

Reduktion der Leerfahrten beim Rundholztransport

(Mit 9 Abbildungen und 2 Tabellen)

TH. SMALTSCHINSKI*)

(Angenommen November 2010)

SCHLAGWORTER – KEY WORDS

Rundholztransport; Optimierung; Logistik; Rückfracht; Leerfahrtsreduktion.

Transportation of round wood; optimization; logistics; backfreights; reduction of empty runs.

1. LEERFAHRTREDUKTION BEIM RUNDHOLZTRANSPORT

Der Transport von Holz aus dem Wald zu den Orten des Verbrauchs bildet den letzten Abschnitt der Holzbereitstellungskette. Das Standardtransportmittel für Rundholz sind in Deutschland spezielle LKW. Jährlich werden 40 bis 50 Mio. m³ per LKW transportiert. Bei einer Zuladung von 30 m³ sind dies im Mittel etwa 1,5 Mio. Lastfahrten von 60 bis 70 km Länge. In der Summe führt dies zu einer Transportstrecke von 195 Mio. km/a. Bei einem Verbrauch der LKW von 45 l auf 100 km werden dazu knapp 90 Mio. Liter Diesel benötigt. Der Transport belastet das Holz also mit rund 2 Liter Diesel/m³.

Das Ziel liegt in der Entwicklung einer Methode zur Kalkulation von Transportrouten mit maximaler Leerfahrtsreduktion, um die Kosten und die Kohlenstoff-Emissionen zu senken. Ohne technische Änderungen an den LKW bieten sich vorweg zwei Lösungen an. Zum einen können kooperierende Käufer von Holz gleichartige Polter (Lagerplätze von Holz im Wald) mit geringerer Distanz zu anderen Zielwerken tauschen (Holz-Swap) oder es besteht die Möglichkeit der Leerfahrtsreduktion durch optimierte Routenwahl. Bei weitergehender Kooperation von Werken der Holzindustrie ist beides kombinierbar.

Die Lösung beruht auf Kombinatorik, wobei die räumliche Lage von Poltern und Transportzielen zusammen mit der Berechnung kürzester Routen auf dem Straßennetz die bestimmenden Größen sind. Weiterhin wird die Zuordnung der Polter zu den Werken mit Rücksicht auf deren Einzugsgebiet variiert, um den Einfluss der Lage auf die Leerfahrtsreduktion zu untersuchen. Implizit ist mit Rücksicht auf die Transportkosten eine Analyse des Standortes von Werken sowie deren Einzugsbereich und Dimensionierung verbunden.

2. GESCHICHTE, RAHMENBEDINGUNGEN BEIM RUNDHOLZTRANSPORT UND LITERATUR

2.1 Geschichtliche Entwicklung der Leerfahrtsreduktion

Schon weit vor der Zeitenwende galt beim Gütertransport das ökonomische Prinzip: ein unbeladenes Schiff ist ein teures Schiff. Das Laden von Rückfrachten erwies sich dabei als das probate Mittel zur Vermeidung oder zumindest Verringerung von Leerfahrten. In griechisch-römischer Zeit wurden mit der Gründung Alexandrias Ende des 4. Jh. v. Chr. neue Voraussetzungen für eine „Globalisierung“ der Wirtschaft im Mittelmeerraum und darüber hinaus geschaffen (MAREK, 2001). Ein unbekannter Autor beschreibt im

1. Jh. n. Chr. ausführlich den Rückfrachtverkehr entlang der afrikanischen Ostküste bis in die Gegend des heutigen Dar es Salam und die sogenannte *Monsoonroute* von der arabischen Halbinsel nach Indien (HEIMBERG, 1981; CASSON, 1989). Später dann verschifften Kaufleute der Hanse nach dem gleichen Prinzip Veredelungsprodukte und Nahrungsmittel nach Nowgorod und luden als Rückfracht Walrosszähne, Häute, Butter, Holz, Stock- und Klippfisch (HENK, 1996). Nach Norwegen brachten Kaufleute aus den Hansestädten ab dem 13. Jh. Korn und Fertigwaren und luden als Rückfracht insbesondere Stockfisch. Bald aber änderten sie die Route. Den Stockfisch brachten sie nach England und von dort Wolle und Tuche in die Hansestädte. Dieser Dreiecksverkehr der Hanse war deutlich erfolgreicher als der einfachere Rückfrachtverkehr zwischen England und Norwegen (BEHRMANN, 1996). Die Hanse verlegte das Einkaufsgebiet für Stockfisch Ende des 14. Jh. aufgrund protektionistischer Maßnahmen des norwegischen Königs bis nach Island (GARDINER und MEHLER, 2007).

Bekannt sind auch die Verbindungen der Hanse mit den süddeutschen Kaufleuten aus Augsburg, Nürnberg und Regensburg. Diese transportierten zu Land Metalle, Pelze oder grobe Leinenstoffe nach Venedig und luden dort als Rückfracht levantinische Gewürze, edle Stoffe und Luxusgüter (DIETZ, 1910). Der imposante Bau des *Fondaco dei Tedeschi* in Venedig, dem Kaufhaus der Deutschen, lässt noch heute die ökonomische Bedeutung der damaligen Handelsroute erahnen.

Das Dreiecksverfahren der Hanse ist im heutigen Frachtverkehr stark erweitert. Ein Disponent im Stückgutverkehr sucht bereits während der Lastfahrt eines LKW zu einem Ziel eine Folgefracht von diesem Ziel aus etc, etc. Der Begriff *Rückfracht* wirkt hier missverständlich, da ein LKW ja nicht mit Gütern zu seinem Ausgangspunkt zurück sondern zu ganz anderen Zielen gelenkt wird, so dass der Begriff *Leerfahrtsreduktion* treffender erscheint.

2.2 Rahmenbedingungen und Besonderheiten beim Rundholztransport

Der Rundholztransport ist in Deutschland durch folgende Usancen und Rahmenbedingungen geprägt. Im Unterschied zu Spediteuren anderer Waren sind Holzspediteure zum größten Teil selbstständige Unternehmer, häufig nur mit einem einzigen oder wenigen LKW. Sie sind auf regionale Transporte mit einem Aktionsradius bis zu 200 km spezialisiert. Die verwendeten LKW mit speziellen Hängern oder Sattelaufleger und Selbstladeeinrichtung sind praktisch nur für Rundholztransport geeignet. Ein Waldeigentümer oder Holzkäufer schließt direkt mit dem Spediteur einen Vertrag über den Transport von Rundholz zu einem bestimmten Zielort. Die Bezahlung des Spediteurs wird über so genannte Frachttarife geregelt, die sich auf die einfache Distanz Polter-Zielort beziehen. Anstelle der früher verwendeten Luftlinie wird heute die Transportdistanz Polter-Zielort durch Navigationssysteme berechnet. Nach Vertragsabschluss liegt es in der Verantwortung des Spediteurs, das Rundholz im vereinbarten Zeitfenster zum Zielort zu transportieren und die Fahrten von und zu seinem Heimatstandort zu organisieren. Bei der Abrechnung wird implizit folgende Route unterstellt: Leerfahrt auf dem kürzesten oder schnellsten Weg vom Werk zum Polter, Laden von Rundholz und Lastfahrt Polter zum Werk. Diese Route wird im Folgenden *Normalroute*

*) THOMAS SMALTSCHINSKI. Privatdozent am Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Werthmannstr. 6, D-79085 Freiburg. Telefon: 0761-203 3764. E-Mail: thsm@gmx.de

genannt. Der Spediteur benutzt die Normalroute solange, bis das Polter vollständig abgefahren ist. Die Be- und Entladezeiten liegen bei ca. 5/4 Stunden und die Lenkzeit ist in Deutschland derzeit auf 8 Stunden pro Tag beschränkt.

Spediteure versorgen aber oftmals nicht nur einen sondern mehrere Kunden. Geschickte Spediteure suchen ihre Kunden mit Rücksicht auf die Lage der Polter aus, um Rückfrachten laden zu können. Durch die eingeschränkte Sicht auf alle vorhandenen Polter einer Region kann ein Spediteur zwangsläufig nur einen Teil der möglichen Rückfrachten zusammenstellen.

Die Polter selbst sind bei relativ geringer Größe über die gesamte Waldfläche verstreut und haben im Jahresverlauf sich ständig ändernde räumliche Positionen. Auf der anderen Seite konzentrieren sich die Unternehmen der Holzindustrie zu immer größeren Einheiten, so dass die Anzahl der Unternehmen abnimmt. Vielen dispersen Orten der Produktion im Wald (*Polter oder Quellen*) mit relativ kleinen Mengenaufkommen stehen wenige Orte der Konsumption der Holzindustrie (*Werke oder Senken*) mit großem Bedarf gegenüber, die mit Rundholz zum richtigen Zeitpunkt in der richtigen Menge nach Baumart, Dimension, Sorte und Qualität zu versorgen sind (BECKER et al., 2009).

2.3 Literatur

Die Themen Leerfahrtreduktion durch Rückfracht und Routenoptimierung beim Rundholztransport werden vielfach in der forstlichen Literatur als erfolgversprechend erwähnt, anwendbare Verfahren, Methoden und umgesetzte Beispiele sind hingegen relativ selten (HIRSCH, 2006). In der Standardliteratur zur Transportlogistik hat der Transport von Rundholz gegenüber anderen Gütern eine eher marginale Bedeutung. Es liegt also nahe, vorhandene Methoden und Konzepte in entsprechender Form auf die Voraussetzungen und eben geschilderten Besonderheiten beim Rundholztransport zu adaptieren.

So beschreibt DOMSCHKE (1997) grundlegende Verfahren zur Berechnung optimaler Routen in räumlichen Netzwerken sowie lineare Transport- und Umladeprobleme. Allgemein besteht eine Tour aus einer Menge von Orten und Straßenabschnitten, die von einem Transportmittel tangiert werden (BLOECH und IHDE, 1997). Eine optimale Route entspricht einer Tour, in der alle Orte und Strecken einer Tour unter speziell definierten Bedingungen anzufahren oder zu durchfahren sind. Diese Fragestellung ist bekannt als das *Problem des Handlungsreisenden* (Route mit minimaler Länge durch mehrere Städte, GRITZMANN und BRANDENBERG, 2005, S. 290) oder als das *chinesische Postbotenproblem* (Route mit minimaler Länge zu allen Briefkästen eines Gebietes, GRITZMANN und BRANDENBERG, 2005, S. 231). Man kann das Problem des Handlungsreisenden theoretisch auf den Rundholztransport übertragen. Die Lastfahrten und ihre Anzahl von den verschiedenen Waldorten zu verschiedenen Werken entsprechen dabei den kürzesten Routen auf dem Straßennetz. Eine Tour, die diese Laststrecken mit minimalen Leerfahrtstrecken verbindet, entspräche dann der optimalen Route eines Handlungsreisenden.

Eine Erweiterung stellt das *Vehicle Routing Problem* dar, welches auch als multiples *Problem des Handlungsreisenden* bezeichnet wird. Dabei werden Waren von einem zentralen Depot aus zu unterschiedlichen Kunden geliefert. Die Rundreisen entsprechen den Touren der einzelnen verwendeten LKW mit beschränkter Transportkapazität (GOLDEN et al., 2008). Die Transportmittel können dabei auch von unterschiedlichen Depots aus starten (GENDREAU et al., 1997) oder es müssen bestimmte Zeitfenster beim Ausliefern beachtet werden (GAMBARDELLA et al., 1999). Ganz allgemein werden zur Lösung derartiger Probleme Heuristiken verwendet wie Tabu Search (GLOVER, 1986; GLOVER und LAGUNA, 1997).

Auch das *Vehicle Routing Problem* bezieht sich nicht direkt auf Rundholz. Ein Transportmittel wird hier an einem großen Depot (Quelle) beladen und hat die Güter in einem gegebenen Zeitfenster zu mehreren Kunden (Senken) auf der kürzesten oder schnellsten Route zu transportieren. Eine Großbäckerei als Depot beliefert mehrere Filialen oder ein Depot für Arzneimittel mehrere Apotheken. Beim Rundholztransport werden hingegen von relativ kleinen Depots, den Poltern oder Quellen, eine oder mehrere komplette LKW-Ladungen zu einem Werk mit großem Bedarf transportiert.

HIRSCH (2006) modifiziert die Bezeichnungen des *Vehicle Routing Problem*, wobei er den Heimatstandort des Spediteurs exklusiv als Depot definiert, welches der Start- und Zielpunkt einer Tagesroute ist. Die Optimierung erfolgt für ein Zeitfenster und eine bestimmte Anzahl von Poltern, die bestimmten Zielorten zugeordnet sind. Restriktionen bei der Optimierung sind: Öffnungszeiten der Holzunternehmen, Lenkzeiten, Gewichtslimits auf den Forststraßen sowie maximale Ladekapazitäten. Die Laststrecken sind unter den angeführten Restriktionen kostenminimal zu Routen zu verbinden. Zur Optimierung des Rundholztransports verwendet HIRSCH (2006, 2010) die eben genannte Heuristik Tabu Search.

CARLSSON und RÖNNQVIST (2007) versuchen, Rückfrachten direkt über lineare Optimierung zu berechnen, wobei sie mit steigender Anzahl von Werken und Poltern ein rapides Ansteigen der Variablen verzeichnen. Andere zielen auf optimierte Ankunftszeiten der LKW am Werk, versuchen die Prozesse beim Holztransport unter dem Gesichtspunkt der Holzbereitstellungskette zu optimieren (BODELSCHWINGH, 2006; BAUMANN, 2009) oder analysieren die Kosten beim Rundholztransport (BORCHERDING, 2007).

3. METHODIK ZUR REDUKTION DER LEERFAHRTSTRECKE

Die Leerfahrtreduktion ist kombinatorisch unter Berücksichtigung der Entfernungen von Quellen zu Senken auf dem Straßennetz modellierbar. Folgende Bezeichnungen werden dabei verwendet. Unter *Transportstrecke* wird die Summe aus Last- und Leerfahrtstrecke verstanden. Polter (Quellen) haben als Signatur einen Kreis, Werke (Senken) ein Quadrat, Lastfahrten eine durchgezogene und Leerfahrten eine gestrichelte Linie. Eine *Route* bezeichnet den kürzesten oder schnellsten Weg zwischen zwei Orten auf dem Straßennetz.

Eine Frachtroute bildet einen Zyklus mit gleichem Start- und Zielpunkt. Die *Normalroute* besteht aus einer Last- und Leerfahrt und soll hier 1-Zyklus heißen, bestehend aus den Routen Senke-Quelle und Quelle-Senke. Weiterhin enthalten Polter ein ganzzahliges Vielfaches kompletter LKW-Ladungen als Fahren. Rundholzprodukte einer Planungsregion lassen sich dabei in zwei Klassen unterteilen:

- *Konkurrierende Produkte* sind in ihrer Art so ähnlich oder vergleichbar, dass sie auf mehrere Senken verteilt werden könnten.
- *Nicht konkurrierende Produkte* können durch ihre Eigenschaften nur einer einzigen darauf spezialisierten Senke zugeordnet werden.

Diese Einteilung ist nicht allgemein sondern regional zu sehen. Industrieholz ist in einer Planungsregion mit mehreren Zellstoffwerken ein konkurrierendes Produkt, in einer anderen Planungsregion mit mehreren Sägewerken und nur einem Zellstoffwerk ein nicht konkurrierendes Produkt.

3.1 Vorüberlegung: das Transportproblem

Bei konkurrierenden Produkten tritt folgende paradoxe Transportsituation dann ein, wenn sich zwei Spediteure auf der Straße begegnen und konkurrierende Produkte auf Normalrouten in entgegengesetzter Richtung transportieren (*Abb. 1*, links). Ein Tausch

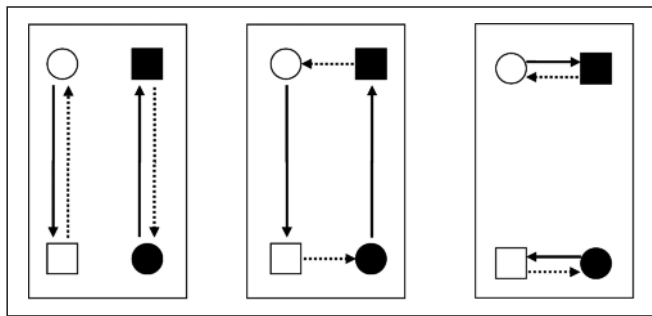


Abb. 1

Normalroute (links), 2-Zyklus mit Leerfahrtsreduktion durch Rückfracht (Mitte) und Transportproblem mit Tausch der Polter (rechts), Quadrate = Werke, Kreise = Polter.

Normal route (left), 2-cycle with reduction of empty runs by back freight (middle) and the so-called “transportation problem” with swap of the stacks (right), squares = plants, circles = stacks.

der Quellen würde für zwei kooperierende Senken eine optimale Routenbildung bedeuten (Abb. 1, rechts). Sind in einer Region Quellen mit konkurrierenden Produkten vorhanden, die den Bedarf korrespondierender Senken decken, dann besteht die Lösung des so genannten *Transportproblems* in derjenigen Verteilung von Quellmengen auf Senken, die den Bedarf der Senken deckt und eine minimale Summe an Transportstrecken hat (HITCHCOCK, 1941; DANTZIG, 1966 S. 343 ff.).

Eine Menge von n Werken hat in einem gegebenen Zeitfenster den Bedarf B_1 bis B_n , der von den Poltern P_1 bis P_m gedeckt wird. Eine Verteilung von Quellmengen auf Senken in einer Verteilungsmatrix (x_{ij}) ist dann gültig, wenn die Zeilensumme dabei dem Vorrat der Quellen entspricht und die Spaltensumme dem Bedarf der Senken. Die Transportkosten aller Quellen zu allen Senken sind in einer Kostenmatrix (c_{ij}) zusammengestellt. Die Kosten c_{ij} entsprechen hier dem kürzesten Weg von der Quelle i zur Senke j . Die Gesamtkosten K einer Verteilung (x_{ij}) lauten dann:

$$K = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij}, x_{ij} \geq 0 \quad [1]$$

Das Minimum der Funktion K lässt sich über lineare Optimierung bestimmen. DOMSCHKE empfiehlt als äquivalente Optimierungsverfahren die MODI-Methode (1995, S. 124 ff.) oder die Stepping-Stone-Methode (s. a. NEUMANN, 1975, S. 177). Als nahe am Optimum liegende Heuristik kann die VOGELSche Approximations-Methode angewendet werden (DOMSCHKE, 1995, S. 202). Eine Nachkalkulation konkurrierender Produkte der Bayerischen Staatsforsten ergab durch Lösung des Transportproblems für ca. 0,9 Mio. m³ Rundholz eine Reduktion der gesamten Last- und Leerfahrtsstrecke um knapp 9% (SMALTSCHINSKI, 2010).

3.2 Leerfahrtsreduktion über 2-Zyklen

Die klassische Form der *Leerfahrtsreduktion durch Rückfracht* entspricht einem 2-Zyklus mit einem Paar korrespondierender Quellen und Senken (Abb. 1, Mitte). Die *Normalrouten* oder *1-Zyklen* sind in Abb. 1 links dargestellt. Eine Leerfahrtsreduktion durch Rückfracht ist dann möglich, wenn das folgende Prüfkriterium erfüllt wird:

$$\text{Summe Laststrecken} > \text{Summe Leerfahrtsstrecken} \quad [2]$$

Ungleichung [2] ist offensichtlich nur für optimal aufgeteilte konkurrierende Produkte nach Lösung des Transportproblems sinnvoll. Ansonsten wäre ein Tausch der Polter günstiger (Abb. 1,

rechts). Optimal aufgeteilte konkurrierende Produkte und nicht konkurrierende Produkte können danach gemeinsam in die Berechnungen einbezogen werden. Die stufenweise Optimierung und die sich anschließende Verringerung der Leerfahrtsstrecke wurden von SMALTSCHINSKI (2010) untersucht.

In der Praxis ist die Leerfahrtsreduktion einer Region für mehr als zwei Werke ($n > 2$) zu bestimmen. Die Anzahl der möglichen Paarkombinationen von Werken lautet $n(n-1)/2$. Eine Reduktion der Leerfahrtsstrecke ist für alle diese Paare zu untersuchen, wobei pro Paar alle 2-Zyklen zwischen den Quellen und Senken zusammengestellt werden müssen.

Der Algorithmus zur Optimierung lautet: (*) *Suche alle 2-Zyklen, die [2] erfüllen. Aus den zulässigen 2-Zyklen wähle den mit maximaler Leerfahrtsreduktion. Bestimme die maximale Anzahl Fahren des besten 2-Zyklus und aktualisiere die Polter hinsichtlich dieser Fahren. Gehe zu (*) und fahre solange fort, bis sich keine 2-Zyklen mehr bilden lassen.*

Eine Leerfahrtsreduktion durch Rückfracht mit 2-Zyklen wurde für nicht konkurrierende Produkte aus dem Südwesten Deutschlands nachträglich berechnet. Dabei waren drei Sägewerke und ein Zellstoffwerk beteiligt. Insgesamt wurden rechnerisch für ca. eine Mio. m³ Rundholz 5,46 Mio. km auf Normalrouten zurückgelegt. Die Leerfahrtsstrecke konnte durch Rückfrachtbildung um 0,93 Mio. km gesenkt werden. Dies bedeutet eine Leerfahrtsreduktion von rund 34% (SMALTSCHINSKI und BECKER, 2008).

3.3 Leerfahrtsreduktion durch höhere Zyklen

Für mehrere Werke ($n > 2$) können räumliche Konstellationen von Quellen und Senken auftreten, bei denen die Leerfahrtsstrecke durch 2-Zyklen nicht verringert werden kann (Abb. 2, links). Die Leerfahrtsreduktion gelingt nur über einen 3-Zyklus (Abb. 2, rechts). Bei n Werken können Zyklen bis zum Grad n zusammengestellt werden (n -Zyklen).

Der Rechenaufwand bei 3-Zyklen steigt, da mehr Kombinationen von Werken hinsichtlich Bedingung [2] zu prüfen sind. In Abb. 3 links sind für drei Werke die Kombinationen der Tourenreihenfolge ohne Rücksicht auf die Polter dargestellt.

Der Startpunkt eines Zyklus ist dabei gleichgültig. Ein Zyklus über die Werke (1, 2, 3) entspricht dem über die Werke (2, 3, 1). Startet man mit geeigneter Nummerierung immer bei Werk 1, dann kann durch die verbliebenen Werke die Menge $\{2, \dots, n\}$ mit $n-1$ Elementen gebildet werden. Die Anzahl der Kombinationen entspricht der Permutationsmenge mit dem Wert $(n-1)!$. Bei drei Senken gibt es $(3-1)! = 2$ Möglichkeiten, andere Werke von Werk 1 aus anzusteuern.

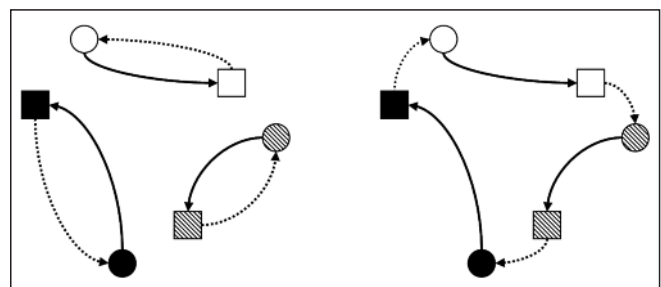


Abb. 2

Drei Senken (Quadrate) und drei Quellen (Kreise). Normalrouten mit 1-Zyklen links, Leerfahrtsreduktion durch 3-Zyklus rechts.

Three sinks (squares) and three sources (circles). Normal routes with 1-cycles (left), reduction of empty runs by three cycles (right).

Für drei Werke lässt sich mit Rücksicht auf alle möglichen 2- und 3-Zyklen die Anzahl der Routenkombinationen berechnen. Für 2-Zyklen gilt: Es gibt $\binom{3}{2} = 3$ Möglichkeiten zwei Senken aus drei auszuwählen und $(2-1)! = 1$ zyklische Routenkombination pro Paar. Für 3-Zyklen gibt es $\binom{3}{3} = 1$ Möglichkeit, drei Senken aus drei auszuwählen, und $(3-1)! = 2$ zyklische Routenkombinationen pro Tripel. In der Summe gibt es folgende zyklische Routenkombinationen:

$$\binom{3}{2}(2-1)! + \binom{3}{3}(3-1)! = 5.$$

In analoger Weise kann man die vier Werke in *Abb. 3* (rechts) untersuchen. Die Reihe lässt sich fortsetzen. Bezeichnet n die Anzahl der Werke und k den Grad des maximalen Zyklus, dann lautet die Anzahl Z_{nk} der zyklischen Routenkombinationen:

$$Z_{nk} = \sum_{i=2}^k \binom{n}{i} (i-1)! \quad \text{mit } 2 \leq k \leq n \quad [3]$$

Formel [3] gibt die Anzahl der Routenkombinationen an, die bei einer Berechnung der Leerfahrtreduktion zu überprüfen sind. Der in 3.2 beschriebene Algorithmus behält auch für die Kombina-

tionen von [3] seine Gültigkeit. Für $k = 2$ ergeben sich die Routenkombinationen der klassischen Rückfrachten aus Abschnitt 3.2 und für $k \geq 2$ alle Routenkombinationen von 2-Zyklen bis zu k -Zyklen. Für $k = n$ wächst die Zahl der Kombinationen nach Formel [3] mit steigendem n stark an. Die Anzahl der Routenkombinationen liegt für $n = 10$ bei etwa 1,1 Mio. und für $n = 20$ ergibt sich eine Zahl mit 18 Stellen. Der Laufzeit für Z_{nn} hat ungefähr den Betrag $O((n-1)!)$. Damit ist der Algorithmus für Z_{nn} NP-schwer.

4. BERECHNUNGEN DER LEERFAHRTREDUKTION

Die Anwendung kombinatorischer Methoden zur Berechnung der Leerfahrtreduktion scheint durch das starke Anwachsen der Routenkombinationen nach [3] numerisch unbrauchbar. Kombinatorisch handhabbare Lösungen mit $k < n$ werden aber auf diese Art ausgeblendet. Zur Klärung dieser Frage wurde ein experimenteller Aufbau gewählt, der ausreichend Senken und Quellen enthält, aber für Z_{nn} noch berechenbar bleibt.

4.1 Untersuchungsgebiet und Varianten

Zur Berechnung der Leerfahrtreduktion wurde ein Gebiet mit einer Ausdehnung von ca. 120 x 120 km ausgewählt (*Abb. 4*). Für dieses Gebiet lagen zwei Geodatensätze vor: Straßen und Wege als gerichteter Graph und die Lage der Waldflächen. In den Wald wurden an Wegen 150 Polter positioniert, wobei die Polter über Zufallszahlen mit 1...9 LKW-Ladungen bestückt wurden, was zu 712 Einzelfuhren führte. Weiterhin wurden in das Gebiet 5 Werke der Holzindustrie gelegt.

Die Leerfahrtreduktion wurde für vier unterschiedliche Varianten berechnet. Dabei blieben die Positionen der Polter gleich, nur die Zuordnung der Polter zu den Werken änderte sich.

Bei *Variante 0* wurden die Polter zufällig den Werken zugeteilt. Bei den anderen Varianten wurden die Einzugsgebiete der Werke berücksichtigt. Die Einzugsgebiete waren THIESSSEN-Polygone mit den Werken als Zentren. THIESSSEN-Polygone sind Regionen, die bei einer Zerlegung einer Ebene mit mehreren punktförmigen Zentren entstehen, wenn jeder Punkt einer Region zu dem eigenen Zentrum einen kleineren Abstand hat als zu den übrigen Zentren. (*Abb. 5*).

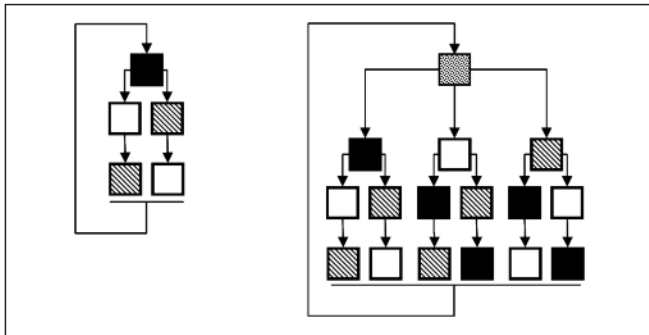


Abb. 3

Kombinationen von Zyklen für 3 und 4 Werke.
Combinations of cycles for 3 and 4 plants.

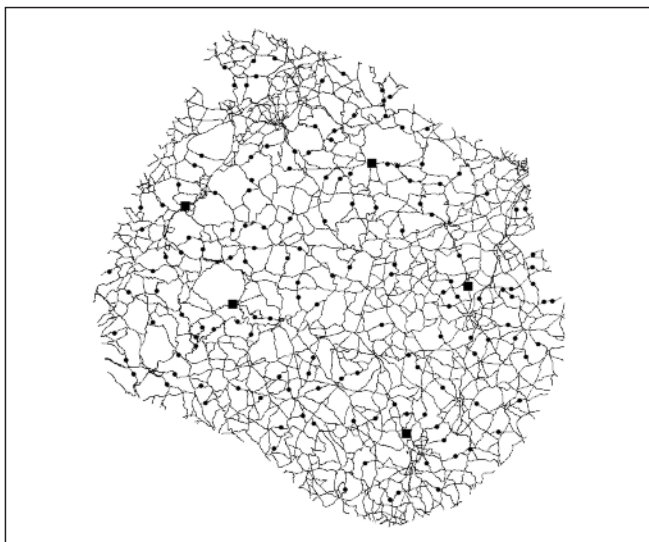


Abb. 4

Untersuchungsgebiet mit 5 Werken (Quadrate), 150 Poltern (Punkte) sowie Straßen (schwarz). Ausdehnung etwa 120 x 120 km.
Research area with 5 plants (squares), 150 stacks (points) and roads (black). Extent approx. 120 x 120 km.

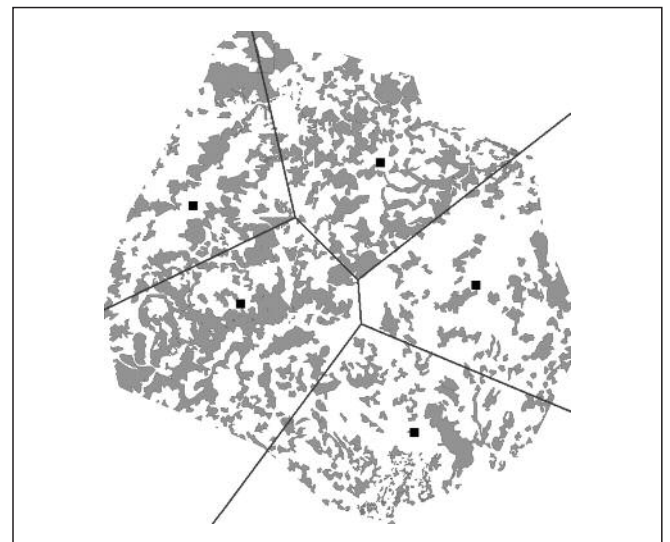


Abb. 5

THIESSSEN-Polygone als Einzugsgebiete der Werke der Holzindustrie (schwarze Quadrate) und Wald (grau).
THIESSSEN-polygons as catchment areas of the wood industry (black squares) and forest (grey).

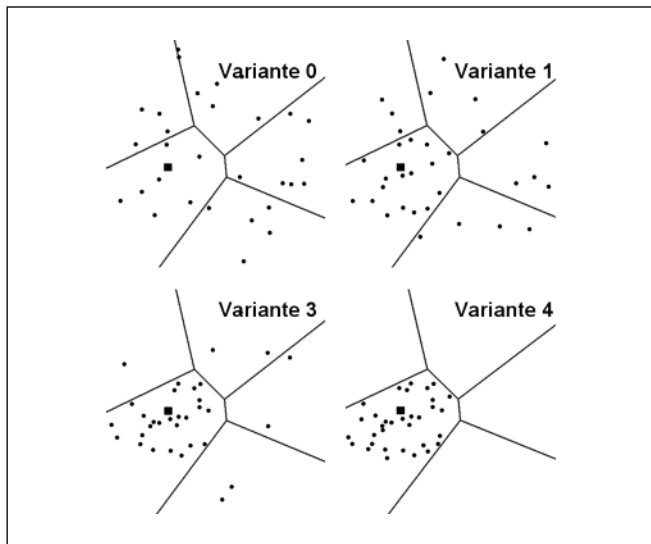


Abb. 6

Verteilung der Polter eines Werkes bei den verschiedenen Varianten. Variante 0 zufällige Verteilung. Bei den Varianten 1, 2 und 3 liegen 50%, 75% und 100% der Polter im Einzugsgebiet des Werkes.

Distribution of the stacks for one plant for the different variants. Variant 0 random distribution.

For the variants 1, 2 and 3, 50%, 75% and 100% of the stacks are lying within the catchment area of the plants.

Die Polter wurden so den Werken zugeordnet, dass ein bestimmter Prozentsatz der Polter in das Einzugsgebiet des entsprechenden Werkes zu liegen kam und der Rest der Polter zufällig auf die übrigen Einzugsgebiete verteilt wurde. Bei Variante 1 lag der Prozentsatz der Polter bei 50%, bei Variante 2 bei 75% und bei Variante 3 bei 100%.

Bildlich gesprochen wurden die Polter immer stärker auf die Umgebung der Werke konzentriert. Dies entspricht insofern der

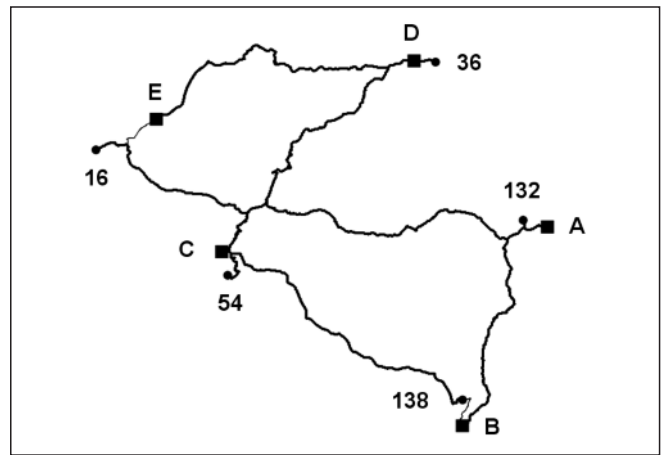


Abb. 7

5-Zyklus. Buchstaben = Senken, Zahlen= Quellen, Routenverlauf: A-132-B-138-C-54-D-35-E-16-A. Laststrecke 328 km, Leerfahrtstrecke 51 km, Leerfahrtreduktion > 80%.

5-cycle. Letters = sinks, numbers = sources, route: A-132-B-138-C-54-D-35-E-16-A. Cargo run 328 km, empty run 51 km, reduction of empty runs > 80%.

Realität des Einkaufsverhaltens der Holzindustrie, die Polter in Werksnähe wegen geringerer Transportkosten bevorzugt. In Abb. 6 sind die unterschiedlichen Varianten nochmals am Beispiel des südwestlichen Werkes dargestellt. Für die vier Varianten wurden alle Kombinationen Z_{5k} für $k \in \{2, 3, 4, 5\}$ durchgerechnet.

4.2 Berechnungen und Resultate

Für diese vier Varianten wurden alle Laststrecken zu den Werken und die Leerfahrtstrecken zu den jeweils komplementären Werken berechnet. Die Geometrien der Strecken wurden als Geodatensätze gespeichert. Deren Attributtabelle haben für die Lastfahrten die Attribute Polternummer, Fuhranzahl, das dem Polter zugeordnete

Tab. 1

Reduktion der gesamten Transportstrecke für die vier Varianten.

ERSPARNIS = (NORMALROUTE - ROUTE mit LR) in Prozent.

Weitere Erläuterungen siehe Text.

Reduction of the total transport route for the four variants.

Column ERSPARNIS = (NORMALROUTE - ROUTE mit LR)

(SAVINGS = (NORMAL ROUTE - ROUTE incl. reduction of empty runs) as a percentage. See text for further explanations.

VARIANTE	ZYKLEN nach [3]	ROUTE mit LR (km)	NORMALROUTE (km)	ERSPARNIS (%)
0	Z₅₅	57.861	82.391	29,77
Polter zufällig verteilt	Z₅₄	57.865	"	29,77
	Z₅₃	58.024	"	29,57
	Z₅₂	58.476	"	29,03
	Z₅₁	31.072	31.072	0
1%	Z₅₅	48.358	63.336	23,65
Polter zu 50 im Einzugs- gebiet	Z₅₄	48.359	"	23,65
	Z₅₃	48.440	"	23,52
	Z₅₂	48.573	"	23,31
	Z₅₁	31.072	31.072	0
2	Z₅₅	39.201	46.126	15,01
Polter zu 75% im Einzugs- gebiet	Z₅₄	39.220	"	14,97
	Z₅₃	39.235	"	14,94
	Z₅₂	39.591	"	14,17
	Z₅₁	31.072	31.072	0
3	Z₅₅	31.072	31.072	0
Alle Polter im Einzugsgebiet	Z₅₁	31.072	31.072	0

Tab. 2

Verteilung der 712 Fuhren auf die verschiedenen Zyklen.
Distribution Allocation of the 712 cargo runs to the different cycles.

VARIANTE	ZYKLEN	1-ZYKLUS	2-ZYKLUS	3-ZYKLUS	4-ZYKLUS	5-ZYKLUS
0	Z₅₅	152	334	177	44	5
Polter	Z₅₄	157	334	177	44	-
zufällig	Z₅₃	144	370	198	-	-
verteilt	Z₅₂	164	548	-	-	-
1	Z₅₅	366	158	123	60	5
Polter zu 50%	Z₅₄	367	158	123	64	-
im Einzugs-	Z₅₃	362	170	180	-	-
gebiet	Z₅₂	356	356	-	-	-
2	Z₅₅	514	118	51	24	5
Polter zu 75%	Z₅₄	517	114	57	24	-
im Einzugs-	Z₅₃	516	118	78	-	-
gebiet	Z₅₂	506	206	-	-	-

Werk und die Distanz der Laststrecke und für die Leerfahrten die Attribute Startwerk, Distanz der Leerfahrtstrecke zu einem Polter und das ihm zugeordnete Werk. Über diese beiden Attributtabelle können alle eben beschriebenen Zyklen berechnet und deren Routen ausgewählt werden.

In *Abb. 7* ist exemplarisch ein berechneter 5-Zyklus dargestellt. Die Leerfahrtstrecken (dünne Linien) sind oftmals von den Laststrecken (fette Linien) überdeckt. Der 5-Zyklus hat folgenden Verlauf: Der LKW startet bei Werk A fährt leer zu Polter 132, beladen zu Werk B, leer zu Polter 138, beladen zu Werk C, leer zu Polter 54, beladen zu Werk D, leer zu Polter 36, beladen zu Werk E, leer zu Polter 16 und letztlich beladen zum Startpunkt dem Werk A. Für diese Route wurde die etwas kürzere Notation *A-132-B-138-C-54-D-35-E-16-A* gewählt. Die Summe der Laststrecken dieses 5-Zyklus betrug 328 km und die Leerfahrtstrecke 51 km. Die Leerfahrtstrecke reduziert sich durch diese Routenbildung um über 80%, was auf die Transportstrecken der Normalrouten bezogen eine Ersparnis von über 40% ergibt.

Die Ergebnisse der gesamten Berechnungen sind in *Tabelle 1* zusammengestellt. Die Spalte ROUTE mit LR (Leerfahrtreduktion) wird gebildet durch die Summe der Laststrecken und die Summe der reduzierten Leerfahrtstrecken. Die Spalte ERSPARNIS in *Tab. 1* bezieht sich auf die prozentual eingesparte Strecke ROUTE mit LR gegenüber der NORMALROUTE.

Bei Variante 3 lagen die Polter zu 100% in den Einzugsgebieten, wobei, wie theoretisch erwartbar, überhaupt keine Leerfahrtreduktion möglich war. Die Summe der Transportstrecken sank hier auf ein Minimum von 31.072 km, welches durch keine Leerfahrtreduktion bei den anderen Varianten erreicht werden konnte.

In einem Zyklus werden mehrere Fuhren abgefahren. In *Tab. 2* ist die Verteilung der 712 Fuhren des Rechenbeispiels auf die verschiedenen Zyklen zusammengestellt. In Variante 0 bei Z_{55} kommen der 5-Zyklus einmal und der 4-Zyklus 11 Mal vor und bei Z_{54} kommen 4-Zyklen 11 Mal vor. Diese 44 und 49 Fuhren entsprechen knapp 7% der 712 Fuhren. Bei Variante 2 stieg der Anteil auf etwa 9% und bei Variante 3 sank er auf 4%. Durch eine Zunahme der Zyklenanzahl wird das Ergebnis kaum verbessert. Der Abstand zum Gesamtoptimum liegt für Z_{52} unter 5% und für Z_{53} unter 1%.

5. DISKUSSION DER RESULTATE

5.1 Berechenbarkeit, Rechenzeit und Effizienz der Leerfahrtreduktion

Ein erstes Ergebnis der Berechnungen widerlegt die Vermutung, dass eine höhere Komplexität bei Berechnungen immer zu einer

deutlich höheren Präzision führen müsse. Bereits für Z_{53} sinkt die Differenz zum Gesamtoptimum der Leerfahrtreduktion deutlich unter 1%. Die Approximation an das Optimum erfolgt in [3] für $k < n$ rascher als vermutet. Die Anzahl der Routenkombinationen sinkt für etwa 40 Werke auf rund 20.000.

Die Berechnung der Leerfahrtreduktion nach [3] benötigt bei den vorliegenden Datensätzen nur wenig Zeit (< 1 Min.). Aufwändiger war die Berechnung der Distanzen von allen Senken zu allen Quellen. In Netzwerken mit etwa 2,5 Mio. Knoten liegen die Rechenzeiten der Software ArcGis 9.3 für eine Route im Mittel bei etwa 5 Sekunden. Die Berechnung aller Routen von 5 Senken zu 150 Quellen dauert damit etwa 1 Stunde. Schnelle Routing Algorithmen, ca. 0,1 sec. pro Route, für Netzwerke mit 18 Mio. Knoten finden sich bei DELLING et al. (2009). Hinsichtlich der eigentlichen Optimierung durch Leerfahrtreduktion scheint das kombinatorische Vorgehen zeitlich effizienter als heuristische Verfahren (vgl. HIRSCH, 2006, S. 84 ff.) und besitzt höhere numerische Effizienz als lineare Programme (CARLSSON und RÖNNQVIST, 2007). Weiterhin bezieht sich eine heuristische Verbesserung immer auf einen Ausgangszustand, und die Differenz eines Ergebnisses zum eigentlichen Optimum bleibt unbekannt. Fließen noch weitere Randbedingungen in die heuristische Optimierung ein, dann wird schwer bewertbar, welchen Einfluss die einzelnen Randbedingungen haben und ob es nicht besser wäre, diese zu ändern. Heuristische Verfahren haben einerseits den Charme, auch für relativ komplexe Probleme verbesserte Lösungen zu finden, andererseits haben sie oft eine schwache analytische Qualität.

Die Effizienz der Leerfahrtreduktion selbst ist stark von der räumlichen Lage von Quellen zu Senken und der Position der Quellen hinsichtlich der Einzugsgebiete abhängig. Streuen die Quellen ohne Rücksicht auf die Einzugsgebiete der Senken sehr stark, dann erzielt man die höchsten Streckensummen der Normalrouten aber auch die höchsten Werte an Leerfahrtreduktion. Je mehr Quellen in den Einzugsgebieten der Senken liegen, umso mehr sinkt die Streckensumme der Normalrouten und der Anteil der Leerfahrtreduktion. Liegen alle Quellen in den Einzugsgebieten der Senken, nimmt die Streckensumme der Normalrouten einen so minimalen Wert an, der durch keine Leerfahrtreduktion erreicht werden kann. Diese Ergebnisse scheinen die Theorie der Anbaugebiete von THÜNEN (1822) in seinem isolierten Staat zu bestätigen (SPEIDEL, 1967; MANTEL, 1959, 1960).

5.2 Transportkosten, Einzugs- und Vertriebsgebiete

Eine Leerfahrtreduktion in der beschriebenen Form bildet einen Anlass zur Modifikation der Frachttarife. Die Tarife beziehen sich

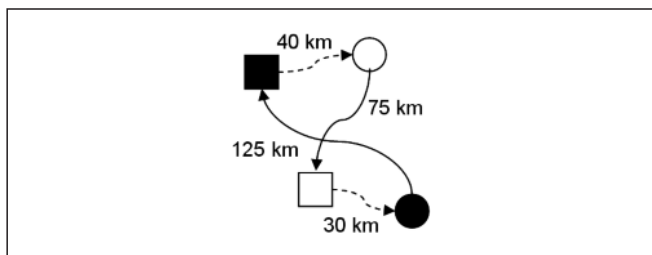


Abb. 8

2-Zyklus durch zwei Werke (Quadrate) mit zugehörigen Poltern (Kreise).

2-cycle with two plants (squares) and the respective stacks (circles).

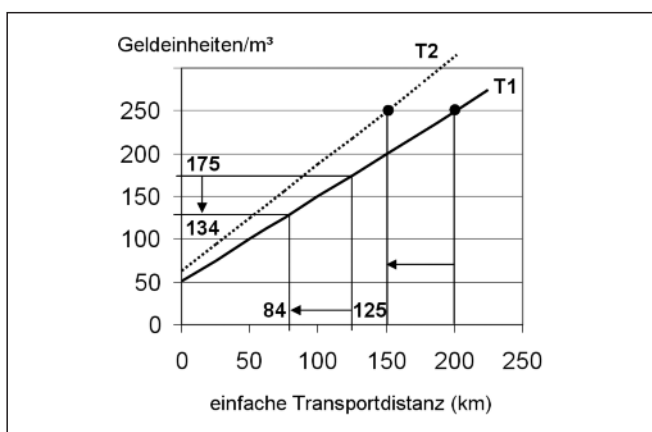


Abb. 9

Transportkostenlinien T1 und T2 zweier Tarife in Geldeinheiten/m³ für einfache Transportdistanzen in km und modifizierte Tarifkalkulation bei einem 2-Zyklus auf der Basis von T1 (Erläuterungen siehe Text).

Transport costs T1 and T2 of two different tariffs in abstract money units/m³ for single transport distances in km and modified tariff calculation for a 2-cycle based on T1 (see text for further explanations).

auf die einfache Distanz zwischen Senke und Quelle und implizit wird dadurch die gesamte Transportstrecke der Normalroute abgerechnet. Die modifizierte Tarifgestaltung soll an einem Beispiel verdeutlicht werden. In *Abb. 8* ist ein 2-Zyklus mit einer schwarzen und einer weißen Senke dargestellt.

Laut Tarif ohne Kooperation der beteiligten Werke wären eine Normalroute mit 125 km und eine zweite mit 75 km abzurechnen. Bei Kooperation der Werke fallen statt 200 km aber nur 70 km Leerfahrt an. Es erscheint vernünftig, diese Leerfahrtstrecke proportional zu den gefahrenen Laststrecken aufzuteilen. Die realen 70 km Leerfahrt sind also zu $75/200$ und $125/200$ dem weißen und dem schwarzen Werk zuzuteilen, was 26,25 km und 43,75 km an Leerfahrtstrecke ergibt. Die neuen Tarifstrecken haben eine Länge von $(26,25 \text{ km} + 75 \text{ km})/2 = 50,6 \text{ km}$ und $(43,75 \text{ km} + 125 \text{ km})/2 = 84,6 \text{ km}$. Die verstärkte Auslastung des LKW führt beim Auftraggeber zu geringeren Transportkosten.

Die Zusammenhänge sind in *Abb. 9* zusammengestellt, wobei die Transportkostenlinie T1 reale Tarife in abstrakten Geldeinheiten/m³ widerspiegelt. Die Tarifstrecke sinkt dabei für das schwarze Werk von 125 km auf 84 km und bewirkt eine Senkung der Transportkosten von 175 Geldeinheiten/m³ auf 134 Geldeinheiten/m³. Allgemein ist die Kostenabnahme von der Steigung der Geraden T1 abhängig. Dieses Vorgehen ist analog bei höheren Zyklen anzu-

wenden. Obwohl tariflich nicht berücksichtigt kann aus betriebswirtschaftlichen, ökologischen und sozialen Gründen (ERLER, 2000, S. 125 ff.) für die Spediteure eine Kollektion von Routen als optimierte Tagespensen für eine Woche zusammengestellt werden: Diese haben im Hinblick auf deren Heimatstandort möglichst geringe Distanzen bei An- und Abfahrt und berücksichtigen die täglichen Lenkzeiten. Man kann dieses Problem als Knapsack-Problem auffassen und über genetische Algorithmen lösen (MICHALEWICZ, 1999, S. 80 ff).

Die Abnahme der Transportkosten durch Leerfahrtreduktion eröffnet weiterhin zwei unterschiedliche Optionen. Zum einen lassen sich durch Leerfahrtreduktion die Transportkosten und Kohlenstoff-Emissionen senken, zum andern kann durch Leerfahrtreduktion bei konstanten Transportkosten der Einzugsbereich einer Senke vergrößert werden.

Die Transportkosten der letzten Jahre ließen größere Einzugsgebiete eines Werkes beim Holzeinkauf zu. Bei zukünftig steigenden Transportkosten sind die Werke möglicherweise nicht mehr zu ökonomisch vertretbaren Kosten mit Rundholz zu versorgen. In *Abb. 9* stellt die Transportkostenlinie T1 ein Tarifniveau dar, bei dem maximale Transportkosten von 250 Geldeinheiten/m³ einen maximalen Einkaufsbereich von etwa 200 km zulassen. Die Linie T2 markiert erhöhte Transportkosten um 25%. Bei gleichen Transportkosten von 250 Geldeinheiten/m³ verringert sich der maximale Einkaufsradius eines Sägewerkes auf 150 km und die Einkaufsfläche um 45%.

Die Veränderung der Transportkostenlinien beim Rundholztransport wurden für den Verkauf *frei Waldstraße* dargestellt. Beim Verkauf *frei Werk* hingegen kann umgekehrt aus der Höhe der Transportkosten auf das maximale Vertriebsgebiet geschlossen werden.

6. ZUSAMMENFASSUNG

Die Holzbereitstellungskette endet mit dem Prozess Transport von Rundholz zum Verbraucher. In Deutschland beträgt die jährlich transportierte Holzmenge 40–50 Mio. m³ bei einer Fahrtstrecke von 195 Mio. km. Pro m³ Holz werden dabei ca. 2 Liter Diesel verbraucht. Eine Verminderung der Transportstrecke verringert die Transportkosten und die CO₂-Emissionen. Dazu gibt es zwei Lösungsansätze: Kooperierende Verbraucher tauschen gleichartiges Rundholz (konkurrierende Produkte) mit kürzeren Transportentfernungen oder reduzieren für ungleichartiges Rundholz (nicht konkurrierende Produkte) die Leerfahrtstrecke durch Rückfrachten.

Die Lösung des so genannten „Transportproblems“ ergibt den optimalen Tausch von Rundholz mit gleichartigen Eigenschaften. Rückfracht oder Leerfahrtreduktion beim Rundholztransport beziehen sich auf die Routenbildung zwischen einer bestimmten Anzahl von Senken (Werke der Holzindustrie) und ihnen zugeordneten Quellen (Polter). Einfache Rückfrachten bestehen aus 2-Zyklen, die komplexere Leerfahrtreduktion besteht aus 3- oder n-Zyklen. Die schrittweise Optimierung bezieht alle Kombinationen von Senken und Quellen ein, bei denen die Summe der Leerfahrten kleiner ist als die Summe der Lastfahrten. Der beste Zyklus wird ausgewählt, die Quellen um die Abfuhr aktualisiert und der Vorgang startet erneut, bis keine Zyklen mit der Ordnung > 1 mehr möglich sind. Formel [3] hat den Nachteil dass der Aufwand $O((n-1)!)$ beträgt. Damit ist das Problem NP-schwer.

In einem Experiment mit 5 Werken und 150 Poltern wurde gezeigt, dass eine Optimierung über Kombinationen aus 2- und 3-Zyklen eine Leerfahrtreduktion ergibt, die weniger als 1% vom Gesamtoptimum abweicht. Unter dieser Restriktion bleiben auch für mehr Werke ($n > 50$) die Kombinationen numerisch berechenbar. Zyklen von einem Grad größer als 3 verbessern die Resultate der Optimierung nur noch marginal.

Den größten Einfluss auf die Leerfahrtreduktion oder die gesamte Transportstrecke (= Summe aus Last- und Leerfahrt) hat die Berücksichtigung der Einzugsgebiete der Senken, die hier als THIESEN-Polygone berechnet wurden. In verschiedenen Varianten wurden die Quellen immer stärker auf diese Einzugsgebiete konzentriert. Je weiter die Quellen um das Einzugsgebiet streuen, umso größer wird die Leerfahrtreduktion aber auch die gesamte Transportstrecke. Die Kompensation der gesamten Transportstrecke durch Leerfahrtreduktion führte nie zu der minimalen Streckensumme der Variante, bei der alle Quellen in den Einzugsgebieten lagen und keine Leerfahrtreduktion mehr möglich ist.

Im Mittel ist die Kostenreduktion durch Leerfahrtreduktion proportional zur Verringerung der Tarifstrecke. Die Analyse der Einzugsgebiete und der Positionen der Quellen erlaubt es, Standortfragen für Werke und ihre Dimensionierung mit Rücksicht auf die Versorgung und die Transportkosten zu klären. Entweder führt eine Leerfahrtreduktion zu geringeren Transportkosten oder lässt bei konstanten Transportkosten ein größeres Einzugs- oder Vertriebsgebiet eines Werkes zu.

7. Summary

Title of the paper: *Reduction of empty runs in round wood transportation.*

The wood supply chain ends with the process transport of round wood to the customer. In Germany, the annual transport volume of wood amounts to 40–50 million m³ with an overall transport distance of 195 million km. For every transported m³ of wood, two liters of diesel are consumed. A reduction of the transport route leads to lower transportation costs and CO₂ emissions. There are two solution approaches: cooperating customers swap similar round wood (competing products) with a shorter transportation distance or reduce empty runs by back freights for dissimilar round wood (non-competing products).

The solution of the so called “Transportation Problem” results in the optimal swap of round wood with similar properties (competing products, [1], Fig. 1, left and right). Back freights or the reduction of empty runs in the transport of round wood are related to a certain number of sinks (factories of the wood industry) and to their associated sources (stacks of round wood in the forest). Simple back freights can be described by 2-cycles (Fig. 1, middle); the more complex reduction of empty runs is outlined by 3- or n-cycles (Fig. 2). The gradual optimization involves all possible combinations of sinks and sources ([3], Fig. 4), for which the sum of empty runs is less than the sum of cargo runs [1]. The optimal cycle will be selected, the stacks are updated by the cargos, and the procedure starts again until 2-cycles or cycles of higher order are no longer possible. Formula [3] has the disadvantage that for a given number of sinks the number of combinations increases rapidly, with an effort of $O((n-1)!)$. Regarding this increase, the problem is NP-hard.

In an experiment with 5 sinks and 150 sources it was shown that the optimization using only combinations of 2- and 3-cycles results in a reduction of empty runs; their deviation from the overall optimum is less than 1% (Tab. 1, Tab. 2). Applying only 2 and 3-cycles, the combinations for more than 50 sinks are computable without numerical problems. When cycles with an order of greater than 3 are used, the improvement of the optimization results increases only marginally.

The catchment area of a sink has the highest impact on the reduction of empty runs or the overall length of a transport route (= sum of empty and cargo runs). Here, the catchment area was computed as THIESEN polygons (Fig. 5). One of the characteristics of these polygons is that every point within a polygon has a smaller distance to the own center than to the other centers. In dif-

ferent variants, the sources were more and more concentrated in the catchment area (Fig. 7). The more the sources disperse around the catchment area, the larger is the reduction of empty runs; however, the total length of the transport route (Tab. 1) also increases. The compensation of the overall transportation route by the reduction of empty runs never reached the minimum sum of route lengths, provided that all sources were located in their catchment areas and a reduction of empty runs was no longer possible.

On average, the reduction in transportation costs (Fig. 9) through reduction is proportional to the reduction of empty runs. The analysis of catchment areas and positions of the sources provides answers regarding the location of a factory and its dimensioning with respect to the supply and the transportation costs. A reduction of empty runs either leads to lower transportation costs or, at constant transportation costs, allows a larger catchment or distribution area of the factory.

8. Literatur

- BAUMANN, T. (2009): Herausforderung Holzbereitstellung. AFZ-DerWald 2. S. 65–67.
- BECKER, B., T. SMALTSCHINSKI, J. KLÄDKTE und G. BECKER (2009): Kundenspezifische Zuordnung von Erntebeständen und Sortimenten. AFZ-DerWald 2. S. 62–64.
- BEHRMANN, Th. (1996): Norwegen und das Reich unter Hákon (1217–1263) und Friedrich II (1212–1250). In: Hansische Literaturbeziehungen, hrsg. von SUSANNE KRAMARZ-BEIN. Berlin New York de Gruyter. S. 27–50.
- BLOECH, J. und G. B. IHDE (1997): Vahllens Großes Logistiklexikon. Logistik total. Verlag Vahlen. 1301 S.
- BODELSCHWINGH VON, E. (2006): Analyse der Rundholz Logistik in der Deutschen Forst- und Holzwirtschaft. Diss. TU München.
- BORCHERDING, M. (2007): Rundholztransportlogistik in Deutschland – eine transaktionskostenorientierte empirische Analyse. Diss. Hamburg. 252 S.
- CARLSSON, D. und M. RÖNNQVIST (2007): Backhauling in forest transportation: models, methods, and practical usage. Can. J. For. Res. 37. S. 2612–2623.
- CASSON, L. (1989): The Periplus Maris Erythraei. Text with Introduction, Translation and Commentary. Princeton.
- DANTZIG, G. (1966): Lineare Programmierung und Erweiterungen. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York. 712 S.
- DELLING, D., P. SANDERS, D. SCHULTES und D. WAGNER (2009): Algorithmics of Large and Complex Networks. Springer-Verlag, S. 117–139.
- DIETZ, A. (1910): Frankfurter Handelsgeschichte. Frankfurt a. M., Bd. 1. 275 S.
- DOMSCHKE, W. (1995): Logistik: Transport. 4. Auflage, München-Wien-Oldenburg. 266 S.
- DOMSCHKE, W. (1997): Logistik: Rundreisen und Touren. 4. Auflage, München-Wien. 290 S.
- ERLER, J. (2000): Forsttechnik. Verfahrensbewertung. Verlag Eugen Ulmer Stuttgart. 246 S.
- GAMBARDELLA, L. M., E. TAILLARD und G. AGAZZI (1999): MACS-VRPTW A Multiple Ant Colony System for Vehicle Routing Problems with Time Windows. In: D. CORNE, M. DORIGO and F. GLOVER, editors, New Ideas in Optimization. McGraw-Hill.
- GARDINER, M. und N. MEHLER (2007): English and Hanseatic Trading and Fishing Sites in Medieval Iceland: Report on Initial Fieldwork. Germania 85. S. 385–427.
- GENDREAU, M., G. LAPORTE und J. Y. POTVIN (1997): Vehicle routing: modern heuristics. In: Local Search in Combinatorial Optimizations, pp. 311–336, edited by E. Aarts and J.K. Lenstra, Wiley.
- GLOVER, F. (1986): Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. Comput. Oper. Res. 13. S. 533–549.
- GLOVER, F. und M. LAGUNA (1997): Tabu Search. Kluwer Academic Publishers.
- GRITZMANN, P. und R. BRANDENBERG (2005): Das Geheimnis des kürzesten Weges. Springer-Berlin-Heidelberg-New York. 362 S.
- HEIMBERG, U. (1981): Gewürze, Weihrauch, Seide – Welthandel in der Antike. Kleine Schriften zur Kenntnis der römischen Besetzungsgeschichte Südwestdeutschlands 27.
- HENK, V. (1996): Der hansische Handel mit Nahrungsmitteln. In: GÜNTER WIEGELMANN, RUTH-E. MOHRMANN (Hrsg.): Nahrung und Tischkultur im Hanseraum. Münster, New York. S. 23–48.
- HIRSCH, P. (2006): Optimization in Round Timber Transport. Diss. Universität Wien. 128 S.
- HIRSCH, P. (2010): Weniger Leerfahrten durch computergestützte Planung. Forstzeitung 121 (2), S. 8–9.
- HITCHCOCK, F. L. (1941): The distribution of a product from several sources to numerous localities. J. Math. Phys. 20. S. 224–230.

MAREK, N. (2001): Die ersten Global Players. Neue Zürcher Zeitung, Ressort Literatur und Kunst, 24. Februar 2001, Nr. 46. S. 86.
MANTEL, K. (1959): Die Standorts-, Intensitäts- und Preistheorie von Thünen und ihre Bedeutung für den Standort der Forstwirtschaft. Teil I-IV. AFJZ Jg. 130. S. 146, 165, 222, 256.
MANTEL, K. (1960): Die Standorts-, Intensitäts- und Preistheorie von Thünen und ihre Bedeutung für den Standort der Forstwirtschaft. Teil VI. AFJZ Jg. 131. S. 287.
MICHALEWICZ, Z. (1999): Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs. 3rd rev. And extended ed. Springer-Verlag Berlin-Heidelberg-New York. 378 S.

NEUMANN, K. (1975): Operations Research Verfahren Bd. 1. Karl Hanser Verlag München Wien. 377 S.
SMALTSCHINSKI, T. (2010): Optimierung des Rundholztransportes durch Reduktion der Last- und Leerfahrtstrecken. 30. GIL-Jahrestagung Stuttgart, Proceedings. S. 187–190.
SMALTSCHINSKI, Th. und G. BECKER (2008): Optimization of back freight transportation systems. October 21–28, 2008 FAO/ECE-Conference Portoroz, Slovenia.
SPEIDEL, G. (1967): Forstliche Betriebswirtschaftslehre. Verlag P. Paray, Hamburg und Berlin. 289 S.

Issues in forest inventories as an input to planning and decision processes

(With 1 Figure)

CH. KLEINN¹, G. STÄHL², L. FEHRMANN³ and A. KANGAS⁴

(Received November 2010)

KEY WORDS – SCHLAGWORTER

Information; national forest inventories, large area forest inventories, good inventory practice, precision, decision support.

Information; Nationale Waldinventur; Forstliche Großrauminventuren; Gute Inventurpraxis; Entscheidungen.

1. INTRODUCTION

Forest inventory in a narrow sense is the technical process of gathering data and providing information. That information is needed and demanded by researchers and decision- and policy-makers in forestry and numerous related sectors. Sustainability of forest management and forest development can only be implement-

ed and monitored on scientific grounds if and when the corresponding information is available at a sufficient level of quality, credibility and resolution.

Forestry has become more and more complex both regarding the management of forest enterprises and regarding the formulation of forest policies. The “one-dimensional” and specific orientation of forest management and policy towards wood production is history for quite some time. Decision making in forestry embraces a constantly increasing set of goals and challenges: while maintaining the production function for wood and non-wood forest products – the majority of the rural poor in developing countries depend on the forest as a resource and the forest and wood sector plays an economically relevant role in a number of countries – the forest ecosystem needs also to be taken care of while considering and maintaining multiple service functions at the same time. It is a complex task to reconcile these partially and seemingly contradictory goals and to achieve sustainability of all forest functions, from both the technical-scientific and from the political point of view. To plan for and to monitor that sustainability, adequate data and information are required as one component.

The demand for forest information for ‘new’ purposes is often substantial; an important example are the requirements for annual information on forests under the UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change) and the related legally binding process fixed in the Kyoto Protocol (IPCC, 2003). Recently, the REDD process with its demanding and yet not standardized assessment and monitoring requirements for the forest resource direct the attention of many researchers and political decision makers to for-

¹) Corresponding author: CHRISTOPH KLEINN. Professor of Forest Inventory and Remote Sensing, Chair of Forest Inventory and Remote Sensing, Burckhardt-Institute, Georg-August-Universität Göttingen, Büsgenweg 5, D-37077 Göttingen, Germany. Tel. +49 551 393472, Fax +49 551 399787. E-mail: ckleinn@gwdg.de

²) GÖRAN STÄHL. Professor of Forest Inventory, Department of Forest Resource Management, Swedish University of Agricultural Sciences, Umeå, Sweden. Tel. +46907868459, Fax. +4690778116. E-mail: Goran.Stahl@srh.slu.se

³) LUTZ FEHRMANN. Research Associate, Chair of Forest Inventory and Remote Sensing, Burckhardt-Institute, Georg-August-Universität Göttingen, Büsgenweg 5, D-37077 Göttingen, Germany. Tel. +49 551 39 3826, Fax. +49 551 39 9787. E-mail: lfehrma@gwdg.de

⁴) ANNIKA KANGAS. Professor of Forest Mensuration and Management, Department of Forest Resource Management, P.O. Box 27, 00014 University of Helsinki. Tel: +358-50-3750870. E-mail: annika.kangas@helsinki.fi