

Ein Optimierungsmodell für die wöchentliche Tourenplanung unter Einbeziehung der EU-Sozialvorschriften

Prof. Dr.-Ing. Herbert Kopfer, Christoph Manuel Meyer

Lehrstuhl für Logistik
Fachbereich Wirtschaftswissenschaft
Universität Bremen

Wilhelm-Herbst-Straße 5
28359 Bremen

Eingereicht am 27.12.2009

Ein Optimierungsmodell für die wöchentliche Tourenplanung unter Einbeziehung der EU-Sozialvorschriften

Überblick

In diesem Beitrag wird das Problem der kombinierten Touren- und Lenkzeitplanung beschrieben und modelliert mit dem Ziel, die in der gesamten Europäischen Union gültigen gesetzlichen Vorschriften zu den Lenk- und Arbeitszeiten in einem erweiterten Modell zur Tourenplanung zu formulieren und in die Tourenplanung zu integrieren.

Als methodische Vorgehensweise wird die mathematische Modellierung des Problems in einem gemischt-ganzzahligen Optimierungsmodell gewählt. Dabei wird eine positionsorientierte Formulierung eines Vehicle Routing Problems mit Zeitfenstern zugrunde gelegt und um Restriktionen zur Abbildung der gesetzlichen Lenkzeitvorschriften ergänzt. Zur Analyse des erweiterten Tourenplanungsproblems wurde das Modell für einige Testprobleme mit der Optimierungssoftware CPLEX gelöst. Für die Testinstanzen wurden die Auswirkungen der Sozialvorschriften auf die Tourenplanung bei Verwendung unterschiedlicher Zielfunktionen analysiert, indem die Eigenschaften der optimalen Tourenpläne und deren Aufteilung in Arbeits- und Ruhezeiten sowie in unproduktive Wartezeiten betrachtet wurden.

Zusammenfassung

Die EU-Sozialvorschriften der Verordnung (EG) Nr. 561/2006 und der Richtlinie 2002/15/EG regeln die Lenk- und Arbeitszeiten von Kraftfahrern sowie die einzuhaltenden Lenkzeitunterbrechungen und Ruhezeiten. Obwohl diese Gesetzestexte erheblichen Einfluss auf die Tourenplanung in der Praxis haben, finden sie bisher nur ansatzweise in wenigen Verfahren und Modellen zur Tourenplanung Berücksichtigung. In diesem Beitrag werden zunächst die gesetzlichen Regelungen zu den Lenk- und Arbeitszeiten vorgestellt, deren Einhaltung für die Planung und Durchführung von Transportaufträgen im Straßenverkehr gesetzlich vorgeschrieben ist. Darauf aufbauend wird ein gemischt-ganzzahliges Planungsmodell für das Vehicle Routing Problem mit Zeitfenstern unter Beachtung der EU-Sozialvorschriften eingeführt, das sämtliche Regelungen inklusive Sonderregelungen der Verordnung (EG) Nr. 561/2006 für einen Planungszeitraum von einer Woche berücksichtigt. Anhand von Rechenexperimenten werden die Auswirkungen der Vorschriften auf die gesamte Ausführungszeit,

die Lenkdauer und die unterschiedlichen Ruhezeiten der Tourenpläne analysiert. Es zeigt sich insbesondere, dass die Minimierung der gesamten Ausführungszeit zu effizienteren Tourenplänen mit weitaus geringeren Wartezeiten führt als die Minimierung der Fahrzeit, wo hingegen die gesamte Fahrzeit nur moderat ansteigt.

Abstract

The Regulation (EC) No 561/2006 and the Directive 2002/15/EC concern the driving and working times as well as breaks and rest periods of drivers in road transport. Although the regulations have an enormous effect on vehicle routing and scheduling, only parts of them have been integrated in few solution approaches and some vehicle routing models so far. This paper starts with the presentation of the restrictions of the relevant EC regulations. Then, a mixed integer linear programming model for the vehicle routing problem with time windows including all rules of the regulations for a planning horizon of an entire week is presented. The model has been solved with CPLEX and the impacts of the regulations on the resulting vehicle schedules are analyzed by means of computational experiments.

Inhaltsverzeichnis

A.	Einleitung	3
B.	EU-Sozialvorschriften im Straßenverkehr	4
I.	Die Lenkzeitbestimmungen der Verordnung (EG) Nr. 561/2006.....	4
II.	Die Arbeitszeitbestimmungen der Richtlinie 2002/15/EG.....	6
C.	Stand der Forschung	7
D.	Modell für das VRPTW-EU.....	10
E.	Rechenexperimente zum VRPTW-EU.....	21
I.	Übersicht über die Testergebnisse.....	22
II.	Beispiel für einen Tourenplan	25
F.	Zusammenfassung und Ausblick	27
G.	Literaturverzeichnis.....	28

A. Einleitung

Die aktuell gültigen Lenkzeitvorschriften der Verordnung (EG) Nr. 561/2006 sind am 11. April 2007 in Kraft getreten. Sie ersetzen die Regelungen der Europäischen Gemeinschaft für das Straßenverkehrsgewerbe aus den Jahren 2002 und 1985, die in der neuen Verordnung präzisiert, vereinheitlicht und zum Teil verschärft werden. Darüber hinaus wurde zum selben Termin die Richtlinie 2002/15/EG zu den Arbeitszeiten von Angestellten im Güterverkehrsgewerbe im §21a des Arbeitszeitgesetzes in nationales Recht umgesetzt. Zusammen werden diese Gesetzestexte als EU-Sozialvorschriften bezeichnet.

Die Disponenten und Unternehmer im Transportgewerbe müssen gewährleisten, dass die von ihnen geplanten Touren ohne Verletzung der EU-Sozialvorschriften durchführbar sind. Die Fahrer von Kraftfahrzeugen sind verpflichtet, bei der Durchführung der ihnen vorgegebenen Touren die maximal erlaubten Lenkzeiten nicht zu überschreiten und die obligatorischen Ruhephasen einzulegen. Sowohl Fahrern als auch Disponenten drohen empfindliche Strafen bei Verstößen gegen diese Gesetze. Eine Verletzung der Vorschriften kann darüber hinaus für den Arbeitgeber des Fahrers dramatische Konsequenzen bis hin zum Entzug der Unternehmenszulassung haben, wenn derartige Verstöße regelmäßig auftreten. Durch die in der Verordnung vorgeschriebene Verwendung eines digitalen Tachographen kann eine Verletzung der Vorschriften, die ein Disponent bereits in der Planungsphase bewusst herbeigeführt, riskiert oder in Kauf genommen hat, relativ leicht von den Kontrollbehörden nachgewiesen werden.

Dennoch gibt es auf dem Softwaremarkt bislang keine Tourenplanungssysteme, die die Sozialvorschriften präzise modellieren und in die Konstruktion der Lösung einbauen. Einige dieser Systeme können bestenfalls starre Lenkzeitunterbrechungen vorsehen, erfassen aber keineswegs die flexiblen und gegenseitig voneinander abhängigen Vorschriften des komplexen Regelwerks der Verordnung. Auch in der wissenschaftlichen Literatur findet die Tourenplanung mit Pausenregelungen oder sogar die Umsetzung der konkreten Bestimmungen der EU-Sozialvorschriften bislang kaum Beachtung. Insbesondere werden in den vorliegenden Ansätzen alle Sonderregelungen der Verordnung (EG) Nr. 561/2006 vernachlässigt, wodurch der Lösungsraum erheblich eingeschränkt wird. Mathematische Optimierungsmodelle zur präzisen Abbildung der Tourenplanung unter Einbeziehung des vollständigen Regelwerks der EU-Sozialvorschriften sind in der Literatur bisher nicht bekannt.

In diesem Beitrag soll ein Optimierungsmodell für die Tourenplanung unter Beachtung der EU-Sozialvorschriften formuliert und anhand von Rechenexperimenten analysiert werden. Die durch das Modell erzielte Präzisierung und Formalisierung der Problemstellung stellt

nach unserer Auffassung eine wichtige Grundlage für die Entwicklung geeigneter Lösungsverfahren dar.

Der vorliegende Beitrag stellt im nachfolgenden zweiten Kapitel die für den Straßenverkehr in der Europäischen Union verbindlichen Regelungen zu den Lenk- und Arbeitszeiten von Kraftfahrern vor. Das dritte Kapitel gibt einen Überblick über den Stand der Forschung in diesem Bereich. Im vierten Kapitel wird ein mathematisches Modell für ein Vehicle Routing Problem mit Zeitfenstern (VRPTW) entwickelt, bei dem alle Bestimmungen der EU-Sozialvorschriften inklusive der Sonderregelungen integriert sind, die für die Planung innerhalb einer wöchentlichen Phase verbindlich sind. Im fünften Kapitel werden anhand von Testinstanzen Rechenexperimente bezüglich der Anteile von produktiven Zeiten (Lenk- und Servicezeiten) und unproduktiven Zeiten (Ruhe- und Wartezeiten) durchgeführt. Darüber hinaus wird exemplarisch ein durch Lösung des Modells resultierender Tourenplan dargestellt. Der Beitrag schließt mit einer Zusammenfassung der zentralen Ergebnisse.

B. EU-Sozialvorschriften im Straßenverkehr

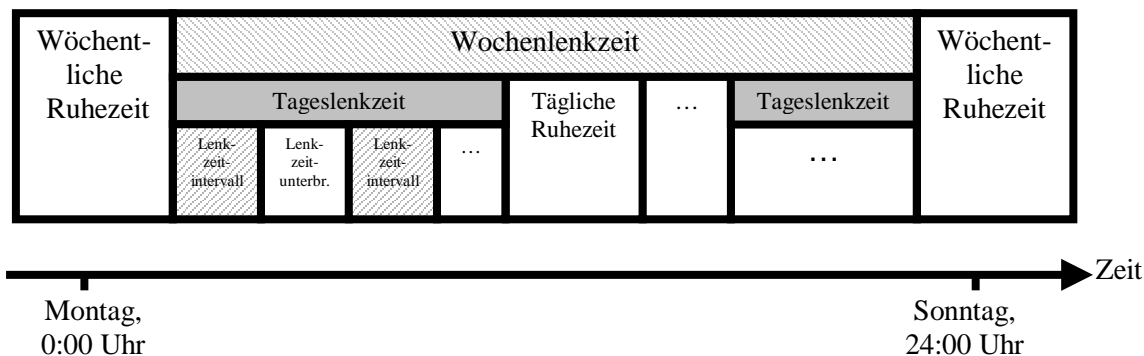
Die EU-Sozialvorschriften im Straßenverkehr umfassen im Wesentlichen zwei Gesetzestexte, deren wichtigste Bestimmungen im Folgenden kurz vorgestellt werden. Die Verordnung (EG) Nr. 561/2006 beinhaltet Vorschriften zu den Lenk- und Ruhezeiten von Kraftfahrern und die Richtlinie 2002/15/EG betrifft die Arbeitszeiten von Personen, die Fahrtätigkeiten im Bereich des Straßentransports ausüben.

I. Die Lenkzeitbestimmungen der Verordnung (EG) Nr. 561/2006

Die Verordnung (EG) Nr. 561/2006 verpflichtet Transportunternehmen, die Arbeit ihrer Angestellten so zu organisieren, dass die Fahrer die gesetzlichen Bestimmungen einhalten können. Für Verletzungen der Verordnung durch die Fahrer kann auch das Transportunternehmen zur Verantwortung gezogen werden. Darüber hinaus verlangt die Verordnung, dass jede in den Transportprozess involvierte Partei, also bspw. das Transportunternehmen, Speditionen und auch deren Auftraggeber sicherstellen, dass die Fahrpläne nicht gegen die gesetzlichen Bestimmungen verstoßen. Die Verordnung (EG) Nr. 561/2006 ist daher bei der Gestaltung von Tourenplänen in der Praxis unbedingt zu berücksichtigen. Die Bestimmungen der Ver-

ordnung erstrecken sich auf unterschiedliche, aber interdependente Zeithorizonte. Der Zusammenhang dieser Zeithorizonte wird in Abbildung 1 dargestellt.

Abbildung 1: Zusammenhang der Regelungen auf unterschiedlichen Zeithorizonten



Auf der untersten zeitlichen Ebene befinden sich die *Lenkzeitintervalle*. Ein Lenkzeitintervall ist definiert als die Zeitspanne zwischen zwei Lenkzeitunterbrechungen oder zwischen einer täglichen oder wöchentlichen Ruhezeit und einer Lenkzeitunterbrechung. Die kumulierte Lenkzeit innerhalb eines Lenkzeitintervalls darf nicht mehr als viereinhalb Stunden betragen. Nach Erreichen dieser Zeit ist eine Lenkzeitunterbrechung einzulegen. Unter einer *Lenkzeitunterbrechung* wird eine Zeitspanne von in der Regel nicht weniger als 45 Minuten verstanden, in der ein Fahrer nicht lenkt oder anderen Arbeiten nachgeht. Die Verordnung erlaubt es Fahrern jedoch, eine Lenkzeitunterbrechung in zwei Teile zu zerlegen. Der erste Teil muss mindestens 15 Minuten und der zweite Teil mindestens 30 Minuten umfassen. Mit dem Einlegen einer Lenkzeitunterbrechung endet ein Lenkzeitintervall und ein neues beginnt, auch wenn die erlaubte Lenkzeit von viereinhalb Stunden im vorigen Lenkzeitintervall nicht voll ausgeschöpft wurde.

Die *Tageslenkzeit* ist definiert als die kumulierte Lenkzeit zwischen zwei täglichen Ruhezeiten oder zwischen einer täglichen und einer wöchentlichen Ruhezeit. Sie darf im Normalfall neun Stunden nicht überschreiten. Allerdings kann die Tageslenkzeit zweimal pro Woche, also zweimal zwischen Montag 0:00 Uhr und Sonntag 24:00 Uhr, auf zehn Stunden ausgedehnt werden. Eine *tägliche Ruhezeit* ist definiert als ein Zeitintervall von in der Regel nicht weniger als elf Stunden, das der Fahrer zu seiner Erholung nutzen kann und in dem er nicht arbeitet. Die Verordnung enthält hier die Sonderregelung, dass bis zu drei tägliche Ruhezeiten zwischen zwei wöchentlichen Ruhezeiten auf nicht weniger als neun Stunden verkürzt werden können. Darüber hinaus wird festgelegt, dass eine neue tägliche Ruhezeit spätestens 24 Stunden

den nach dem Ende der vorangegangenen täglichen oder wöchentlichen Ruhezeit eingelegt werden muss.

Auf der obersten zeitlichen Ebene liegen die *Wochenlenkzeiten*. Sie sind definiert als die kumulierte Lenkzeit in einer Woche, also zwischen Montag 0:00 Uhr und Sonntag 24:00 Uhr. Die Wochenlenkzeit darf 56 Stunden nicht überschreiten. Darüber hinaus darf die gesamte Lenkzeit in je zwei aufeinander folgenden Wochen nicht mehr als 90 Stunden betragen. Das bedeutet, dass die Lenkzeit eines Fahrers in einer Woche nur dann 56 Stunden umfassen darf, wenn seine Lenkzeit sowohl in der Folgewoche als auch in der voran gegangenen Woche 34 Stunden nicht übersteigt. Wenn ein Fahrer die maximale wöchentliche Lenkzeit erreicht hat, muss er eine *wöchentliche Ruhezeit* nehmen. Diese Ruhephase muss in der Regel mindestens 45 Stunden umfassen, kann jedoch einmal innerhalb von zwei Wochen auf nicht weniger als 24 Stunden verkürzt werden. Diese Verkürzung muss kompensiert werden, indem in den Folgewochen eine tägliche oder wöchentliche Ruhezeit um die Dauer dieser Reduktion verlängert wird. Darüber hinaus schreibt die Verordnung (EG) Nr. 561/2006 vor, dass spätestens 144 Stunden nach dem Ende einer wöchentlichen Ruhezeit eine neue wöchentliche Ruhezeit eingelegt werden muss. Die Zeitspanne zwischen zwei wöchentlichen Ruhezeiten wird hier im Folgenden als „wöchentliche Phase“ bezeichnet.

II. Die Arbeitszeitbestimmungen der Richtlinie 2002/15/EG

Die Richtlinie 2002/15/EG enthält Bestimmungen zu den Arbeitszeiten von im Straßenverkehrsgewerbe beschäftigten Personen. Sie wurde in §21a des Arbeitszeitgesetzes in deutsches Recht umgesetzt. Da Lenkzeiten ebenfalls als Arbeitszeiten gelten, ergänzt diese Richtlinie die Gesetzgebung der Verordnung (EG) Nr. 561/2006. Neben Lenkzeiten fasst die Richtlinie die Zeiten zum Be- und Entladen, Zeiten, in denen der Fahrer Hilfe beim Ein- und Aussteigen der Fahrgäste leistet, Zeiten für die Reinigung und technische Wartung des Fahrzeugs und andere Zeiten, in denen das Personal nicht frei über seine Zeit verfügen kann, als Arbeitszeiten auf. Hierunter fallen beispielsweise auch Wartezeiten mit nicht vorab bekanntem Ende. Diese unvorhersehbaren Wartezeiten stellen ein erhebliches Problem für Speditionen dar, da die zum Teil sehr langen Wartezeiten bei den Kunden vollständig auf die Arbeitszeiten der Fahrer anzurechnen sind. Daher bilden häufig die Arbeitszeitbeschränkungen den eigentlichen Engpass in der Tourenplanung und sind unbedingt in Tourenplanungsmodelle und -verfahren zu integrieren.

Die Richtlinie 2002/15/EG umfasst Vorschriften zu den von den Fahrern einzuhaltenden *Pausen*. Sie schreibt vor, dass Angestellte im Straßenverkehrsgewerbe nicht mehr als sechs Stunden ohne Pause arbeiten dürfen. Liegt die tägliche Arbeitszeit unter neun Stunden, so muss sich die gesamte Pausenzeit auf mindestens 30 Minuten belaufen. Überschreitet die tägliche Arbeitszeit neun Stunden, dann muss die Pausenzeit insgesamt mindestens 45 Minuten betragen. Diese Pausenzeiten können in Abschnitte von mindestens 15 Minuten Dauer aufgeteilt werden. Natürlich können die Lenkzeitunterbrechungen der Verordnung (EG) Nr. 561/2006 auch als Pausen im Sinne der Richtlinie 2002/15/EG gewertet werden.

Darüber hinaus beschränkt die Richtlinie 2002/15/EG die *wöchentliche Arbeitszeit* auf ein Maximum von 60 Stunden. Zudem darf die durchschnittliche wöchentliche Arbeitszeit in einem Zeitraum von vier Monaten nicht mehr als 48 Stunden betragen.

C. Stand der Forschung

Obwohl es gesetzlich vorgeschrieben ist, dass die in Kapitel B vorgestellten Lenk- und Arbeitszeitvorschriften von den Disponenten der Verkehrsunternehmen bei der Planung einzuhalten sind (vgl. Verordnung (EG) Nr. 561/2006, Artikel 10), gibt es bisher kaum Ansätze zu ihrer Integration in Tourenplanungsmodelle und -verfahren. Die Berücksichtigung der Vorschriften in einem mathematischen Tourenplanungsmodell wird einerseits durch die unterschiedlichen und rekursiv definierten Grenzen der Zeithorizonte und andererseits durch die komplexen Sonderregelungen erschwert. Der Einfluss dieser Regelungen auf die Tourenplanung wird von Kopfer et al. (2007) analysiert.

Aufgrund der hohen Komplexität der EU-Sozialvorschriften finden sich bisher nur einzelne Regelungen in mathematischen Modellen wieder. So berücksichtigen Zäpfel und Bögl (2008) in ihrem Modell für ein VRPTW die Vorschrift, dass nach einer Lenkzeit von 4:30 Stunden eine Lenkzeitunterbrechung von 45 Minuten eingeplant werden muss. Die Möglichkeit, diese Unterbrechung vorzuziehen oder sie in zwei Teile aufzuspalten, bleibt unberücksichtigt. Zur Lösung ihres Modells verwenden Zäpfel und Bögl (2008) sowohl eine Tabu Search Metaheuristik als auch einen Genetischen Algorithmus.

Auch in Publikationen, die Verfahren zur Tourenplanung ohne die Beschreibung eines zugehörigen Optimierungsmodells präsentieren, finden die wichtigsten Vorschriften zur Lenk- und Pausenregelung (EU-Sozialvorschriften und die Vorschriften des US-amerikanischen Department of Transportation (DOT)) bisher nur teilweise Berücksichtigung. So werden meist

nur generelle Pausenzeiten in die Lösungsverfahren integriert, ohne die relevanten gesetzlichen Regelwerke genau zu erfüllen. Gietz (1994) schlägt für Tourenplanungsprobleme ohne Zeitfensterrestriktionen die nachträgliche Einplanung von Fahrzeitunterbrechungen in bestehende Touren vor. Für Probleme mit Kundenzeitfenstern und festem Starttermin werden Lenkzeitunterbrechungen als Scheinkunden modelliert, deren Zeitfenster der Lage der Lenkzeitunterbrechungen und deren Belieferungsdauer der Länge der Lenkzeitunterbrechungen entsprechen. Dieses Vorgehen setzt jedoch die Kenntnis der Lage der Lenkzeitunterbrechungen voraus und lässt sich daher nur bei fixiertem Starttermin anwenden. Ein ähnlicher Ansatz findet sich bei Rochat und Semet (1994). Die Pausen werden hier ebenfalls als Scheinkunden modelliert, deren Zeitfenster bei einer festen Startzeit der Touren die Einhaltung einer Frühstücks- und einer Mittagspause gewährleisten. Bei Savelsberg und Sol (1998) werden Lenkzeitunterbrechungen und Ruhezeiten in einen Branch-and-Price-Algorithmus für ein General Pickup and Delivery Problem integriert. Auch hier sind die Zeiten, in denen die Lenkzeitunterbrechungen und Ruhezeiten eingelegt werden müssen, fest vorgegeben. Cordeau et al. (2002) schlagen ein mehrstufiges Netzwerk zur Modellierung von Lenkzeitunterbrechungen vor, wobei jede Stufe Kopien der Kundenknoten enthält und innerhalb einer Stufe nur Teilstrecken ohne Pausen eingeplant werden. Auf die mathematische Modellformulierung verzichten Cordeau et al. (2002) jedoch.

Folgende Arbeiten orientieren sich an den „Hours of Service“ (HOS) des amerikanischen DOT. Xu et al. (2003) stellen ein Column Generation Verfahren und mehrere Heuristiken zur Lösung eines Pickup and Delivery Problems vor, in denen eine maximale Lenkzeit von 10 Stunden bis zur täglichen Ruhezeit von mindestens 8 Stunden, eine maximale Arbeitszeit von 15 Stunden bis zum Beginn einer achtstündigen Ruhezeit und eine maximale Tourdauer von 144 Stunden berücksichtigt werden. Die Einhaltung der Vorgaben wird durch Einführung zusätzlicher Restriktionen für die verbleibende Lenkzeit, die verbleibende Arbeitszeit und die Tourdauer gewährleistet. Campbell und Savelsberg (2004) modifizieren eine Einfügeheuristik, sodass eine maximale Schichtdauer gemäß den Richtlinien des US-amerikanischen DOT eingehalten wird. Die Lenkzeitbeschränkung auf zehn Stunden gemäß den US-amerikanischen Richtlinien lässt sich analog einarbeiten. Archetti und Savelsbergh (2009) betrachten diejenigen Vorschriften der HOS-regulations des DOT, die für einen Fahrer innerhalb eines wöchentlichen Planungszeitraums maßgebend sind. Diese Vorschriften verlangen, dass ein Fahrer spätestens nach 11 Stunden Fahrzeit und spätestens 14 Stunden nach Dienstbeginn eine Ruhepause von wenigstens 10 Stunden einplanen muss (vgl. Archetti und

Savelsbergh (2009)). Die folgenden Arbeiten orientieren sich an den EU-Sozialvorschriften. Stumpf (1998) berücksichtigt Lenkzeitunterbrechungen in einem Threshold-Accepting Verfahren, einem Sintflut-Algorithmus und einem Tabu Search Verfahren, indem sie bei der Generierung der Touren die Lenkzeiten auf den Teilstrecken bis zu dem jeweiligen Knoten kumuliert und bei Überschreitung der maximal zulässigen Lenkzeit eine Unterbrechung einplant. Goel und Gruhn (2005) stellen einen Large Neighbourhood Search Algorithmus zur Lösung eines Vehicle Routing Problems unter Berücksichtigung von maximalen täglichen Lenkzeiten nach der bis 2007 gültigen Verordnung (EWG) Nr. 3820/85 vor. Darüber hinaus stellen Goel (2007), Goel und Gruhn (2007) sowie Goel (2009) ein verallgemeinertes Vehicle Routing Problem vor, das um die Beachtung ausgewählter Sozialvorschriften erweitert wird. Es berücksichtigt die Einhaltung von Fahrtunterbrechungen von 45 Minuten Dauer nach einer Lenkzeit von nicht mehr als 4:30 Stunden und die Einhaltung einer maximalen täglichen Lenkzeit von neun Stunden und einer wöchentlichen Lenkzeit von nicht mehr als 56 Stunden. Alle Sonderregelungen sowie die wochenübergreifenden Bestimmungen der Verordnung (EG) Nr. 561/2006 werden jedoch vernachlässigt. Um auch wochenübergreifende Vorschriften berücksichtigen zu können, entwickeln Meyer und Kopfer (2008) ein Verfahren zur Zuteilung der Kundenaufträge zu Planungszeiträumen in einem der eigentlichen Tourenplanung vorgelagerten Planungsschritt. Meyer et al. (2009) analysieren das Problem der Einbeziehung der EU-Sozialvorschriften in die Tourenplanung anhand eines Frameworks zur verteilten Entscheidungsfindung zwischen Fahrern und Disponenten. Untersucht wird ein Szenario, bei dem der Disponent die Bildung von Touren (d.h. das Clustern von Kundenaufträgen) vornimmt und der Fahrer die Routen- und Pausenplanung übernimmt. Es werden zwei unterschiedliche Antizipationsfunktionen für den Planungsschritt des Disponenten vorgeschlagen, analysiert und aufgrund von Rechenexperimenten evaluiert. Das vermutlich erste heuristische Verfahren, das alle Vorschriften der Verordnung (EG) Nr. 561/2006 über Lenk- und Ruhezeiten berücksichtigt und die Arbeitszeitbestimmungen der Richtlinie 2002/15/EG integriert, stammt von Kok et al. (2009).

Die meisten existierenden Ansätze zur Tourenplanung unter Berücksichtigung von Lenkzeitvorschriften in Anlehnung an die EU-Sozialvorschriften werden durch heuristische Verfahren realisiert, die suboptimale Lösungen generieren. Ferner existieren bisher keine mathematischen Modelle, die das Planungsproblem präzise formulieren. Deshalb wird im folgenden Kapitel eine vollständige Modellformulierung für ein Vehicle Routing Problem mit Zeitfens-

tern unter Einbeziehung aller Bestimmungen der EU-Sozialvorschriften (VRPTW-EU) präsentiert.

D. Modell für das VRPTW-EU

Ausgangspunkt für die nachfolgende Modellierung des Problems der kombinierten Touren- und Lenkzeitplanung ist ein Modell für das VRPTW in der positionsorientierten Formulierung. Im Unterschied zu der weit verbreiteten, üblichen „wegorientierten“ Formulierung des VRPTW (z.B. Cordeau et al., 2002, S. 158) kennt das positionsorientierte Modell zusätzlich die Position q , an der ein Ort j innerhalb einer Tour bedient wird (Dethloff, 1994, S. 57-66). Diese Formulierung erlaubt es, für beliebige Teilstrecken einer Tour die benötigten Fahrzeiten zu berechnen, was für die Einplanung von Lenkzeitunterbrechungen und von täglichen Ruhezeiten unverzichtbar ist.

Dem Modell liegen folgende Annahmen zugrunde: Die Planung erfolgt für eine wöchentliche Phase. D. h. sie kann bis zu einer wöchentlichen Phase ausgedehnt werden, also für den Zeitraum zwischen zwei wöchentlichen Ruhezeiten. Die Beschränkung auf eine Woche lässt sich damit begründen, dass Tourenpläne in der Regel für Zeiträume von nicht mehr als einer Woche aufgestellt und die wöchentlichen Ruhezeiten am Wochenende eingelegt werden. Jedoch bietet das Modell die Möglichkeit, auch wochenübergreifende Regelungen wie die Beschränkung der kumulierten Lenkzeit von zwei aufeinander folgenden Wochen auf 90 Stunden zu integrieren. Alle Fahrzeiten werden als feste Werte angenommen, d.h. es handelt sich um ein deterministisches Tourenplanungsmodell. In dem Modell wird als Zeiteinheit eine Stunde verwendet. Alle Aufträge sind vorab bekannt und es treffen keine neuen Aufträge in der Planungsperiode ein. Die Fahrer sind fest einem Fahrzeug zugeordnet, sodass sich die Lenkzeit eines Fahrers und die Fahrzeit seines Fahrzeugs entsprechen. Vom Problem des Crew Scheduling wird in diesem Modell also abgesehen.

Eine typische Problemstellung der Tourenplanung, bei der für einen Planungszeitraum von mehreren Tagen alle Transportaufträge im Vorhinein bekannt sind, ist beispielsweise durch das Periodic Vehicle Routing Problem (PVRP) gegeben (vgl. Cordeau et al. (1997)). Bei diesem Problem können Kunden an bestimmten, von diesen Kunden vorgegebenen Tagen in einer zuvor festgelegten Frequenz beliefert werden. Die Planungsaufgabe des PVRP besteht in der simultanen Auswahl von Besuchskombinationen für jeden Kunden und in der Tourenplanung für jeden Tag des Planungshorizonts. Derartige Szenarien treten z.B. in der Distribu-

tionslogistik von Lebensmittelketten und bei der Rückführung von Leergut auf oder in abgewandelter Form in der Automobilindustrie bei einem Milkrun im Rahmen der Beschaffungslogistik.

Das im Folgenden vorgestellte Modell kann nicht nur zur vollständigen deterministischen Planung aller Aufträge einer wöchentlichen Planung heran gezogen werden. Kürzere Phasen können ebenso mit diesem Modell behandelt werden. Dazu müssen lediglich die Restriktionen weggelassen werden, die aufgrund der Kürze des Planungshorizonts nicht relevant sind. Dadurch wird das Modell u.U. wesentlich vereinfacht.

Das Modell dient u.a. dazu zu zeigen, dass und wie die Regeln der EU-Sozialvorschriften in die Modellierung der Tourenplanung integriert werden können und dass die resultierende Erweiterung so formuliert werden kann, dass sie zu einem gemischt-ganzzahligem Modell führt. Die Erweiterung wird an dem VRPTW vorgenommen, da das VRPTW zu den am besten untersuchten Problemstellungen der Tourenplanung gehört. Doch die Erweiterung des Modells um die EU-Sozialvorschriften kann in analoger Weise auch für andere Modelle der Tourenplanung erfolgen. Von besonders großem Interesse ist hierbei die Erweiterung von Tourenplanungsproblemen mit Wiedereinsatzplanung, da die Regeln der Sozialvorschriften unabhängig davon gelten, ob die Ruhepausen unterwegs oder am Heimatstandort eingelegt werden.

Zur Formulierung des Modells werden die folgenden Mengen eingeführt.

Mengen:

R: Menge $R = \{i \mid i = 0, \dots, n+1\}$ der Orte i mit

$i = 0$: Depot

$i = 1, \dots, n$: Kundenorte

$i = n+1$: Depot

P: Menge $P = \{i \mid i = 1, \dots, n\}$ der Kundenorte

K: Menge der Fahrzeuge mit $K = \{k \mid k=1, \dots, k^{\max}\}$

Q: Menge der Positionen q , die ein Ort innerhalb einer Tour annehmen kann. Dabei liegt das Depot zu Beginn einer Route ($i = 0$) immer an Position 1 einer jeden Route.

$Q(i,j)$: Menge der Positionen q , die Ort j annehmen darf, wenn er von Ort i aus angefahren wird. Dabei gilt $Q(0,j) = \{2\}$, d.h. ein Ort, der vom Depot aus angefahren wird, muss immer Position 2 der Route einnehmen. Darüber hinaus ist zu fordern, dass $2 \notin Q(i,0)$, also das Depot selbst nicht an Position 2 einer Route liegen kann. Das Depot wird von einem Fahrzeug k wieder an Position $q' + 1$ angefahren, wenn q' die Position des letzten Kunden j auf der Route von Fahrzeug k ist.

Die positionsorientierte Modellierung des VRPTW verwendet die folgenden binären Entscheidungsvariablen $w_{ijq}^{(k)}$ und die nachfolgend aufgeführten weiteren Variablen und Daten. Dabei steht [ME] bzw. [ZE] für die Dimension Mengeneinheiten bzw. Zeiteinheiten.

$$w_{ijq}^{(k)} = \begin{cases} 1, & \text{wenn ein Fahrzeug } k \in K \text{ von Ort } i \in R \text{ zu Ort } j \in R \text{ fährt, so dass Ort } j \text{ an} \\ & \text{Position } q \in Q(i, j) \text{ der Tour von Fahrzeug } k \text{ steht} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

Weitere Variable:

$P15_{ij}^{(k)}$: Anzahl der 15 - minütigen Pausen, die das Fahrzeug $k \in K$ zwischen den Orten $i \in R$ und $j \in R$ einlegt, falls der Ort j an Position $q \in Q(i, j)$ besucht wird

$P30_{ij}^{(k)}$: Anzahl der 30 - minütigen Pausen, die das Fahrzeug $k \in K$ zwischen den Orten $i \in R$ und $j \in R$ einlegt, falls der Ort j an Position $q \in Q(i, j)$ besucht wird

$$tp_{ij}^{(k)} = \begin{cases} 1, & \text{falls für das Fahrzeug } k \in K \text{ eine tägliche Ruhezeit zwischen den Orten} \\ & i \in R \text{ und } j \in R \text{ an der Position } q \in Q(i, j) \text{ anfällt} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

$$dred_{ij}^{(k)} = \begin{cases} 1, & \text{falls zwischen den Orten } i \in R \text{ und } j \in R \text{ auf der Tour von Fahrzeug} \\ & k \in K \text{ eine reduzierte tägliche Ruhezeit wahrgenommen wird} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

$$bdrive_{ij}^{(k)} : \begin{cases} 1, \text{ falls zwischen den Orten } i \in R \text{ und } j \in R \text{ auf der Tour von Fahrzeug} \\ k \in K \text{ an der Position } q \in Q(i, j) \text{ die Ausweitung der Tageslenkzeit auf} \\ 10 \text{ Stunden wahrgenommen wird} \\ 0, \text{ sonst} \end{cases}$$

$tt_{ij}^{(k)}$: Reisezeit von Fahrzeug k zwischen den Orten $i \in R$ und $j \in R$ [ZE]

$TR_{ijq}^{(k)}$: Dauer der täglichen Ruhezeit zwischen den Orten $i \in R$ und $j \in R$, falls j auf der Position q der Route von Fahrzeug k erreicht wird [ZE]

$GZ_{q'q''}^{(k)}$: Lenkzeit auf einer Teilstrecke einer Route vom Knoten an Position q' bis zum Knoten an Position q'' [ZE]

f : Gesamte Ausführungszeit des Tourenplans [ZE]

t_i : Ankunftszeit im Kundenort $i \in P$ [ZE]

t_k^0 : Abfahrtszeit des Fahrzeugs $k \in K$ vom Depot [ZE]

$t_k^{\text{rück}}$: Rückkehrzeit des Fahrzeugs $k \in K$ zum Depot [ZE]

Daten:

d_{ij} : Fahrzeit auf dem kürzesten Weg von Ort $i \in R$ nach Ort $j \in R$, $j \neq i$ und $(i, j) \neq (0, n+1)$ [ZE]

s_i : Servicezeit im Ort $i \in R$ [ZE]

a_i : Beginn des Belieferungszeitfensters in Ort $i \in P$ [ZE]

e_i : Ende des Belieferungszeitfensters in Ort $i \in P$ [ZE]

l_i : Umfang des zu Ort $i \in P$ zu transportierenden Auftrags [ME]

C : Kapazität eines jeden Fahrzeugs [ME]

n : Anzahl der Aufträge

k^{\max} : Anzahl der Fahrzeuge

M : Hinreichend große Zahl, z.B. $M = \sum_{i \in R} \sum_{j \in R} d_{ij}$

$WlZ_{w-1}^{(k)}$: Wochenlenkzeit des Fahrers $k \in K$ in der vergangenen Woche [ZE]

Δw : Abweichung der wöchentlichen Arbeitszeit von der maximal erlaubten Arbeitszeit von 60 Stunden [ZE]

Die Zielsetzung des VRPTW-EU besteht in der Minimierung der gesamten Dauer f des Tourenplans, bestehend aus der Summe der Einsatzzeit aller Fahrzeuge (1).

$$\text{Min } f = \sum_{k \in K} (t_k^{\text{rück}} - t_k^0) \quad (1)$$

Mit den obigen Mengen, Variablen und Daten ergeben sich folgende Restriktionen des VRPTW-EU:

$$\sum_{i \in R} \sum_{q \in Q(i,j)} \sum_{k \in K} w_{ijq}^{(k)} = 1 \quad \forall j \in P \quad (2)$$

$$\sum_{j \in P} w_{0j2}^{(k)} = \sum_{i \in P} \sum_{q \in Q(i,0)} w_{i0q}^{(k)} \quad \forall k \in K \quad (3)$$

$$\sum_{i \in R} w_{isq}^{(k)} = \sum_{j \in R} w_{sj,q+1}^{(k)} \quad \forall s \in P, q \in Q, k \in K \quad (4)$$

$$\sum_{i \in R} \sum_{j \in P} \sum_{q \in Q(i,j)} l_j w_{ijq}^{(k)} \leq C \quad \forall k \in K \quad (5)$$

Zusammen mit der oben getroffenen Festlegung der Mengen R , P , K , $Q(i,j)$ sowie Q ergeben sich folgende Bedeutungen der Nebenbedingungen. Gleichung (2) stellt sicher, dass jeder Kundenort j von genau einem Fahrzeug erreicht werden muss. Die Restriktion (3) gewährleistet, dass jedes eingeplante Fahrzeug in das Depot zurückkehren muss. Gleichung (4) stellt die Konsistenz der Positionsbestimmungen sicher und besagt: Wird ein Ort s mit Fahrzeug k an Position q erreicht, dann muss er so verlassen werden, dass der von s angefahrne Ort j die Position $q+1$ annimmt. Letztlich stellt Restriktion (5) sicher, dass die zu den Kunden einer Tour zu transportierenden Ladungen die Kapazität des Fahrzeugs nicht überschreiten.

Nachdem diese für jedes Tourenplanungsproblem grundlegenden Restriktionen vorgestellt wurden, werden im Folgenden die Berechnungen der Reisezeiten und der Zeitfenster dargestellt.

$$tt_{ij}^{(k)} = d_{ij} + \sum_{q \in Q(i,j)} (0,25 * P15_{ijq}^{(k)} + 0,5 * P30_{ijq}^{(k)} + TR_{ijq}^{(k)}) \quad \forall i \in R, j \in R, k \in K \quad (6)$$

Die Gleichung (6) dient der Berechnung der Reisezeiten $tt_{ij}^{(k)}$ zwischen zwei beliebigen Orten i und j . Diese Reisezeiten setzen sich zusammen aus den Fahrzeiten d_{ij} sowie den Zeiten für 15-minütige und 30-minütige Pausen und den Dauern der täglichen Ruhezeiten. In dieser Modellformulierung werden keine exakten Zeitpunkte für die Lage der Lenkzeitunterbrechungen und Ruhezeiten bestimmt. Diese werden hingegen als Verlängerungen der Reisezeiten zwischen zwei Orten berücksichtigt und wirken sich als Verschiebungen der Ankunftszeiten bei den nachfolgenden Kundenknoten aus. Dadurch wird die Entscheidung, wann genau eine Lenkzeitunterbrechung oder Ruhezeit einzulegen ist, in die Verantwortung des Fahrers gelegt. Gleichzeitig wird jedoch sichergestellt, dass es für den Fahrer möglich ist, die gesetzlichen Vorschriften einzuhalten.

Die Restriktionen (7) und (8) stellen die Bedingungen für die Ankunftszeiten an den Kundenorten und Restriktion (9) die Bedingung für die Ankunftszeit im Depot dar, wenn die entsprechende Strecke von Fahrzeug k genutzt wird. Die Restriktionen (10) und (11) gewährleisten, dass diese innerhalb der zulässigen Zeitfenster liegen.

$$t_j \geq t_i + s_i + tt_{ij}^{(k)} - M(1 - \sum_{q \in Q(i,j)} w_{ijq}^{(k)}) \quad \forall i \in P, j \in P, k \in K \quad (7)$$

$$t_j \geq t_k^0 + tt_{0j}^{(k)} - M(1 - \sum_{q \in Q(0,j)} w_{0jq}^{(k)}) \quad \forall j \in P, k \in K \quad (8)$$

$$t_k^{rück} \geq t_i + s_i + tt_{i0}^{(k)} - M(1 - \sum_{q \in Q(i,0)} w_{i0q}^{(k)}) \quad \forall i \in P, k \in K \quad (9)$$

$$t_i \geq a_i \quad \forall i \in P \quad (10)$$

$$t_i + s_i \leq e_i \quad \forall i \in P \quad (11)$$

Um sicherzustellen, dass nach einer bestimmten Fahrzeit Lenkzeitunterbrechungen und tägliche Ruhezeiten eingelegt werden, muss die Lenkzeit eines Fahrers auf allen Teilstrecken seiner Route ermittelt werden. Diese Lenkzeit von einem Ort i an Position q' bis zu Ort j an Position q'' (mit $q' < q''$) einer Route wird nach Gleichung (12) berechnet.

$$GZ_{q'q''}^{(k)} = \sum_{q=q'}^{q''} \sum_{j \in R} \sum_{i \in R} d_{ij} w_{ijq}^{(k)} \quad \forall k \in K \quad (12)$$

Die Restriktionen (13) bis (16) stellen die Einplanung von Lenkzeitunterbrechungen sicher. Restriktion (13) fordert, dass die kumulierte Fahrzeit von einer Position q' zur Position q'' für jedes Fahrzeug nicht länger als 4:30 Stunden sein darf, ohne dass eine Lenkzeitunterbrechung eingelegt wird. Hierbei markiert eine 30-minütige Pause als zweiter Teil einer Lenkzeitunterbrechung das Ende eines Lenkzeitintervalls. Für jede eingelegte Lenkzeitunterbrechung verlängert sich die zulässige Lenkzeit des Fahrers um weitere viereinhalb Stunden. Die Restriktionen werden jedoch relaxiert, wenn eine tägliche Ruhezeit auf der Teilstrecke eingelegt wird.

$$GZ_{q'q''}^{(k)} \leq 4,5 + 4,5 \left(\sum_{q=q'}^{q''} \sum_{j \in R} \sum_{i \in R} P30_{ijq}^{(k)} \right) + M \left(\sum_{q=q'}^{q''} \sum_{j \in R} \sum_{i \in R} tp_{ijq}^{(k)} \right) \quad \forall q \in Q, k \in K \quad (13)$$

Die Restriktion (14) stellt sicher, dass auf jeder Teilstrecke vom Depot zu einem Kundenort immer mindestens so viele 15-minütige Pausen liegen wie es Lenkzeitunterbrechungen in Form von 30-minütigen Pausen gibt, da erst die Kombination einer 15- und 30-minütigen Pause die Anforderungen an eine vollständige Lenkzeitunterbrechung erfüllt. Die Restriktion (15) fordert darüber hinaus, dass nur eine 15-minütige Pause mehr als Teil einer Lenkzeitunterbrechung gezählt werden darf, als es Lenkzeitunterbrechungen auf dieser beim Depot beginnenden Teilstrecke gibt. Allerdings müssen die beiden Anzahlen übereinstimmen, wenn eine tägliche Ruhezeit eingelegt wird, um zu verhindern, dass der 15-minütige Teil einer Lenkzeitunterbrechung vor und der 30-minütige Teil nach der täglichen Ruhezeit eingeplant wird. Die Aufteilung der Lenkzeitunterbrechungen in zwei Teile schließt natürlich nicht aus, dass eine zusammenhängende Pause von 45 Minuten genommen werden kann. Dies ist möglich, wenn beide Teile einer Lenkzeitunterbrechung auf einer Teilstrecke liegen. Der Fahrer kann hier autonom entscheiden, ob er die beiden Teile direkt in Folge oder getrennt voneinander nimmt. In Restriktion (16) wird festgelegt, dass die Pausen nur auf verwendeten Strecken eingeplant werden dürfen.

$$\sum_{q=1}^{q'} \sum_{j \in R} \sum_{i \in R} P30_{ijq}^{(k)} - \sum_{q=1}^{q'} \sum_{j \in R} \sum_{i \in R} P15_{ijq}^{(k)} \leq 0 \quad \forall q' \in Q, k \in K \quad (14)$$

$$\sum_{q=1}^{q'} \sum_{j \in R} \sum_{i \in R} P30_{ijq}^{(k)} + 1 - \sum_{j \in R} \sum_{i \in R} tp_{ijq}^{(k)} \geq \sum_{q=1}^{q'} \sum_{j \in R} \sum_{i \in R} P15_{ijq}^{(k)} \quad \forall q' \in Q, k \in K \quad (15)$$

$$P15_{ijq}^{(k)} + P30_{ijq}^{(k)} \leq M * w_{ijq}^{(k)} \quad \forall i, j \in R, q \in Q(i, j), k \in K \quad (16)$$

Auf der mittleren zeitlichen Planungsebene sind Tageslenkzeiten und tägliche Ruhezeiten zu berücksichtigen. Restriktion (17) besagt, dass es keine Teilstrecken einer Tour geben darf, deren Dauer mehr als neun Stunden beträgt, wenn nicht eine tägliche Ruhezeit eingelegt wird. Für jede eingelegte tägliche Ruhezeit erhöht sich die mögliche Länge der Tour um weitere neun Stunden. Darüber hinaus findet hier die Sonderregelung Berücksichtigung, dass die Tageslenkzeit um eine Stunde ausgedehnt werden darf, indem die Variable $bdrive_{ijq}^{(k)}$ den Wert 1 annimmt. Die Nebenbedingung (18) stellt sicher, dass ein Fahrer diese Erweiterung der Tageslenkzeit nicht mehr als zweimal pro Woche in Anspruch nehmen kann, wie es die Verord-

nung (EG) Nr. 561/2006 vorsieht. Zusätzlich gewährleistet (19), dass nur eine Variable $bdrive_{ijq}^{(k)}$ zwischen zwei täglichen Ruhezeiten den Wert 1 annehmen kann, sodass die Tageslenkzeit in keinem Fall zehn Stunden überschreiten kann. Die Nebenbedingung (20) legt die Länge der täglichen Ruhezeiten fest, indem sie fordert, dass eine tägliche Ruhezeit in der Regel nicht weniger als elf Stunden beträgt, jedoch um zwei Stunden auf nicht weniger als neun Stunden verkürzt werden kann, wenn die Variable $dred_{ij}^{(k)}$ den Wert 1 annimmt. Die Nebenbedingung (21) fordert darüber hinaus, dass dies im Einklang mit der Verordnung (EG) Nr. 561/2006 maximal dreimal in einer wöchentlichen Phase geschehen darf.

$$\sum_{q=q'}^{q''} \sum_{j \in R} \sum_{i \in R} d_{ij} w_{ijq}^{(k)} \leq 9 + 9 \left(\sum_{q=q'}^{q''} \sum_{j \in R} \sum_{i \in R} tp_{ijq}^{(k)} \right) + \sum_{q=q'}^{q''} \sum_{j \in R} \sum_{i \in R} 1 * bdrive_{ijq}^{(k)} \quad (17)$$

$$\forall q', q'' \in Q, q' < q'', k \in K$$

$$\sum_{i \in R} \sum_{j \in R} \sum_{q \in Q(i, j)} bdrive_{ijq}^{(k)} \leq 2 \quad \forall k \in K \quad (18)$$

$$\sum_{q=q'}^{q''} bdrive_{ijq}^{(k)} - \sum_{q=q'}^{q''} tp_{ijq}^{(k)} \leq 1 \quad \forall i, j \in R, q', q'' \in Q, q' < q'', k \in K \quad (19)$$

$$TR_{ijq}^{(k)} \geq 11 - 2dred_{ij}^{(k)} - M(1 - tp_{ijq}^{(k)}) \quad \forall i, j \in R, q \in Q(i, j), k \in K \quad (20)$$

$$\sum_{i \in R} \sum_{i \in R} dred_{ij}^{(k)} \leq 3 \quad k \in K \quad (21)$$

Die Nebenbedingungen (22) und (23) besagen, dass die zeitliche Differenz zwischen der Ankunftszeit an einem beliebigen Knoten j und der Startzeit der Tour im Depot nicht mehr als 24 Stunden betragen darf, wenn nicht tägliche Ruhezeiten eingelegt werden. Für jede tägliche Ruhezeit darf die Tourdauer um 24 Stunden ausgedehnt werden.

$$t_{j'} - t_k^0 \leq 24 + M \left(1 - \sum_{i \in R} \sum_{q=1}^{q'} w_{ij'q}^{(k)} \right) + 24 \sum_{i \in R} \sum_{j \in R} \sum_{q=1}^{q'} tp_{ijq}^{(k)} \quad \forall j' \in P, q' \in Q, k \in K \quad (22)$$

$$t_k^{rück} - t_k^0 \leq 24 + 24 \sum_{i \in R} \sum_{j \in R} \sum_{q \in Q(i,j)} tp_{ijq}^{(k)} \quad \forall k \in K \quad (23)$$

Die Bedingungen (24) und (25) stellen letztlich sicher, dass Erweiterungen der Lenkzeiten, tägliche Ruhezeiten sowie Verkürzungen der täglichen Ruhezeiten nur auf in der Lösung verwendeten Strecken eingelegt werden dürfen.

$$bdrive_{ijq}^{(k)} + tp_{ijq}^{(k)} \leq 2w_{ijq}^{(k)} \quad \forall i, j \in R, q \in Q(i, j), k \in K \quad (24)$$

$$dred_{ij}^{(k)} \leq \sum_{q \in Q(i,j)} w_{ijq}^{(k)} \quad \forall i, j \in R, k \in K \quad (25)$$

Das bis hierher vorgestellte Planungsmodell ist in der Lage, alle Vorschriften der Verordnung (EG) Nr. 561/2006 innerhalb einer wöchentlichen Phase zu berücksichtigen. Darüber hinaus werden im Folgenden auch wochenübergreifende Regelungen in die Modellierung einbezogen.

Die Restriktion (26) besagt, dass die wöchentliche Lenkzeit eines Fahrers nicht mehr als 56 Stunden betragen darf. Zusätzlich berücksichtigt Restriktion (27) die bereits in der Vorwoche geleistete Lenkzeit $Wlz_{w-1}^{(k)}$ und beschränkt die in zwei Folgewochen geleisteten Lenkzeiten auf 90 Stunden.

$$\sum_{i \in R} \sum_{j \in R} \sum_{q \in Q(i,j)} d_{ij} w_{ijq}^{(k)} \leq 56 \quad \forall k \in K \quad (26)$$

$$\sum_{i \in R} \sum_{j \in R} \sum_{q \in Q(i,j)} d_{ij} w_{ijq}^{(k)} \leq 90 - Wlz_{w-1}^{(k)} \quad \forall k \in K \quad (27)$$

Zusätzlich zu den Lenkzeitbestimmungen der Verordnung (EG) Nr. 561/2006 werden im Folgenden die Arbeitszeitbestimmungen der Richtlinie 2002/15/EG in das Tourenplanungsmodell eingearbeitet. Wie schon erwähnt, erfüllen die Lenkzeitunterbrechungen nach Verordnung (EG) Nr. 561/2006 auch die Anforderungen an Pausen im Sinne der Richtlinie 2002/15/EG, sodass keine neuen Variablen für diese Pausen benötigt werden, sondern ledig-

lich weitere Anforderungen an die Realisationen der Variablen $P15_{ijq}^{(k)}$ und $P30_{ijq}^{(k)}$ zu stellen sind. So fordert Nebenbedingung (28), dass auf allen Teilstrecken einer Tour nach einer Arbeitszeit von nicht mehr als 6 Stunden eine 30-minütige Pause einzulegen ist, wenn nicht eine tägliche Ruhezeit genommen wird. Die Arbeitszeit setzt sich hier aus den Lenkzeiten sowie den Servicezeiten an den Kundenorten zusammen. Weitere Bestandteile der Arbeitszeiten im Sinne der Richtlinie 2002/15/EG sind in diesem Modell nicht zu berücksichtigen, da bspw. in einem deterministischen Modell alle Wartezeiten vorab bekannt und deshalb nicht als Arbeitszeiten anzusehen sind. Die Nebenbedingung (29) fordert darüber hinaus, dass auf allen Teilstrecken, deren Dauer 9 Stunden überschreitet, eine weitere 15-minütige Pause einzulegen ist.

$$\sum_{q=q'}^{q''} \sum_{j \in R} \sum_{i \in R} (d_{ij} + s_i) w_{ijq}^{(k)} \leq 6 + 6 \sum_{q=q'}^{q''} \sum_{j \in R} \sum_{i \in R} P30_{ijq}^{(k)} + M \sum_{q=q'}^{q''} \sum_{j \in R} \sum_{i \in R} tp_{ijq}^{(k)} \quad (28)$$

$$\forall q', q'' \in Q, q' < q'', k \in K$$

$$\sum_{q=q'}^{q''} \sum_{j \in R} \sum_{i \in R} (d_{ij} + s_i) w_{ijq}^{(k)} \leq 9 + 9 \sum_{q=q'}^{q''} \sum_{j \in R} \sum_{i \in R} P15_{ijq}^{(k)} + M \sum_{q=q'}^{q''} \sum_{j \in R} \sum_{i \in R} tp_{ijq}^{(k)} \quad (29)$$

$$\forall q', q'' \in Q, q' < q'', k \in K$$

Die Nebenbedingung (30) betrifft die wöchentliche Arbeitszeit von Kraftfahrern. Diese wird auf maximal 60 Stunden beschränkt. Jedoch bietet der Term Δw die Möglichkeit, die wöchentliche Arbeitszeit weiter zu reduzieren, um damit der Vorschrift zu genügen, dass die durchschnittliche Arbeitszeit langfristig nicht mehr als 48 Stunden betragen darf. Wird also bspw. $\Delta w = 12$ gesetzt, so erfüllt der Tourenplan auch die langfristige Beschränkung der wöchentlichen Arbeitszeit auf 48 Stunden.

$$\sum_{q \in Q(i,j)} \sum_{j \in R} \sum_{i \in R} (d_{ij} + s_i) w_{ijq}^{(k)} \leq 60 - \Delta w \quad \forall k \in K \quad (30)$$

Das Modell (1) bis (30) ermöglicht die vollständige Abbildung aller für die Tourenplanung relevanten Regelungen der EU-Sozialvorschriften in einem mathematischen Planungsmodell inklusive aller Sonderregelungen für eine wöchentliche Phase. Damit ist gezeigt, dass sämtli-

che Regeln der gesetzlichen Vorschriften der EU, die für eine Planung über einen Zeitraum von bis zu einer wöchentlichen Phase relevant sind, in einem gemischt-ganzzahligen Modell formuliert werden können. Durch leichte Modifikation des Modells, nämlich durch die Substitution der Variablen $P15_{ijq}^{(k)}$ und $P30_{ijq}^{(k)}$ durch eine Variable $P45_{ijq}^{(k)}$ für 45-minütige Lenkzeitunterbrechungen sowie durch das Auslassen der Variablen $bdrive_{ij}^{(k)}$ und $dred_{ij}^{(k)}$ lässt sich das Modell so modifizieren, dass Sonderregelungen nicht mehr berücksichtigt werden. Das Modell umfasst dann die Standardregelungen der Verordnung (EG) Nr. 561/2006 sowie die Arbeitszeitbestimmungen der Richtlinie 2002/15/EG.

E. Rechenexperimente zum VRPTW-EU

Um das vorgestellte Modell zur kombinierten Touren- und Lenkzeitplanung zu evaluieren und die Eigenschaften der resultierenden optimalen Tourenpläne zu analysieren, wurde das Modell mithilfe der Optimierungssoftware CPLEX Version 11 gelöst. Zur Ausführung der Experimente wurde das obige Modell ohne Sonderregelungen herangezogen, da für das vollständige Modell die Rechenzeiten extrem ansteigen und sich außerdem die Effekte der Einbeziehung der Sozialvorschriften mit dem Modell ohne Sonderregelungen ebenso gut analysieren lassen. Um das Modell effizienter lösen zu können, wurde als untere Schranke für die Zielfunktion die Restriktion (31) eingeführt, die besagt, dass der Zielwert, also die gesamte Ausführungszeit des Tourenplans, nicht geringer sein kann als die Summe der Arbeits- und Pausenzeiten für alle Fahrzeuge. Außerdem wurde die Menge $Q(i,j)$ durch Verwendung logischer Tests reduziert, ohne dass dadurch zulässige Lösungen aus dem Lösungsraum ausgeschlossen wurden.

$$\sum_{k \in K} (t_k^{rück} - t_k^0) \geq \sum_{i \in R} \sum_{j \in R} \sum_{q \in Q(i,j)} \sum_{k \in K} ((d_{ij} + s_i) w_{ijq}^{(k)} + 0,75 * P45_{ijq}^{(k)} + TR_{ijq}^{(k)}) \quad (31)$$

Für die Einplanung der Lenk- und Ruhezeiten sind realistische Fahrzeiten, die Lenkzeitunterbrechungen und tägliche Ruhepausen bedingen, von grundlegender Bedeutung, um inhaltvolle Aussagen ableiten zu können. Die von Solomon (1987) für das VRPTW vorgestellten Testinstanzen sind auch in der von Goel (2009) abgewandelten Form für das obige Modell nur wenig aussagekräftig, da diese auf Distanzen in einem künstlichen Raum mit der Dimension

100 x 100 Einheiten beruhen. Deshalb wurden zur Evaluation des Modells von uns eigene Testinstanzen auf Basis reeller Transportrelationen generiert.

Die von uns verwendeten Testinstanzen wurden wie folgt generiert. Es wurden 20 Orte in Deutschland ausgewählt. Um eine ausreichend große räumliche Streuung zu erreichen, wurden alle 16 Landeshauptstädte und Stadtstaaten verwendet, also Berlin (B), Bremen (HB), Dresden (DD), Düsseldorf (D), Erfurt (EF), Hamburg (HH), Hannover (H), Kiel (KI), Magdeburg (MD), Mainz (MZ), München (M), Potsdam (P), Saarbrücken (SB), Schwerin (SN), Stuttgart (S) und Wiesbaden (WI). Zusätzlich wurden Köln (K), Frankfurt am Main (F), Essen (E) und Duisburg (DU) einbezogen, da sie zu den größten Städten der Bundesrepublik gehören und darüber hinaus durch diese Wahl eine Clusterbildung in Nordrhein-Westfalen möglich wird.

Die Distanzen wurden anhand der Geokoordinaten aller 20 Orte ermittelt. Zur Berechnung der Fahrzeiten wurde eine Durchschnittsgeschwindigkeit von 65 km/h zugrunde gelegt. Die Nachfrage für jeden Kundenort wurde als gleichverteilte Zufallszahl zwischen 1 und 10 generiert und die Kapazität der Fahrzeuge ist auf 50 Einheiten beschränkt. Die Zeitfenster in den Kundenorten wurden analog zum Vorgehen von Solomon (1987) ermittelt, indem der früheste und späteste mögliche Belieferungstermin in Abhängigkeit von dem Zeitfensteranfang und -ende des Depots bestimmt wurde. In diesem Intervall wurde das Zentrum des Zeitfensters als gleichverteilte Zufallszahl zwischen 0 und 120 Stunden gewählt. Somit umfasst der Planungszeitraum eine Arbeitswoche von Montag um 0:00 Uhr bis Freitag um 24:00 Uhr. Die Dauer des Zeitfensters wurde daraufhin als normalverteilte Zufallsvariable ermittelt.

I. Übersicht über die Testergebnisse

Für die folgenden Testergebnisse wurden zwölf Testinstanzen verwendet, bei denen jeweils Frankfurt aufgrund seiner zentralen Lage als Depot gewählt wurde und zehn Kundenorte zufällig aus den verbleibenden 19 Orten ausgesucht wurden. Im Depot stehen jeweils maximal drei Fahrzeuge zur Erfüllung der Kundenaufträge bereit. Die wöchentliche Lenkzeit beträgt 56 Stunden und die zulässige Arbeitszeit 60 Stunden. Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Tabelle 1 dokumentiert.

Tabelle 1: Dokumentation der Ergebnisse der Testinstanzen bei Minimierung der Ausführungszeit

Instanz	Gesamte Ausführungsdauer	Anzahl Fahrzeuge	Gesamte Lenkdauer	Lenkzeitunterbrechung	Tägliche Ruhezeit (%)	Wartezeit (%)	Servicezeit (%)

	(h)		(%)	(%)			
1	83,6	3	42,8	3,6	39,5	8,2	6,0
2	101,0	3	48,5	3,0	43,5	0,0	4,9
3	101,4	3	44,4	4,4	32,6	13,7	4,9
4	117,8	3	43,8	2,5	46,7	2,7	4,2
5	121,3	3	47,5	2,5	45,4	0,6	4,1
6	90,9	3	50,1	2,5	36,3	5,6	5,5
7	112,9	3	44,9	2,0	48,7	0,0	4,4
8	96,7	3	42,4	3,1	34,1	15,2	5,2
9	60,5	2	51,6	3,7	36,4	0,0	8,3
10	59,5	2	50,8	3,8	37,0	0,0	8,4
11	53,8	3	48,0	4,2	20,4	18,1	9,3
12	83,5	3	51,8	2,7	39,5	0,0	6,0

Alle zwölf Testinstanzen können unter Einsatz von nur zwei Fahrzeugen gelöst werden; allerdings weisen nur zwei der Testinstanzen optimale Lösungen mit zwei Fahrzeugen auf. Alle weiteren Testinstanzen benötigen für eine optimale Lösung drei Fahrzeuge. Die Rechenzeiten auf einem Core 2 Duo Prozessor mit 2,53 GHz variieren zwischen 4 Minuten und 2 Stunden 8 Minuten und betragen im Durchschnitt 54,5 Minuten.

Die gesamte Ausführungszeit in Tabelle 1 entspricht dem Wert der Zielfunktion (1). Die Dauer der Lenkzeiten, der Lenkzeitunterbrechungen, der täglichen Ruhezeiten, der Wartezeiten und der Servicezeiten sind in Prozent der gesamten Ausführungsdauer angegeben. Die tägliche Ruhezeit nimmt einen großen Anteil an der Gesamtzeit ein, da die Kundenorte räumlich relativ weit voneinander entfernt sind und außerdem die Kundenzeitfenster zeitlich weit auseinander liegen. Aufgrund der langen Fahrzeiten zwischen den Kunden ist eine Clusterung von Kunden zu einer gemeinsamen Tour vielfach nur durch die Inkaufnahme einer oder mehrerer täglicher Ruhepausen möglich. Die Einsatzdauer beträgt bei den betrachteten Beispielen durchschnittlich ca. 32 Stunden pro Fahrzeug und wöchentlicher Phase. Dieser relativ geringe Wert ist zum Teil auf die Lage der Zeitfenster und zum anderen darauf zurückzuführen, dass bei dem Einsatz einer geringeren Anzahl von Fahrzeugen (mit einer dementsprechend längeren Einsatzdauer) die erforderliche Anzahl an täglichen Ruhepausen zunehmen würde und somit die gesamte Ausführungszeit drastisch steigen würde. Außerdem ist zu bedenken, dass eine wöchentliche Phase sehr viel kürzer als eine Woche sein darf. Da eine Woche mehrere wöchentliche Phasen enthalten darf, kann direkt im Anschluss an eine kurze wöchentliche Phase eine wöchentliche Ruhezeit und eine neue wöchentliche Phase innerhalb der gleichen Woche gestartet werden.

Der Anteil der Arbeitszeit (Lenk- und Servicezeit) an der gesamten Einsatzzeit beträgt in der Tabelle 1 durchschnittlich 53,2 %. Der Anteil der gesetzlich vorgeschriebenen Ruhezeiten beträgt 41,5 %, wobei die täglichen Ruhezeiten mit 38,3 % den größten Anteil bilden. Die Wartezeit beträgt durchschnittlich 5,3 %.

Die Zielsetzung bei der Lösung der Instanzen in Tabelle 1 besteht in der Minimierung der gesamten Ausführungszeit der Tourenpläne einer Instanz. Die gesamte Lenkdauer in Tabelle 1 entspricht der benötigten Zeit für die zurückzulegenden Entfernungen der Instanzen. Tabelle 2 zeigt die Ergebnisse der Berechnung der Instanzen aus Tabelle 1, wobei nun die gesamte Lenkzeit und nicht die Ausführungszeit als Kriterium zur Optimierung herangezogen wird. Dadurch wird die Lenkzeit pro Instanz durchschnittlich um 11 % von 42,2 Stunden auf 37,7 Stunden gesenkt und die durchschnittliche Anzahl benötigter Fahrzeuge fällt von 2,8 auf 2,3. Die Ausführungszeit der Tourenpläne steigt natürlich an und zwar durchschnittlich auf 220 % der ursprünglichen Zeit (von 90,2 Stunden auf 199 h). Die Wartezeit erhöht sich dabei um das 8,2-fache im Vergleich zu der Minimierung der Ausführungsdauer. Damit fällt der Anteil der produktiven Zeit (Lenk- und Servicezeit) im Verhältnis zur gesamten Einsatzzeit auf unter 20 %. Ferner besteht im Unterschied zu den Lösungen aus Tabelle 1 aufgrund der langen Einsatzdauer nicht mehr die Möglichkeit, weitere Aufträge im Anschluss an die bisher verplante wöchentliche Phase, aber innerhalb der gleichen Woche einzufügen. Die Rechenzeiten für die Testinstanzen mit dieser Zielfunktion lagen zwischen 6 Sekunden und 42 Minuten und betragen im Durchschnitt 4,6 Minuten.

Tabelle 2: Dokumentation der Ergebnisse der Testinstanzen bei Minimierung der Lenkdauer

Instanz	Gesamte Ausführungsdauer (h)	Anzahl Fahrzeuge	Gesamte Lenkdauer (%)	Lenkzeitunterbrechung (%)	Tägliche Ruhezeit (%)	Wartezeit (%)	Servicezeit (%)
1	179	2	19,3	0,4	36,9	40,6	2,8
2	229	3	20,8	1,0	33,6	42,4	2,2
3	288	3	12,8	0,5	34,4	50,6	1,7
4	240	2	18,2	0,9	36,7	42,1	2,1
5	240	2	20,3	0,9	36,7	40,0	2,1
6	168	2	20,3	1,3	32,7	42,7	3,0
7	252	3	18,2	0,9	34,9	44,0	2,0
8	216	3	18,1	1,0	30,6	48,0	2,3
9	120	2	25,4	1,3	27,5	41,7	4,2
10	144	2	20,5	1,0	30,6	44,4	3,5
11	168	2	14,6	0,0	32,7	49,7	3,0

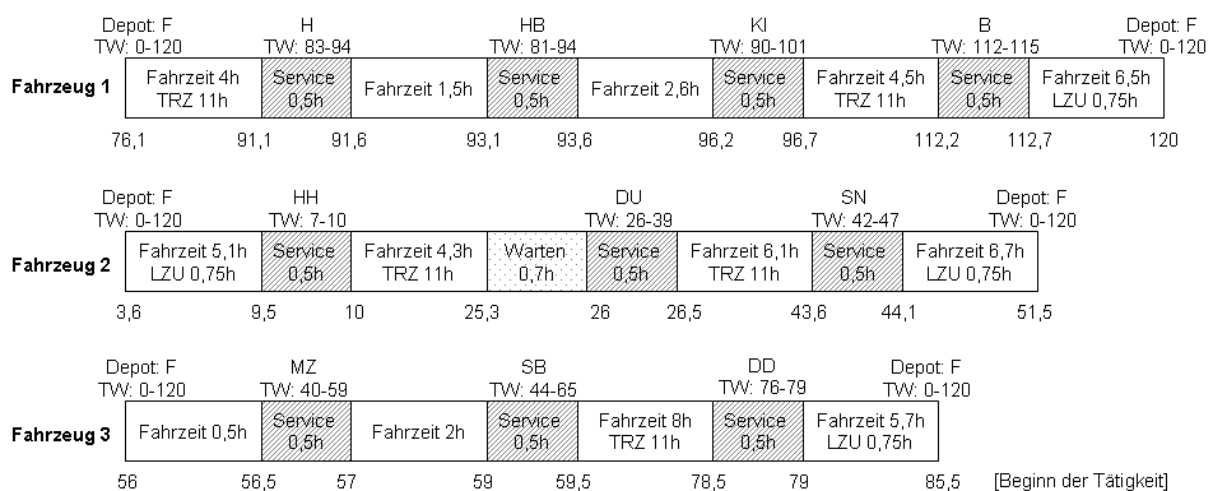
12	144	2	25,6	1,0	30,6	39,3	3,5
----	-----	---	------	-----	------	------	-----

Ohne Berücksichtigung der EU-Sozialvorschriften ergibt die Minimierung der Lenkzeiten für die vorliegenden Testinstanzen eine durchschnittliche Lenkzeit von 35,8 Stunden pro Instanz, wobei durchschnittlich 2,16 Fahrzeuge pro Instanz benötigt werden. Ein Vergleich mit den Ergebnissen der Tabelle 2 zeigt, dass die obligatorische Einhaltung der EU-Sozialvorschriften gegenüber dem vollständigen Ignorieren der Vorschriften eine Verlängerung der Touren um lediglich 5 % bewirkt. Da es sich bei den Lösungen um die optimalen Tourenpläne handelt, stellt diese Abschätzung eine untere Schranke für die Verschlechterung des Zielwerts durch die Einhaltung der gesetzlichen Regelungen dar. Für fünf der zwölf Beispiele aus Tabelle 2 ergeben sich durch das Relaxieren der EU-Sozialvorschriften keine kürzeren Gesamt-Lenkzeiten. Bei den übrigen Beispielen liegt die Reduktion zwischen 0,1 und 8,8 Stunden. Die Anzahl der durchschnittlich benötigten Fahrzeuge sinkt um 0,17.

II. Beispiel für einen Tourenplan

Im Folgenden wird beispielhaft der zeitliche Ablauf eines Tourenplans anhand der Testinstanz 5 vorgestellt. Wie aus Tabelle 1 ersichtlich wird, werden für den optimalen Tourenplan drei Fahrzeuge eingesetzt. Die minimale Ausführungszeit beträgt insgesamt 121,3 Stunden, von denen 43,9 Stunden auf das erste Fahrzeug, 47,9 Stunden auf Fahrzeug 2 und 29,5 Stunden auf Fahrzeug 3 entfallen. Der resultierende Tourenplan mit minimaler gesamter Ausführungszeit ist in Abbildung 2 dargestellt.

Abbildung 2: Tourenplan mit minimaler gesamter Ausführungszeit für die Testinstanz 5



Für die drei Fahrzeuge wird jeweils die Sequenz der von ihnen besuchten Kundenorte mit den jeweiligen Startzeitpunkten für alle Aktivitäten anhand eines Balkendiagramms dargestellt. Des Weiteren werden die Dauern der Aktivitäten in den Balken aufgeführt. So fährt beispielsweise das zweite Fahrzeug 3,6 Stunden nach Beginn des Planungszeitraums, also am Montag um 3:36 Uhr, vom Depot in Frankfurt los und erreicht den ersten Kunden in Hamburg um 9:30 Uhr nach einer Fahrzeit von 5,1 Stunden sowie einer auf dieser Teilstrecke eingelegten Lenkzeitunterbrechung von 45 Minuten. Da das Zeitfenster des Kunden von 7 Uhr bis 10 Uhr dauert und der Service mit einer Dauer von einer halben Stunde innerhalb des Zeitfensters erfolgen muss, ist dies auch der späteste mögliche Zeitpunkt, zu dem der Kunde in Hamburg erreicht werden darf. Hier wird also dieser späteste mögliche Startzeitpunkt des Fahrzeugs durch die Zielsetzung der Minimierung der gesamten Ausführungszeit erzwungen. Um 10 Uhr fährt der Fahrer weiter nach Duisburg. Da die Fahrzeit hier 4,3 Stunden beträgt und somit seine gesamte tägliche Lenkzeit 9 Stunden überschreitet, muss er eine tägliche Ruhezeit mit einer Dauer von mindestens 11 Stunden auf dieser Strecke einlegen. Die Ankunft am Kundenort erfolgt zum Zeitpunkt 25,3, also am Dienstag um 1:18 Uhr. Da jedoch das Zeitfenster des Kunden erst um 2:00 Uhr beginnt, muss der Fahrer warten, bevor er mit der Belieferung beginnen kann. Anstelle dieser Wartezeit von 42 Minuten hätte der Fahrer seine tägliche Ruhezeit um dieselbe Zeitspanne ausdehnen können, sodass er genau zu Beginn des Kundenzeitfensters in Duisburg eintreffen würde. Von Duisburg aus fährt der Fahrer weiter nach Schwerin. Auf dieser Strecke muss er eine weitere tägliche Ruhezeit einlegen, da das Zeitfenster erst zum Zeitpunkt 42, also am Dienstag um 18:00 Uhr, öffnet und die letzte tägliche Ruhezeit spätestens zum Zeitpunkt 25,3 beendet wurde. Genaue Zeitpunkte für die Lage der Lenkzeitunterbrechungen und der täglichen Ruhezeiten sind durch das Modell nicht vorgeschrieben, da die Ruhezeiten als Verlängerungen in den Reisezeiten berücksichtigt werden. Die Belieferung des Kunden in Schwerin kann daher nicht erfolgen, ohne dass innerhalb von 24 Stunden nach dem Ende der letzten täglichen Ruhezeit eine neue tägliche Ruhezeit mit einer Dauer von mindestens 11 Stunden genommen werden würde, da diese dann spätestens zum Zeitpunkt $38,3 (= 25,3 + 24 - 11)$ begonnen werden müsste. Deshalb ist vor Beginn der Belieferung des Kunden in Schwerin eine tägliche Ruhezeit unvermeidbar. Nachdem der Fahrer die Belieferung des Kunden beendet hat, tritt er zum Zeitpunkt 44,1, also am Dienstag um 20:06 Uhr, die Rückreise zum Depot in Frankfurt an, wo er nach einer Fahrzeit von 6,7 Stunden sowie einer Lenkzeitunterbrechung von 45 Minuten eintrifft. Die Pläne für Fahrer 1 und Fahrer 3 sind analog zu lesen.

F. Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag werden die in der gesamten Europäischen Union gültigen Vorschriften zu den Lenk- und Arbeitszeiten von Kraftfahrern vorgestellt und erstmals vollständig in ein mathematisches Tourenplanungsmodell integriert. Dabei wird als Modell das VRPTW in der positionsorientierten Formulierung gewählt, um Lenkzeitunterbrechungen und tägliche Ruhezeiten als Verschiebungen der Ankunftszeiten nachfolgender Knoten berücksichtigen zu können. Die hier gewählte Formulierung lässt sich auf Modelle für das Traveling Salesman Problem und für das allgemeinere Pickup-and-Delivery Problem erweitern.

Bei den analysierten Testinstanzen beträgt der Anteil der gesetzlich vorgeschriebenen Ruhezeiten an der Gesamtzeit ca. 40 %, was vor allem auf den großen Anteil der täglichen Ruhezeiten mit etwa 38% zurückzuführen ist. Tägliche Ruhepausen müssen jeweils nach 9 (bzw. 10) Stunden Fahrzeit und spätestens nach Ablauf von 24 Stunden eingelegt werden, wodurch sie mit einer Mindestdauer von 11 (bzw. 9) Stunden einen erheblichen Einfluss auf die Tourenplanung innerhalb einer wöchentlichen Phase haben.

Es zeigt sich insbesondere, dass bei der Berücksichtigung der Vorschriften der Verordnung (EG) Nr. 561/2006 das Kriterium der Minimierung der Fahrzeit (d.h. Minimierung der Strecke) zu prohibitiven Ausführungszeiten führt. Bei den betrachteten Instanzen kann durch Anwendung dieses Kriteriums die Fahrzeit zwar durchschnittlich um 11% gegenüber der Minimierung der Ausführungsdauer gesenkt werden, aber die Wartezeit steigt durchschnittlich um das 8,2-fache an. Pro Instanz kann die Lenkdauer um durchschnittlich 5 Stunden gesenkt werden, aber die Ausführungszeit erhöht sich durchschnittlich um 116 Stunden pro Instanz. Dies bedeutet, dass der Reduktion um 1 Stunde Fahrzeit eine Erhöhung um 23 Stunden Wartezeit gegenüber steht. Ein Abgleich zwischen den beiden Kriterien muss auf der monetären Ebene vorgenommen werden, um die Kosten von Wartezeiten den Kosten der Fahrzeit gegenüber zu stellen.

Ferner zeigt sich, dass bei Berücksichtigung der EU-Sozialvorschriften der Einsatz einer minimalen Anzahl von Fahrzeugen nur in seltenen Fällen zu optimalen Tourenplänen mit minimaler Ausführungszeit und vielfach auch nicht zu optimalen Plänen mit minimaler Fahrzeit führt. Bei der Minimierung der Ausführungszeit ist das vor allem damit zu begründen, dass bei dem Einsatz einer größeren Anzahl von Fahrzeugen die Anzahl der erforderlichen täglichen Ruhepausen, die während der Ausführung einer Tour eingelegt werden müssen, reduziert werden kann.

Insgesamt kann festgestellt werden, dass die wechselseitigen Beziehungen zwischen den Kriterien der Entfernungsminimierung, der Minimierung der Ausführungszeit und der Minimierung der Anzahl der Fahrzeuge durch die Einbeziehung der EU-Sozialvorschriften in die Tourenplanung stark beeinflusst werden. Eine sorgfältige Analyse der Veränderung der Beziehungen zwischen den obigen Zielkriterien sollte Gegenstand zukünftiger Forschungsarbeiten sein.

Danksagung

Dieser Beitrag entstand im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 637 „Selbststeuerung in der Logistik – Ein Paradigmenwechsel und seine Grenzen“, finanziert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft an der Universität Bremen.

G. Literaturverzeichnis

Arbeitszeitgesetz (ArbZG) vom 6. Juni 1994

Archetti, C.; Savelsbergh, M.W.P. (2009): The Trip Scheduling Problem, in: Transportation Science (to appear), Articles in Advance, pp 1-15, INFORMS, 2009

Campbell, A. M.; Savelsberg, M. (2004): Efficient Insertion Heuristics for Vehicle Routing and Scheduling Problems, in: Transportation Science, 38. Jahrgang, 2004, Heft 3, S. 369-378

Cordeau, J.F.; Gendreau, M.; Laporte G. (1997) : A Tabu Search Heuristic for Periodic and Multi-Depot Vehicle Routing Problems, in: Networks 30, S. 105-119

Cordeau, J.-F.; Desaulniers, G.; Desrosiers, J.; Solomon, M. M.; Soumis, F. (2002): VRP with Time Windows, in: Toth, P.; Vigo, D. (Hrsg.): The Vehicle Routing Problem, SIAM, Philadelphia 2002, S. 157-193

Dethloff, J. (1994): Verallgemeinerte Tourenplanungsprobleme: Klassifizierung, Modellierung, Lösungsmöglichkeiten. Logistik und Verkehr, Göttingen, 1994

Gietz, M. (1994): Computergestützte Tourenplanung mit zeitkritischen Restriktionen, Physica-Verlag, Heidelberg 1994

Goel, A.; Gruhn, V. (2005): Solving a Dynamic Real-life Vehicle Routing Problem, in: Haasis, H.-D.; Kopfer, H.; Schönberger, J. (Hrsg.): Operations Research Proceedings 2005, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 2006, S. 367-372

Goel, A. (2007): Fleet Telematics - Real-time management and planning of commercial vehicle operations, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 2007

Goel, A.; Gruhn, V. (2007): Lenk- und Ruhezeiten in der Tourenplanung, in: Waldmann, K.-H.; Stocker, U. M. (Hrsg.): Operations Research Proceedings 2006, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 2007, S. 343-348

Goel, A. (2009): Vehicle Scheduling and Routing with Drivers' Working Hours, in: Transportation Science, 43. Jahrgang, 2009, Heft 1, S. 17-26

Kok, A.L.; Meyer, C.M.; Kopfer, H.; Schutten, J.M.J.: Dynamic Programming Algorithm for the Vehicle Routing Problem with Time Windows and EC Social Legislation, Beta Working Paper 270, University of Enschede 2009

Kopfer, H.; Meyer, C. M.; Wagenknecht, A. (2007): Die EU-Sozialvorschriften und ihr Einfluss auf die Tourenplanung, in: Logistik Management, 9. Jahrgang, 2007, Heft 2, S. 32-47

Meyer, C. M.; Kopfer, H. (2008): Restrictions for the operational transportation planning by regulations on drivers' working hours, in: Bortfeld, A.; Homberger, J.; Kopfer, H.; Pankratz, G.; Strangmeier, R.: Intelligent Decision Support, Gabler Edition Wissenschaft, Wiesbaden 2008, S. 177-186

Meyer, C. M.; Kopfer, H.; Kok, A. L.; Schutten, J. M. J. (2009): Distributed Decision Making in Combined Vehicle Routing and Break Scheduling, erscheint in: Proceedings of 2nd International Conference on Dynamics in Logistics (LDIC 2009), Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 2009

Richtlinie 2002/15/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. März 2002

Rochat, Y.; Semet, F. (1994): A Tabu Search Approach for Delivering Pet Food and Flour in Switzerland, in: Journal of the Operational Research Society, 45. Jahrgang, 1994, Heft 11, S. 1233–1246

Savelsberg, M.; Sol, M. (1998): DRIVE: Dynamic Routing of Independent Vehicles, in: Operations Research, 46. Jahrgang, 1998, Heft 4, S. 474-490

Solomon, M. M. (1987): Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints, in: Operation Research, 35. Jahrgang, 1987, Heft 2, S. 254-265

Stumpf, P. (1998): Tourenplanung im speditionellen Güterverkehr, Diss., Augsburg, 1998

Verordnung (EG) Nr. 561/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 15. März 2006

Verordnung (EWG) Nr. 3820/85 des Rates vom 20. Dezember 1985

Xu, H.; Chen, Z.-L.; Rajagopal, S.; Arunapuram, S. (2003): Solving a practical pickup and delivery problem, in: Transportation Science, 37. Jahrgang, 2003, Heft 3, S. 347-364

Zäpfel, G.; Bögl, M. (2008): Multi-period vehicle routing and crew scheduling with outsourcing options, in: International Journal of Production Economics, 113. Jahrgang, 2008, Heft 2, S. 980-996