable time windows, In: Proceedings of the 2023 Winter Simulation Conference, edited by C. G. Corlu, S. R. Hunter, H. Lam, B. S. Onggo, J. Shortle, and B. Biller, San Antonio, USA

Literaturverzeichnis

- Ausubel, L. M. / Milgrom, P. (2006):** "The lovely but lonely Vickrey auction". In Combinatorial auctions, edited by B. Prior and V. Geary, 57-95. Boston: MIT Press
- Berbeglia, G. / Cordeau, J. / Gribkovskaia, I. / Laporte G. (2007):** Static pickup and delivery problems: a classification scheme and survey. Top, 18. April 2007: 1-31.
- Dr. Meier & Schmidt GmbH (2023):** <https://start.cargoclix.com/de/slot/> Last Access: 10.07.2023
- Elbert, R. / Friedrich, A. / Thiel, D. (2018a):** Disposition mit Zeitfenstervorgaben - Assistenzsysteme und Entlastungspotenziale. In: Internationales Verkehrswesen 70, 2018: 48-52.
- Elbert, R. / Thiel, D. / Friedrich, A. (2018b):** „Zeitfenster-Management im Straßengüterverkehr - Effizienzsteigerung durch Integration von Zeitfenstervorgaben in Planungs- und Dispositionsprozessen.“ Schlussbericht zu IGF-Vorhaben Nr. 18499 N, Darmstadt: Industrielle Gemeinschaftsforschung, 2018.
- Elbert, R. / Knigge, J. K. / Friedrich, A. (2020):** Analysis of decentral platoon planning possibilities in road freight transport using an agent-based simulation model. Journal of Simulation 14(1): 64-75.
- Elbert, R. / Roeper, F. (2021):** A Pickup and Delivery Process With an Auction-Based Exchange Mechanism for Time Windows. In: Proceedings of the 10th International Scientific Symposium on Logistics, editet by T. Schmidt, K. Furmans, M. Freitag, B. Hellingrath, R. Koster and A. Lange. Dresden, Deutschland: Bundesvereinigung Logistik (BVL) e.V.
- Grüner, HP. (2008):** Allokationstheorie und Wirtschaftspolitik. In: Wirtschaftspolitik. Springer-Lehrbuch. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-75800-6_3
- Hackius, N / Kersten, W. (2014):** Truck Loading Dock Process–Investigating Integration of Sustainability. In Next Generation Supply Chains: Trends and Opportunities. Proceedings of the Hamburg International Conference of Logistics (HICL), Vol. 18, editet by W. Kersten, T. Blecker and C. M. Ringle, 245-271. Hamburg, Deutschland: ISBN 978-3-7375-0339-6, epubli GmbH, Berlin, <https://doi.org/10.15480/882.1188>
- Krishna, V. (2009):** Auction theory. 2nd ed. Great Britain: Academic press.
- Leyton-Brown, K. / Pearson, M. / Shoham Y. (2000):** Towards a universal test suite for combinatorial auction algorithms. In Proceedings of the 2nd ACM conference on Electronic commerce, edited by A. Jhingran, J. M. Mason, and D. Tygar, 66–76, New York: Association for Computing Machinery Press.
- Li, H. and A. Lim, (2001):** A MetaHeuristic for the Pickup and Delivery Problem with Time Windows. In Proceedings of the 13th International Conference on Tools with Artificial Intelligence. edited by R. Bilof and L. Palagi, 160-167. Dallas, TX, USA: The Printing House
- LOGSOL GmbH (2023):** <https://www.logsol.de/de/rampman-rampenmanagement.html> Last Access: 10.07.2023
- Pfohl, HC. (2018):** Logistikkbegriff. In: Logistiksysteme. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-56228-4_1
- Ropke, S. / Cordeau, J. F. / Laporte, G. (2007):** Models and branch-and-cut algorithms for pickup and delivery problems with time windows. Networks: An International Journal 49(4): 258-272.
- Sandholm, T. / Suri, S. / Gilpin, A. / Levine, D. (2002):** Winner determination in combinatorial auction generalizations. In Proceedings of the first international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems: part 1 (pp. 69-76).

Steimle J. (2008): Algorithmic Mechanism Design: Eine Einführung. Springer-Verlag.

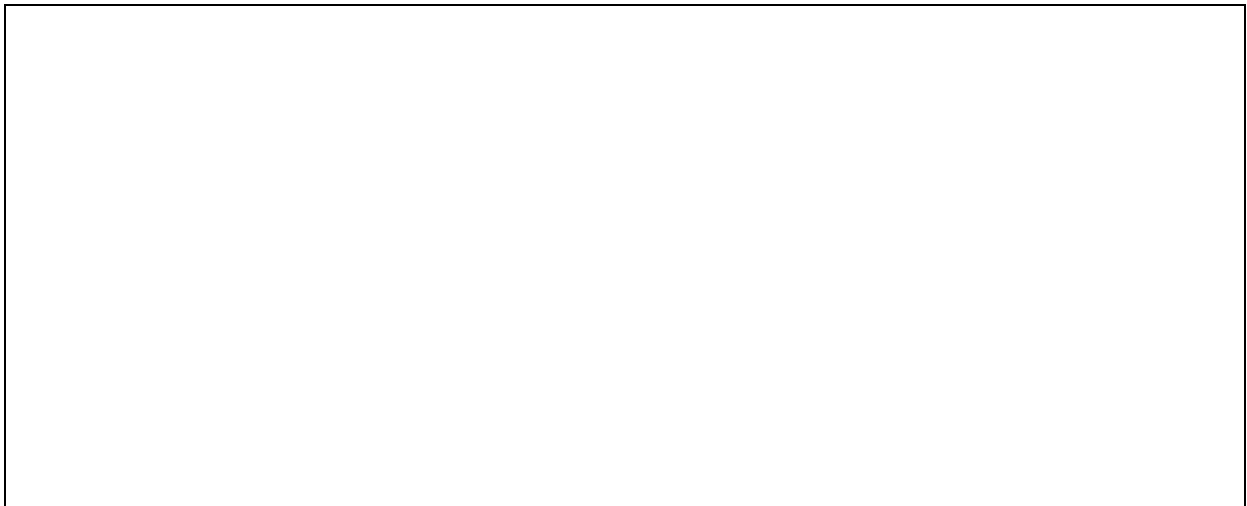
Transporeon (2023): <https://www.transporeon.com/de/produkte/time-slot-management> Last
Access: 10.07.2023

Tripp, C. (2021). Distributionskonzepte von Industrie und Handel. In: Distributions- und
Handelslogistik. Springer Gabler, Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-34532-7_4

Anhang – Leitfaden Experteninterview (AP1)

Themenblock 1: Verifizierung des modellierten Tourenplanungsprozesses ohne Tauschmechanismus

Bei dem gezeigten Tourenplanungsprozess handelt es sich um ein Modell. Modelle zeigen ein vereinfachtes Abbild der Wirklichkeit. Bei der Modellierung eines Systems werden Systemelemente die dem Modellierer nicht relevant erscheinen weggelassen. Denken Sie in diesem Kontext, dass das Modell alle relevanten Elemente des Systems enthält?



Falls Sie die Frage mit Nein beantwortet haben, beschreiben Sie bitte welches Systemelement fehlt und warum es mit in das Modell aufgenommen werden sollte.

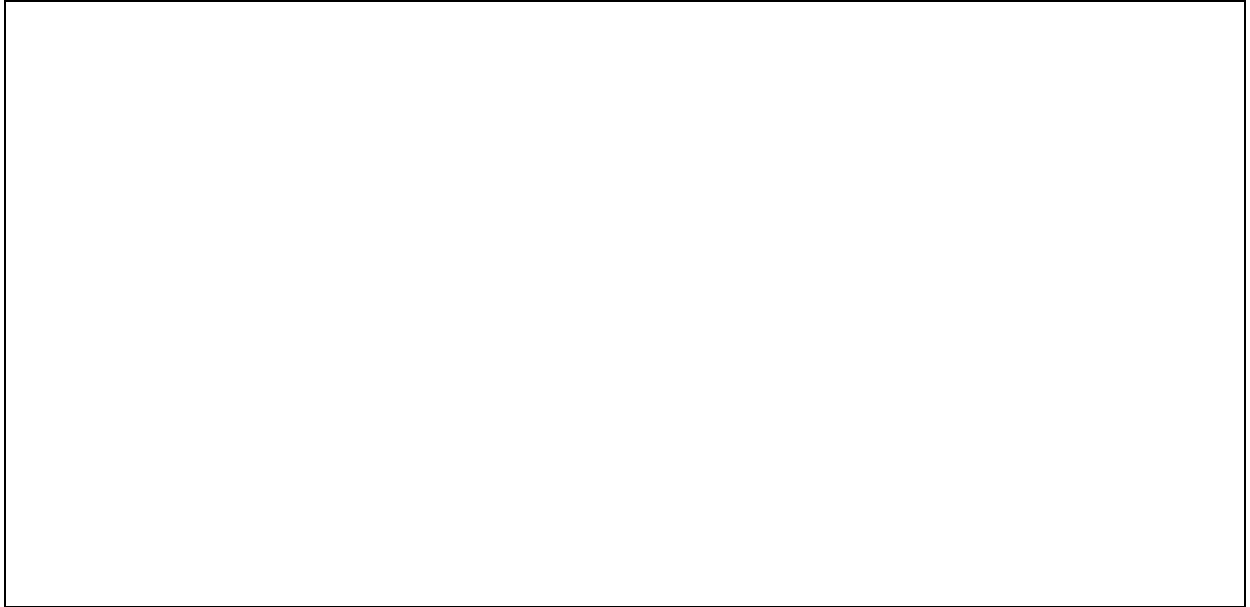


Würden Sie die Reihenfolge in der die einzelnen Prozessschritte angeordnet sind ändern und wenn ja, wie und warum.




Themenblock 2: Validierung und Verifizierung des modellierten Tourenplanungsprozesses mit Tauschmechanismus

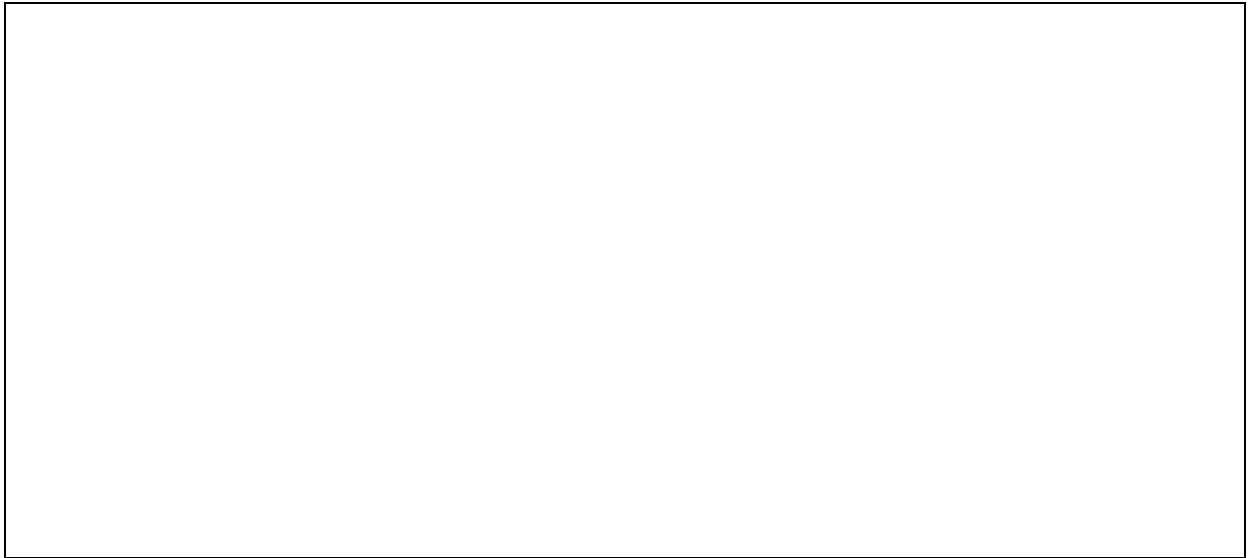
Aufbauend auf dem zuvor gezeigten Modell, wurde ein Tourenplanungsprozess mit einem Tauschmechanismus für Zeitfenstern entwickelt. Denken Sie, dass das Modell vollständig ist und wenn nein welches Modellelement fehlt.



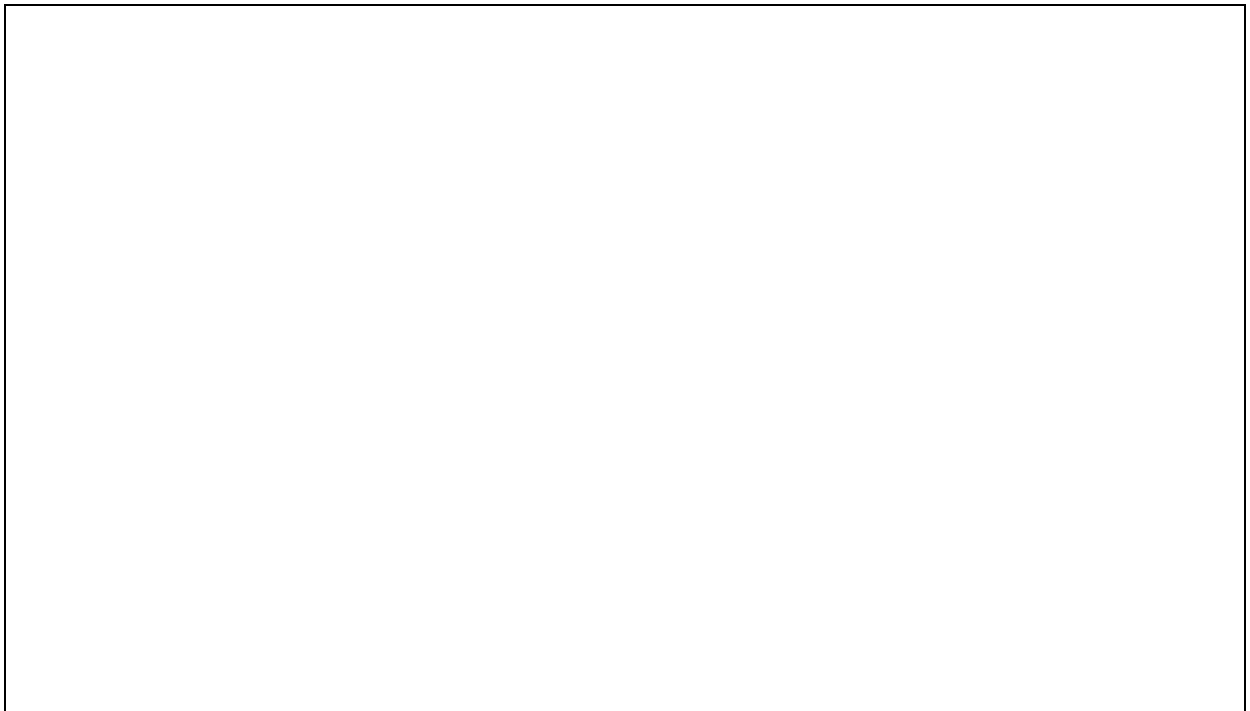
Wenn Sie den Prozess betrachten, denken Sie, dass der Ablauf und die Prozessschritte richtig gewählt sind und wenn nein warum?



Denken Sie, dass der Tausch von Zeitfenster während der Tourenplanung realisierbar ist und wenn nein warum.

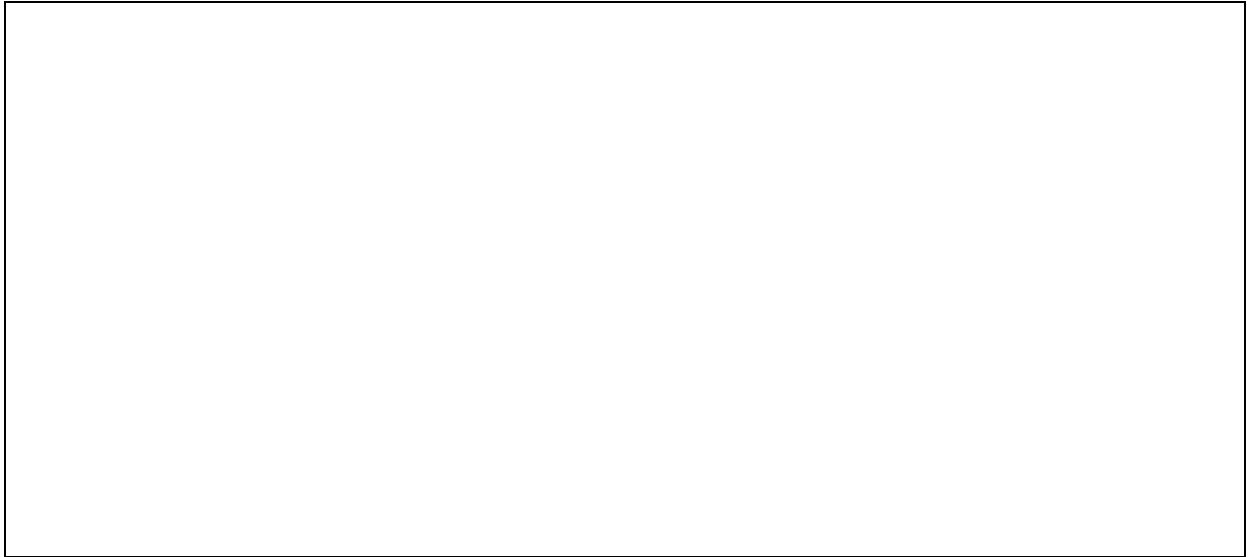
A large, empty rectangular box with a thin black border, intended for the respondent to provide an answer to the question above.

Nachdem was Sie jetzt wissen, denken Sie, dass der Mechanismus zum Tausch von Zeitfenster an einer anderen Stelle einen größeren Nutzen für die beteiligten Akteure erzeugen könnte?

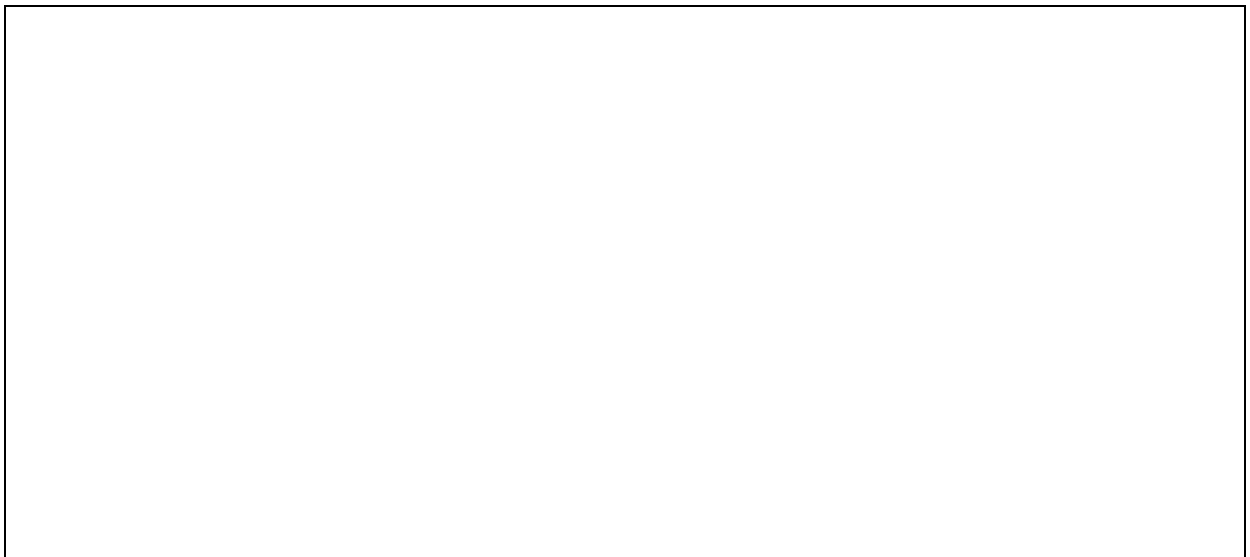
A large, empty rectangular box with a thin black border, intended for the respondent to provide an answer to the question above.

Themenblock 3: Anforderung an den Tauschmechanismus

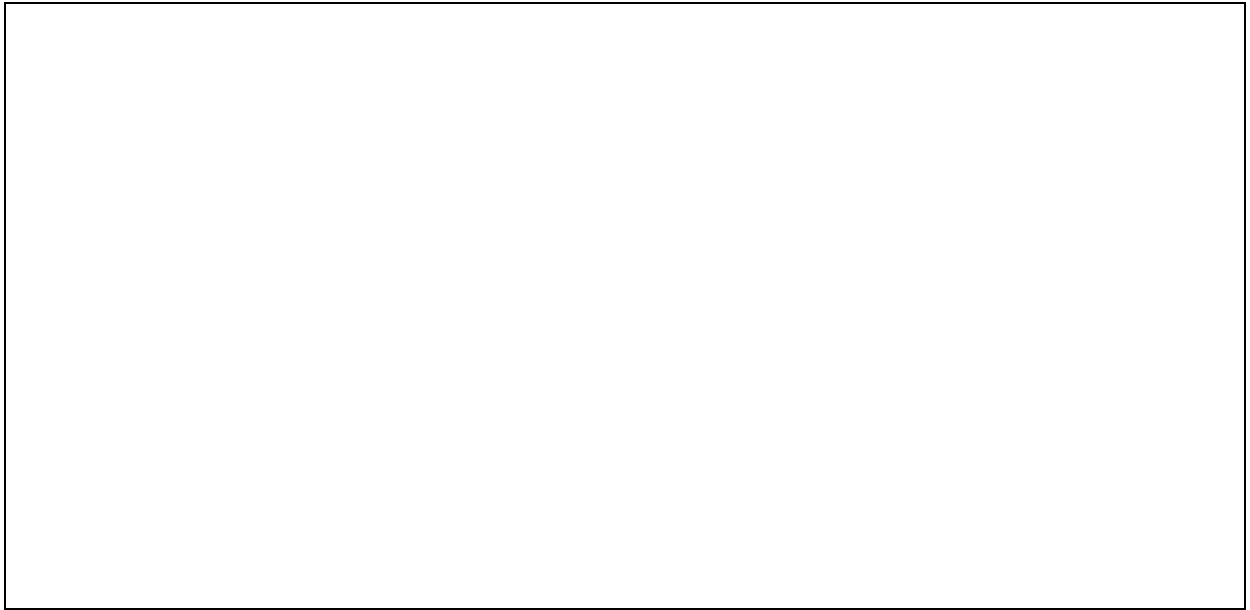
Der Zeitfenstermanagementsystemanbieter als einer der vier Hauptakteure tritt in diesem Szenario als Betreiber des Mechanismus auf. Was denken Sie, welche Anforderungen stellt der Zeitfenstermanagementsystemanbieter für Anforderungen an den Mechanismus?

A large, empty rectangular box with a thin black border, intended for the user to write their answer to the question above.

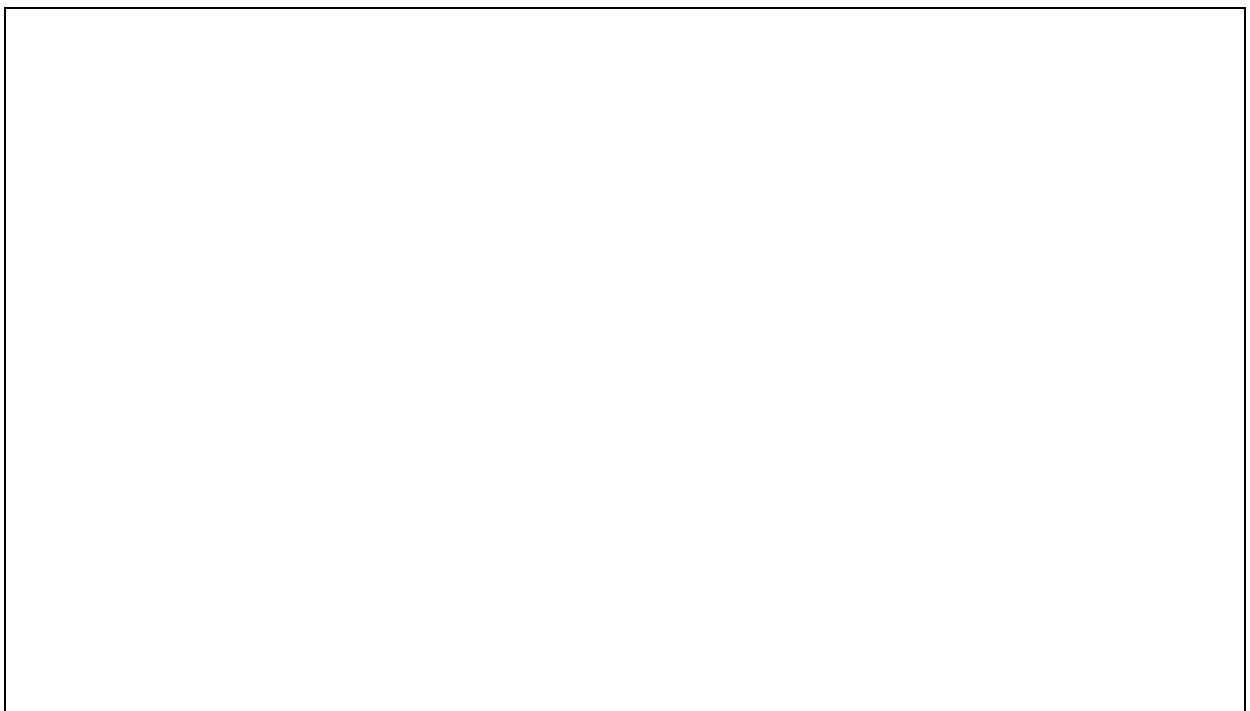
Für den Spediteur kann der Tausch eines ungünstigen Zeitfensters zur Verbesserung der Tourenplanung führen. Was denken Sie, welche Anforderung stellt der Spediteur für Anforderungen an den Mechanismus?

A large, empty rectangular box with a thin black border, intended for the user to write their answer to the question above.

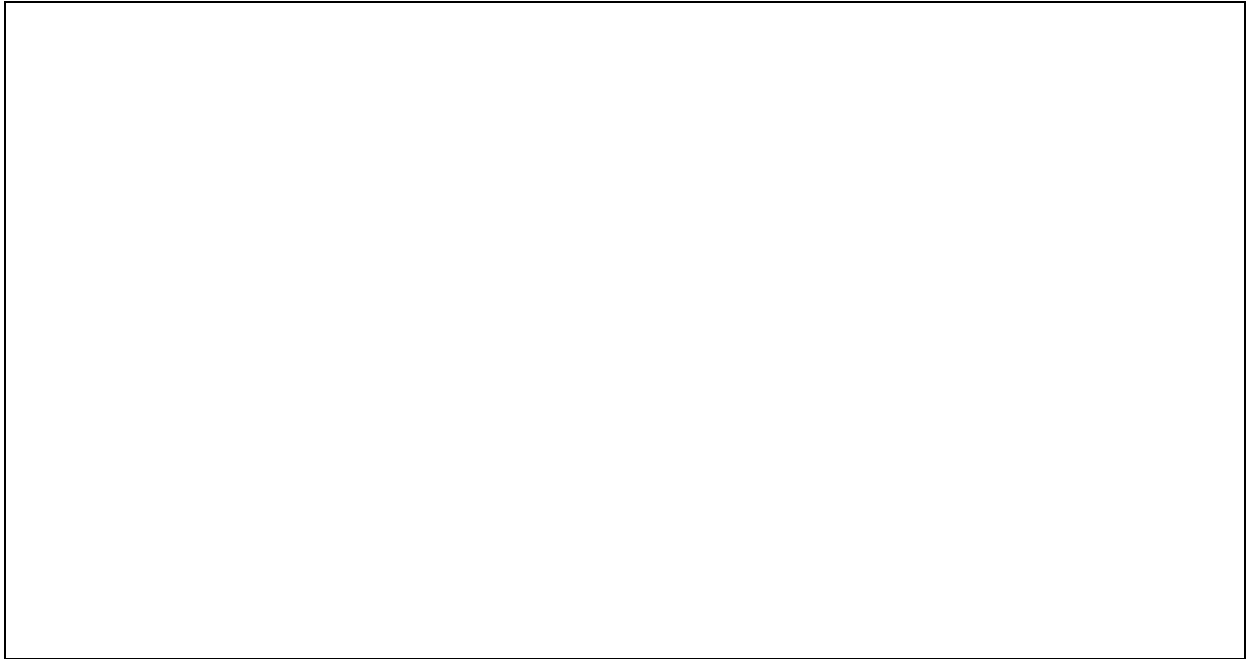
Der Verlader wird nach dem Tausch der Zeitfenster über das Ergebnis informiert. Was denken Sie, welche Anforderungen stellt der Verlader an den Mechanismus?

A large, empty rectangular box with a thin black border, intended for the respondent to write their answer to the question above.

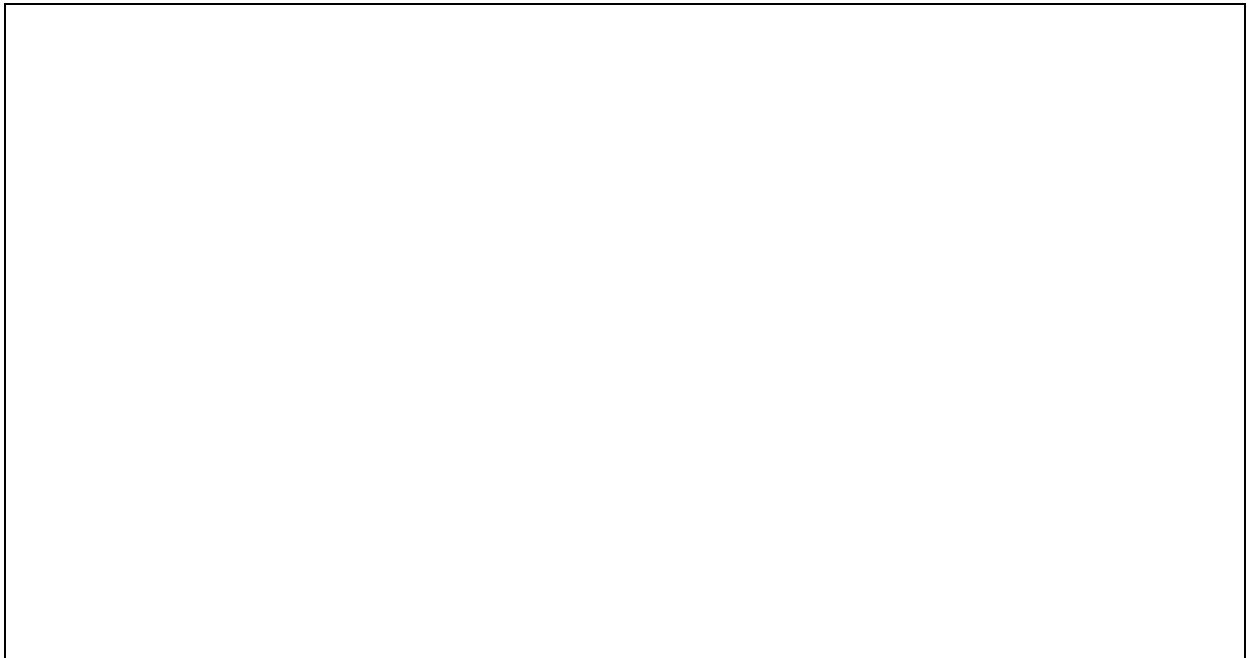
Der Lagerhausbetreiber (Industrie- & Handelsunternehmen) wird nach dem Tausch der Zeitfenster über das Ergebnis informiert. Was denken Sie, welche Anforderungen stellt der Lagerhausbetreiber an den Mechanismus?

A large, empty rectangular box with a thin black border, intended for the respondent to write their answer to the question above.

Für den Spediteur ergibt sich durch den Tausch von Zeitfenstern ein Mehraufwand in der Tourenplanung. Was denken Sie, wie sollte der Mechanismus gestaltet sein, damit sich eine Spedition daran beteiligt?

A large, empty rectangular box with a thin black border, intended for the respondent to provide their answer to the question above.

Für den ZMS ergibt sich durch den Betrieb des Mechanismus ein Mehraufwand. Was denken Sie, wie sollte der Mechanismus gestaltet sein, damit sich ein ZMS daran beteiligt?

A large, empty rectangular box with a thin black border, intended for the respondent to provide their answer to the question above.