

Ein hierarchischer Ansatz des Risikomanagements zur Gestaltung robuster Liefer- und Transportnetzwerke

Patricia Rogetzer¹ (✉) und Stefan Minner¹

Technische Universität München, TUM School of Management,
Lehrstuhl für Logistik und Supply Chain Management
Arcisstraße 21, 80333 München, Deutschland
{patricia.rogetzer,stefan.minner}@tum.de

Zusammenfassung. In globalen Lieferketten existiert eine Vielzahl von operativen und strategischen Risiken. Dies sind etwa Unsicherheiten in Bezug auf Nachfrage, Lieferzeiten, Produktlebenszyklen und Preise. Üblicherweise erfolgt das Risikomanagement hierbei reaktiv: Konsequenzen der Risiken treten ein, dann wird entschieden, Maßnahmen zu treffen. Es können jedoch auch mögliche Störungen und Unterbrechungen auftreten, denen mit einer Fülle von Absicherungsmaßnahmen, z.B. zusätzlichen Kapazitäten und Beständen oder alternativen Lieferanten und Beschaffungsquellen, bereits proaktiv begegnet werden kann, um schnell auf Marktveränderungen reagieren zu können und Stillstände bzw. Produktionsausfälle durch Lieferverzögerungen in nachgelagerten Fertigungsstufen (Ausbreitung von Risiken entlang der Lieferkette, Ripple-Effekt) zu vermeiden. Die Aktualität dieses Themas zeigt sich auch dadurch, dass es sogar Versicherungen gegen diese Ausfälle gibt. Das Ziel dieser Arbeit ist es, einen zweistufigen hierarchischen Planungsansatz zu entwickeln, der auf der strategischen und taktischen Ebene robuste Kanten und Knoten für mehrstufige Transport- und Liefernetzwerke bestimmt und somit die Anzahl von Lieferanten und Dienstleistern sowie die Positionierung von Absicherungsmaßnahmen wie z.B. Sicherheitsbeständen bestimmt. Auf operativer Ebene, nach Realisierung der Unsicherheiten, ist die Nutzung (Wahl alternativer Transportwege, Platzierung von Auslieferungslager, Allokation von Bestellmengen) optimal zu planen, um die Propagierung von Risiken entlang der Lieferkette abzumildern. Mit dieser Arbeit sollen Erkenntnisse darüber gewonnen werden, wie wichtig Risikomanagement in der Gestaltung von Liefer- und Transportnetzwerken ist.

Schlüsselwörter: Modellierung unter Unsicherheit · Risikomanagement
· robuste Lieferketten · Unterbrechungen.

1 Motivation

Aktuelle Unterbrechungen von Rohstofflieferungen in Automobilzuliefernetzwerken und somit der Stillstand der weiteren Produktion oder die Sperrung der Rheintalbahn als eine der meist befahrenen Hauptverbindungen und eine der

wichtigsten Transportwege in Deutschland führten zu massiven Verzögerungen der Güterströme in Lieferketten. Diese und andere Störungen (siehe Sheffi, 2005, für weitere Beispiele) zeigen, dass Lieferketten nicht unverwundbar und ständig Risiken ausgesetzt sind. In Lieferketten existiert somit eine Vielzahl von Risiken, sowohl auf der operativen und taktischen (kurz- und mittelfristigen), als auch auf der strategischen (langfristigen) Ebene. Das sind etwa Unsicherheiten wie schwankende Nachfrage, lange Lieferzeiten, kurze Produktlebenszyklen, schwankende Preise und mögliche andere Störungen. Flexibilität und Anpassungsfähigkeit innerhalb der Lieferkette werden daher als wichtige Erfolgskriterien angesehen, die zur Widerstandsfähigkeit und Robustheit eines Liefer- und Transportnetzwerks beitragen, um selbst bei Ausfällen, Störungen und anderen Risiken wettbewerbsfähig bleiben und auf kurzfristige Änderungen in Nachfrage und Angebot schnell reagieren zu können (Lee, 2004; Sheffi, 2005). Mithilfe von Absicherungsmaßnahmen wie alternativen Lieferanten und Beschaffungsquellen, Transportwegen, zusätzlichen Beständen, Kapazitäten und strategischer Positionierung von Lägern und dergleichen können Maßnahmen und Konzepte sowohl strategischer als auch mittel- und kurzfristiger Natur getroffen werden, die es ermöglichen, diese Wettbewerbsfähigkeit zu erhalten (proaktiv) beziehungsweise wiederherzustellen (reaktiv). Auch Alternativen (Redundanzen) im Netzwerk sind wichtig, um eine Propagierung von Störungen (Netzeffekte, "Ripple Effect" siehe Ivanov et al., 2014) abzumildern und etwa Stillstände oder Produktionsausfälle durch Lieferverzögerungen in nachgelagerten Fertigungsstufen zu vermeiden.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es daher, einen hierarchischen Planungsansatz zu entwickeln (Schneeweiss, 2012), der auf der strategischen Ebene robuste Netzwerke (bestehend aus Kanten und Knoten) für mehrstufige Transport- und Liefernetzwerke bestimmt und die Anzahl und Standorte von Lieferanten und Dienstleistern zu bestimmen. Auf operativer Ebene, nach Realisierung der Unsicherheiten, ist die Nutzung (Wahl der Transportwege, Platzierung von Auslieferungslager, Allokation von Bestellmengen) zu planen.

2 Literaturüberblick

Die Thematik des Risikomanagements in Lieferketten (siehe etwa Ivanov, 2018) ist gerade in weltweiten, stark verflochtenen Netzwerken und langen Lieferketten, wo Abhängigkeiten und Informationsaustausch zwischen den Akteuren eine große Rolle spielen und daher die Schadensanfälligkeit steigt, präsent und Maßnahmen zur Risikoabsicherung sind daher unumgänglich. Risikomanagement in Lieferketten bedeutet, dass man mit möglichen Risiken, die auftreten können, gezielt und effizient umgeht, damit die Geschäftstätigkeiten fortgeführt werden können und das Ziel von Lieferketten (Befriedigung der Nachfrage zu den bestmöglichen Kosten) weiter verfolgt werden kann. Bei Störungen in Netzwerken kann es manchmal auch optimal sein, bestimmte Nachfragen nicht zu bedienen (Rationierung). In diesem Zusammenhang kann man Zusammenarbeit, Koordination und Abstimmung mit den beteiligten Akteuren als wesentlichen

Beitrag zum Erfolg sehen (Simatupang and Sridharan, 2002). Es ist bedeutend, Risikoquellen entlang der Lieferkette zu analysieren und zu beurteilen beziehungsweise im Vorfeld zu vermeiden. Die typischen langfristigen Entscheidungen, die man im strategischen Bereich des Lieferkettenmanagements trifft, betreffen unter anderem auch die Standortwahl der Produktionsstätten und -anlagen und die überlegte Platzierung von Warenlagern (Chopra and Meindl, 2016, Farahani and Hekmatfar, 2009), die auch bereits Weichen für ein erfolgreiches Risikomanagement stellen.

2.1 Unsicherheiten und Störungen in Netzwerken

Quellen von Unsicherheiten in Netzwerken werden in stochastischen Modellen der verfügbaren Literatur auf vielfältige Weise abgebildet. Snyder et al. (2016) geben einen Überblick über mögliche Quellen von Liefer- und Versorgungsunsicherheiten wie etwa durch Unterbrechungen entlang der Lieferkette durch Störungen, Unsicherheiten in Bezug auf Kapazitäten oder Lieferzeiten, schwankende Erträge aus Produktionsverfahren oder auch unsichere Nachfrage. Wie auch Yao and Minner (2017) erwähnen, sind Unterbrechungen/Störungen ein Teilbereich von Lieferunsicherheiten. Nach Snyder et al. (2016) sind das zufällig auftretende Ereignisse, die dazu führen, dass die Funktionsfähigkeit der Lieferkette beeinträchtigt wird. Das kann einerseits interne Gründe haben, wie etwa Maschinenausfälle, andererseits aber auch externe Ursachen wie unvorhersehbare Naturkatastrophen oder Schlechtwetter.

Unter Störungen/Unterbrechungen (*disruptions*) versteht man dabei meistens einzelne Ereignisse (Naturkatastrophen wie Erdbeben, Feuer oder Streiks), während man unsichere Erträge (*yield uncertainty*) als kontinuierlich wahrnimmt (Produktionsverfahren mit Ausschuss, schlechte Erträge bei der Ernte etc.). Diese Unterbrechungen können temporär (etwa durch Streik eines Lieferanten) oder dauerhaft (beispielsweise durch Insolvenz eines Lieferanten) sein. Eine Klassifizierung möglicher Risiken nach Stärke des Effekt (Folgen) und Eintrittswahrscheinlichkeit (Häufigkeit des Auftretens) geben etwa Van Mieghem and Allon (2015). Selbst geringe Unterbrechungen in der Lieferkette können verheerende Auswirkungen haben, die sich in Liefer- und Transportnetzwerken fortspinnen (Kaskadeneffekt). Im Zusammenhang mit den genannten Unsicherheiten kommen gerade in den letzten Jahren auch neuartige Unsicherheiten und Herausforderungen entlang der entgegengesetzten Flussrichtung (*reverse logistics*) hinzu, die mit unsichere Mengen, Zeiten und Qualitäten von Altprodukten einhergehen. Diese *return uncertainties*, die vor allem in Lieferketten mit Nachhaltigkeitsfokus (wie etwa Beschaffung von Material aus recycelten Quellen, siehe zum Beispiel Rogetzer et al., 2019) auftreten, sollten ebenfalls beachtet werden.

2.2 Risikomanagement in Lieferketten

Risikomanagement in Lieferketten (*Supply Chain Risk Management*) kann weit gefasst werden und in unterschiedliche Stufen unterteilt sein. Zur Analyse von Risiken gehört deren Identifikation, Klassifizierung und Bewertung. Um Risiken

abzuschwächen, versucht man einerseits, die Wahrscheinlichkeit zu reduzieren, dass eine Störung zu einem kompletten Stillstand der Lieferkette mit Produktionsausfall und dergleichen führt. Andererseits versucht man, negative Konsequenzen solcher unerwünschten Ereignisse zu verringern und die Robustheit der Lieferkette beziehungsweise des Netzwerks dadurch zu erhöhen (Tang, 2006b; Tang, 2006a). Absicherungsmaßnahmen ermöglichen es, auf Störungen rasch zu reagieren und mögliche negative Effekte zu reduzieren. Risikomanagement kann proaktiv (als Sicherheitsmaßnahme) und reaktiv (wenn Ereignisse bereits eingetreten sind als Korrekturmaßnahme) angewandt werden. Yao and Minner (2017) geben einen Überblick zu Modellen und Methoden der proaktiven und reaktiven Steuerung von Lieferantennetzwerken mit mehreren Lieferoptionen. Weishäupl and Jammernegg (2011) stellen ein Konzept zum Risikomanagement in Lieferketten vor, das sowohl proaktiv aber auch reaktiv angewandt werden kann.

In der Literatur wird eine Vielzahl von möglichen “robusten” Strategien genannt (wie etwa auch in Tang, 2006b), die helfen können, das Liefer- und Transportnetzwerk gegen Unsicherheit und Störungen zu festigen. Ein klassisches Beispiel, das in der Literatur oft genannt wird, ist die duale oder multiple Beschaffungsstrategie (*dual/multiple sourcing*), wo Materialien aus mehr als einer Quelle beschafft werden und man bei Wegfall eines Lieferanten Alternativen hat. Auf der Ebene der Lieferanten aber auch unter Spediteuren können Absicherungsmaßnahmen getroffen werden, indem strategische Allianzen mit Partnern auf derselben Ebene geformt werden. Eine weitere Maßnahme im Distributionsbereich wäre etwa, bei Beförderungen zwischen den Knoten flexibel zu bleiben und eine multimodale Transportstrategie (etwa Schiene/Bahn zusätzlich zum Landtransport/LKW oder dergleichen) anzuwenden. Obwohl der Trend bei Lagerbeständen eher in Richtung Just-in-Time Lieferungen geht und somit kaum bis keine Ware auf Lager bei den Abnehmern liegt, sollte - gerade für das Risikomanagement - doch das Konzept der (Sicherheits-)bestände genannt werden. Platziert man die Waren an wichtigen, strategischen Orten im Netzwerk, auf die mehrere Akteure Zugriff haben, kann der Servicegrad trotz eventuell auftretender Störungen im Netzwerk besser eingehalten werden, weil man schnell Zugriff auf die Produkte hat. Auch *Postponement*, also die Produktionsstrategie, bei der Produkte so lange wie möglich generisch und standardisiert bleiben, ermöglicht es, bei unvorhergesehenen Ereignissen entlang der Lieferkette besser reagieren zu können (Weskamp et al., 2019).

2.3 Netzwerkdesign von Lieferketten unter Unsicherheit

Govindan et al. (2017) sehen Forschungsbedarf in der Integration von strategischen und taktischen/operativen Entscheidungen in Netzwerkdesigns von Lieferketten unter Unsicherheit. Die überwiegende Zahl von verfügbaren Modellen und Methoden im Bereich des Risikomanagements von Lieferketten verfolgt nur die Sicht von Einzelunternehmen (wie etwa auch Tomlin, 2006 oder Rogetzer et al., 2018); zu mehrstufigen und insbesondere dezentralen Ansätzen hingegen existieren bisher kaum geeignete Ansätze (Klosterhalfen et al., 2014, Snyder et al., 2016).

Einen Literaturüberblick zu mehrstufigen Lagerhaltungssystemen geben de Kok et al. (2018), die auch aufzeigen, dass es hier noch Forschungsbedarf gibt. Mit Hilfe eines spieltheoretischen Ansatzes der mathematischen Programmierung (Bilevel-Programming) wird in Fontaine and Minner (2014) ein Transportnetzwerk unter Antizipation des Nutzerverhaltens optimiert. In Fontaine et al. (2018) wird dieser Ansatz auf Gefahrgutnetze erweitert und es werden verschiedene Risikomaße auf Netzwerkebene vorgestellt sowie entsprechende Auswirkungen auf die resultierenden Netze analysiert.

3 Methodik: Zweistufiges stochastisches Programm

Einer der Ansätze zur Modellierung ist ein zweistufiges stochastisches Programm. Auf der ersten Planungsebene wird hierbei über ein mehrstufiges Liefer- und Transportnetzwerk entschieden (Netzwerk bestehend aus Knoten verbunden durch Transportverbindungen repräsentiert als Kanten mit zugrundeliegenden Distanzen, Kosten und Zeiten, siehe vereinfacht in Abbildung 1), das auf verschiedene reale Problemstellungen anwendbar sein kann. Knoten repräsentieren dabei Akteure oder Umladepunkte in der Lieferkette (Vorlieferanten, Lieferanten, Hersteller, Händler, (zentrale oder regionale) Warenlager, Endkonsumenten), Kanten verdeutlichen gerichtete Warenflüsse mit Kapazitäten vom über- zum untergeordneten Knoten entlang der Lieferkette.

Hierbei, im Vergleich zur bisherigen Literatur (siehe auch Klosterhalfen et al., 2014), fokussieren wir auf ein mehrstufiges Netzwerk mit mehreren Lieferanten (*multi-echelon multisupply model*). Wir nehmen an, es gibt eine Vielzahl an Lieferanten ($L_1 \dots L_l$) an verschiedenen Standorten mit jeweiligen Vorlieferanten ($P_1 \dots P_p$), die die Hersteller ($M_1 \dots M_m$) heranziehen können, um Rohstoffe, Zulieferteile, Halbfertigprodukte, Komponenten und dergleichen zuzukaufen. Die Waren werden dann beispielsweise in Warenlager ($W_1 \dots W_w$) transportiert und schließlich an die Endkunden ($B_1 \dots B_b$) ausgeliefert.

Entlang der Stufen der Lieferkette können kritische Knotenpunkte und Wege identifiziert werden (beispielhaft als fettgedruckte Kanten in Abbildung 1 dargestellt). Lieferant S_1 wird beispielsweise üblicherweise nur von Vorlieferant P_2 beliefert (*single sourcing*), was zu einem erhöhten Ausfallrisiko führt. Ein robustes Netzwerk bindet nun den Vorlieferanten P_1 ein, der die Rohmaterialien (gegebenenfalls zu anderen Konditionen) ebenfalls zur Verfügung stellen kann. Vorlieferant P_2 ist daher eine alternative Lieferoption (*dual sourcing* [1]), auf die zurückgegriffen werden kann, falls P_1 ausfällt. Auf der nächsten Stufe wird etwa angenommen, dass ein Hersteller von Mobiltelefonen (oder Komponenten davon) seine primären Rohstoffe (etwa kritische Materialien) üblicherweise von einem (globalen) Hauptlieferanten bezieht (Lieferant L_1), was dadurch zu einem kritischen Weg (eingezeichnet in Abbildung 1 mit fettgedruckter Kante) führt. Dieser Lieferant unterliegt Preisschwankungen am Rohstoffmarkt und möglichen Ausführbeschränkungen. Als Absicherungsmaßnahme kommt etwa ein zweiter (jedoch lokaler) Lieferant ins Spiel, der Rohmaterialien aus (lokalen) eventuell sogar recycelten Quellen anbietet (Recycling wird selbst durchgeführt,

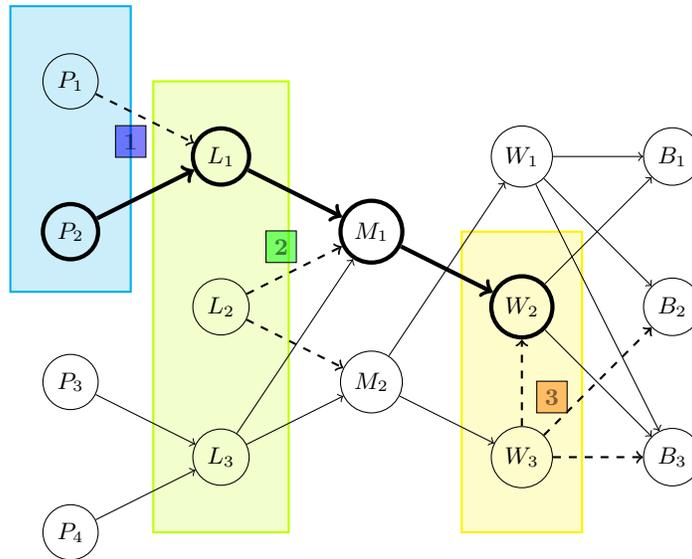


Abb. 1. Beispiel eines mehrstufigen Transport- und Liefernetzwerks mit mehreren Vorlieferanten (P), Lieferanten (L), Herstellern (M), Warenhäuser (W) und Konsumenten (B) mit Routen (voll) und Ersatzrouten (gestrichelt) sowie kritischen Knoten und Kanten (fettgedruckt)

keine Abhängigkeit zu Vorlieferanten) und als Alternativlieferant im Falle von Störungen bei Lieferant L_1 herangezogen werden kann. Dadurch können auch *alternative Transportwege und -träger* ausgenutzt werden [2]. Im Falle des Ausfalls des Hauptlieferanten (Wegfall eines Knotens) kann der Hersteller in der Produktionsstätte auf die andere(n) Alternative(n) ausweichen, das Netzwerk wird dadurch robuster und die Versorgung mit Rohmaterial sichergestellt. Die Wahl einer geeigneten Einkaufsstrategie wird als wichtiger Treiber für die Robustheit einer Lieferkette unter Unsicherheit gesehen. Eine weitere Alternative im schematischen Netzwerk stellt Warenlager W_3 dar, das - eventuell aufgrund seiner vorteilhaften Lage - Güter in ein anderes Warenlager befördern (*Transshipment* [3]) oder die Belieferung von Kunden direkt vornehmen kann, wenn W_2 , welches am kritischen Weg liegt, Probleme hat. Durch den gezielten Einsatz von Alternativen im Netzwerk kann die Vulnerabilität einer Lieferkette reduziert und die Stabilität gestärkt werden.

Basierend auf diesem Ausgangsnetzwerk werden mithilfe von Bäumen Szenarien mit Eintrittswahrscheinlichkeiten abgebildet, die es erlauben, an wichtigen (systemischen) Knotenpunkten des Netzwerks unterschiedliche Probleme (mit Eintrittswahrscheinlichkeiten und Auswirkung) abzubilden, die zu Ausfällen von Knoten und Kanten führen. Kurzfristige (operative) Entscheidungen werden mittels Netzwerkflussproblemen gelöst. Die erste Entscheidungsstufe berücksichtigt dabei die erwarteten Kosten aus der zweiten Stufe.

3.1 Stufe 1: Netzwerkdesignproblem unter Unsicherheit

In einer ersten Phase wird entschieden, wie das Netzwerk aussieht (Designentscheidung), welche Knoten der Menge K (Lieferanten, Hersteller, Warenlager) und Transportverbindungen (Kanten V) berücksichtigt werden.

Wir haben also, generell gesprochen, ein Liefer- und Transportnetzwerk N bestehend aus einer Menge von Knoten K , die die Akteure (etwa Lieferanten L , Hersteller P etc.) in der Lieferkette abbilden und einer Menge an Kanten V zwischen diesen Knoten. Des Weiteren werden Quellen- O sowie Senkenknoten D angenommen. In diesem Netzwerk wird ein Produkt angeboten, das von allen Quellenknoten geliefert werden kann. Alle Senkenknoten (Endkonsumenten) haben eine gegebene Nachfrage nach diesem Produkt.

$$N = (K, V, O, D) \quad (1)$$

Im Netzwerkdesignproblem wird für alle Knoten $i \in K$ entschieden, ob diese geöffnet werden oder nicht. Dies wird mithilfe der binären Entscheidungsvariable Y_i dargestellt.

$$Y_i = \begin{cases} 1 & \text{falls Knoten } i \text{ geöffnet wird} \\ 0 & \text{falls Knoten } i \text{ nicht geöffnet wird} \end{cases} \quad (2)$$

$$\forall i \in K$$

Für jeden Knoten $i \in K$ fallen Kosten g_i für das Öffnen dieses Knotens an.

Auch für die Kanten (Verbindungen) im Netzwerk wird simultan vorgegangen und entschieden, welche geöffnet werden. Ob eine Kante geöffnet wird, wird wieder mittels einer binären Entscheidungsvariable festgelegt. Für die Öffnung der Verbindung v_{ij} von Knoten $i \in K$ nach Knoten $j \in K$ fallen Kosten c_{ij} an. Falls geöffnet, hat die Verbindung eine gegebene Kapazität r_{ij} , andernfalls ist die Kapazität 0.

$$X_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{falls die Kante zwischen } i \text{ und } j \text{ geöffnet wird} \\ 0 & \text{falls die Kante zwischen } i \text{ und } j \text{ nicht geöffnet wird} \end{cases} \quad (3)$$

Die Formulierung des Netzwerkdesignproblems hat zum Ziel, den erwarteten Gewinn in der Lieferkette Z zu maximieren, der sich aus den generierten Umsätzen für verkaufte Produkte und den Kosten im Liefer- und Transportnetzwerk, die für die zu öffnenden Knoten und die zu öffnenden Kanten anfallen, zusammensetzt (Zielfunktion 4). Nebenbedingungen 5 und 6 stellen sicher, dass eine Verbindung zwischen zwei Knoten nur geöffnet werden kann, wenn die beide Knoten auch geöffnet sind. M muss hierfür ausreichend groß angenommen werden.

Nach Stufe 1 sind die ausgewählten Knoten $K^S = \{i \in K | Y_i = 1\}$ und die ausgewählten Verbindungen $V^S = \{v_{ij} \in V | X_{ij} = 1\}$ bekannt. Die ausgewählten Mengen an Knoten K^S und Kanten V^S werden in einem Szenariobaum (siehe dazu Høyland and Wallace, 2001) dargestellt. Jeder Knoten hat dabei einen Vorgänger und einen Nachfolger bis hin zur Wurzel des Baumes. Es kann dargestellt werden, an welchen wichtigen (systemischen) Knotenpunkten des Netzwerks unterschiedliche Unterbrechungen und Unsicherheiten (mit Eintrittswahrscheinlichkeiten) eintreten können, die zu Ausfällen von Knoten und Kanten im Netzwerk führen. Jeder einzelne Pfad vom äußerstem Knoten zur Wurzel repräsentiert dann ein Szenario ω . Basierend auf dem Ausgangsnetzwerk in Stufe 1 realisiert sich dann ein mögliches Szenario $\omega \in \Omega$, welches für alle geöffneten Kanten im Netzwerk entweder 0 (was einem Ausfall der Kante entspricht) oder die Kapazität der Kante r_{ij}^ω zurückgibt.

In Stufe 2 wird dann ein Netzwerkflussproblem formuliert, das den maximalen Netzwerkfluss aus Stufe 2 unter Kapazitätsszenario ω zurückgibt, $E[f_\omega^*]$ ist der erwartete Netzwerkfluss unter Berücksichtigung dieser Szenario-Realisierungen (siehe Abschnitt 3.2).

$$\max Z = \pi E[f_\omega^*] - \sum_{i \in K} g_i Y_i - \sum_{i \in K} \sum_{j \in K} c_{ij} X_{ij} \quad (4)$$

s. t.

$$\sum_{j \in K} X_{ij} \leq M \times Y_i \quad \forall i \in K \quad (5)$$

$$\sum_{i \in K} X_{ij} \leq M \times Y_j \quad \forall j \in K \quad (6)$$

3.2 Stufe 2: Netzwerkflussproblem nach Realisierung der Unsicherheiten

Zur Formulierung des Netzwerkflussproblems wird eine fiktive Quelle q eingeführt, die Verbindungen unbeschränkter Kapazität mit allen (fixierten) Quellenknoten O im Netzwerk hat. Zusätzlich wird eine fiktive Senke s eingeführt, die Verbindungen mit allen Senkenknoten des Netzwerks D hat. Die zusätzlichen Kanten von q nach O und von D nach s werden nun zu den Verbindungen V^S hinzugefügt. Alle zusätzlichen, neu eingeführten Knoten werden zur Knotenmenge K^S hinzugefügt. Die Kapazität der Kanten von Knoten $d \in D$ zur Senke s ist r_{ds}^ω und stellt die Nachfrage der Endkonsumenten dar, die maximal möglich bedient werden sollen.

Das Problem, das auf Stufe 2 gelöst wird, maximiert den Fluss f von der Quelle q zur Senke s . Für jede Kante $v_{ij} \in V^S$ wird der Fluss über die Verbindung als w_{ij} definiert. Außerdem werden für alle $i \in K^S$ im Netzwerk alle Vorgänger-Knoten (Knoten der vorherigen Stufe, direkt mit i verbunden) in Menge $P(i)$ gefasst. Gleichermaßen werden für alle $i \in K^S$ im Netzwerk alle Nachfolger-Knoten (Knoten der folgenden Stufe, die direkt mit k verbunden sind) in Menge $S(i)$ gefasst.

Das Entscheidungsproblem auf der zweite Stufe sieht somit wie folgt aus:

$$\max f \tag{7}$$

s.t.

$$\sum_{o \in O} w_{qo} = f \tag{8}$$

$$\sum_{i \in P(k)} w_{ik} = \sum_{j \in S(k)} w_{kj} \quad \forall k \in K^S \setminus \{q, s\} \tag{9}$$

$$\sum_{d \in D} w_{ds} = f \tag{10}$$

$$0 \leq w_{ij} \leq r_{ij}^\omega \quad \forall i, j \in K^S \tag{11}$$

$$w_{ij} = 0 \quad \forall i, j \in K \setminus K^S \tag{12}$$

Ziel ist es, den Fluss f durch das Netzwerk zu maximieren, sodass so viel wie möglich von den Quellknoten O zu den Senkenknoten D geroutet wird. Die Zielfunktion (7) soll daher den Fluss durch das Netzwerk maximieren. Die Entscheidungsvariablen im Netzwerkflussproblem sind daher die Mengen w_{ij} , die über die Kanten von Quellen zu Senken geliefert/transportiert werden. Der resultierende optimale Fluss ist f_ω^* . Die erste Nebenbedingung (8) stellt sicher, dass aus den Quellenknoten (Menge O) nur ausgehende Flüsse stattfinden, Nebenbedingung (10) besagt, dass in Senkenknoten (Menge S) nur eingehende Flüsse stattfinden dürfen. Die Bedingung zum Flusserhalt (9) besagt für alle Knoten K , dass in jeden Knoten, abgesehen von Quelle und Senke, genau so viel hereinfließen muss wie wieder herausfließt. Nebenbedingung (11) besagt, dass der Wert des Flusses auf einer Kante mindestens 0 sein muss und höchstens so groß wie die Kapazität dieser Kante sein darf (Kapazitätskonformität). Flüsse auf nicht vorhandenen bzw. gestörten Kanten werden dadurch verboten, dass Nebenbedingung (12) den Wert dieser Kanten auf 0 setzt.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Weltweit verflochtene, gegenseitig abhängige Liefer- und Transportnetzwerke bieten einerseits die Vorteile von Vernetzung, Schnelligkeit und höherer Spezialisierung, gehen aber andererseits mit Risiken einher, die es gilt, effektiv zu managen. In dieser Arbeit werden einige klassische Maßnahmen diskutiert, die solche Netzwerke unterstützen können, um proaktiv und reaktiv auf Unterbrechungen reagieren und auf potenzielle Probleme vorbereitet sein zu können. Es wird ein hierarchischer Ansatz vorgestellt, der in weiterer Folge ermöglichen soll, verschiedene Unterbrechungsszenarien abzubilden, die Auswirkungen auf die Netze aufzuzeigen und zu analysieren sowie Liefer- und Transportnetzwerke darauf aufbauend zu optimieren. Als nächster Schritt ist angedacht, numerische Beispiele und Analysen durchzuführen, um die Vorteile von Risikomanagementstrategien in Netzwerken aufzuzeigen zu können.

Literaturverzeichnis

- Chopra, S. and Meindl, P. (2016). *Supply Chain Management. Strategy, Planning & Operation*. 6. Auflage, Pearson Education Limited.
- de Kok, T., Grob, C., Laumanns, M., Minner, S., Rambau, J., and Schade, K. (2018). A typology and literature review on stochastic multi-echelon inventory models. *European Journal of Operational Research*, 269(3):955–983.
- Farahani, R. Z. and Hekmatfar, M. (2009). *Facility location: concepts, models, algorithms and case studies*. Springer.
- Fontaine, P., Crainic, T., Gendreau, M., and Minner, S. (2018). Population Based Risk Equilibrium for the Hazmat Transport Network Design Problem. Working Paper, Technical University of Munich.
- Fontaine, P. and Minner, S. (2014). Benders decomposition for discrete–continuous linear bilevel problems with application to traffic network design. *Transportation Research Part B: Methodological*, 70:163–172.
- Govindan, K., Fattahi, M., and Keyvanshokoo, E. (2017). Supply chain network design under uncertainty: A comprehensive review and future research directions. *European Journal of Operational Research*, 263(1):108–141.
- Høyland, K. and Wallace, S. W. (2001). Generating scenario trees for multistage decision problems. *Management Science*, 47(2):295–307.
- Ivanov, D. (2018). *Structural Dynamics and Resilience in Supply Chain Risk Management*. Springer.
- Ivanov, D., Sokolov, B., and Dolgui, A. (2014). The ripple effect in supply chains: trade-off ‘efficiency-flexibility-resilience’ in disruption management. *International Journal of Production Research*, 52(7):2154–2172.
- Klosterhalfen, S. T., Minner, S., and Willems, S. P. (2014). Strategic safety stock placement in supply networks with static dual supply. *Manufacturing & Service Operations Management*, 16(2):204–219.
- Lee, H. L. (2004). The triple-A supply chain. *Harvard Business Review*, 82(10):102–113.
- Rogetzer, P., Silbermayr, L., and Jammerneegg, W. (2018). Sustainable sourcing of strategic raw materials by integrating recycled materials. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 30(3):421–451.
- Rogetzer, P., Silbermayr, L., and Jammerneegg, W. (2019). Sustainable Sourcing including Capacity Reservation for Recycled Materials: A Newsvendor Framework with Price and Demand Correlations. Working Paper, WU Wirtschaftsuniversität Wien.
- Schneeweiss, C. (2012). *Distributed decision making*. Springer Science & Business Media.
- Sheffi, Y. (2005). The resilient enterprise: overcoming vulnerability for competitive advantage. *MIT Press Books*.
- Simatupang, T. M. and Sridharan, R. (2002). The collaborative supply chain. *The International Journal of Logistics Management*, 13(1):15–30.

- Snyder, L. V., Atan, Z., Peng, P., Rong, Y., Schmitt, A. J., and Sinoysal, B. (2016). OR/MS models for supply chain disruptions: A review. *IIE Transactions*, 48(2):89–109.
- Tang, C. S. (2006a). Perspectives in supply chain risk management. *International Journal of Production Economics*, 103(2):451–488.
- Tang, C. S. (2006b). Robust strategies for mitigating supply chain disruptions. *International Journal of Logistics: Research and Applications*, 9(1):33–45.
- Tomlin, B. (2006). On the value of mitigation and contingency strategies for managing supply chain disruption risks. *Management Science*, 52(5):639–657.
- Van Mieghem, J. A. and Allon, G. (2015). *Operations strategy: principles and practice*. 2. Auflage, Dynamic Ideas, Belmont.
- Weishäupl, M. and Jammerneegg, W. (2011). A conceptual framework for the analysis of supply chain risk. In Reiner, G., editor, *Rapid Modelling and Quick Response*, pages 331–344. Springer.
- Weskamp, C., Koberstein, A., Schwartz, F., Suhl, L., and Voß, S. (2019). A two-stage stochastic programming approach for identifying optimal postponement strategies in supply chains with uncertain demand. *Omega*, 83:123–138.
- Yao, M. and Minner, S. (2017). Review of multi-supplier inventory models in supply chain management: An update. DOI: 10.2139/ssrn.2995134.