

Strategische Optimierung von Produktionsnetzwer- ken in der Spezialchemie

GOR – AG SCM

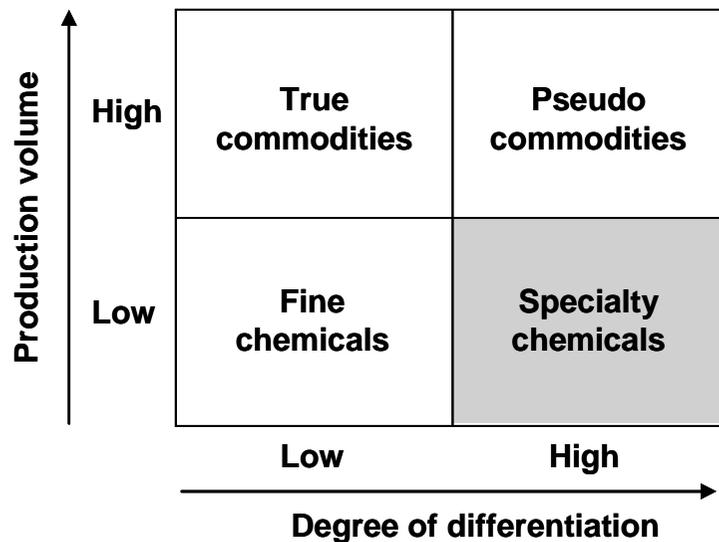
München, 5. Mai 2006

Reinhard Hübner

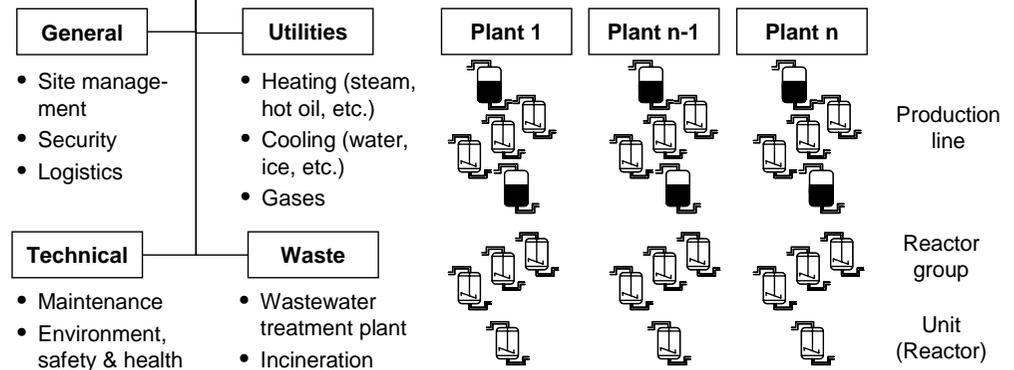
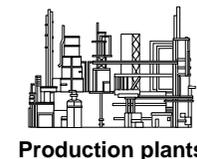
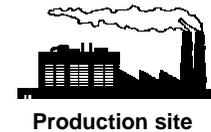
-
- **Produktionsnetzwerke in der Spezialchemie**
 - MILP-Modelle zur strategischen Netzwerkoptimierung
 - Literaturüberblick
 - Praxisanforderungen
 - Wahl der Zielfunktion
 - Modellierung branchenspezifischer Anforderungen
 - Modellüberblick
 - Produktionskapazität
 - Produktverlagerung
 - Produkt-Standort-Allokation und Single Sourcing
 - Zölle und Zollerstattungen
 - Datenanforderungen, Systemintegration und numerische Performance
-

Chemische Industrie und Spezialchemie

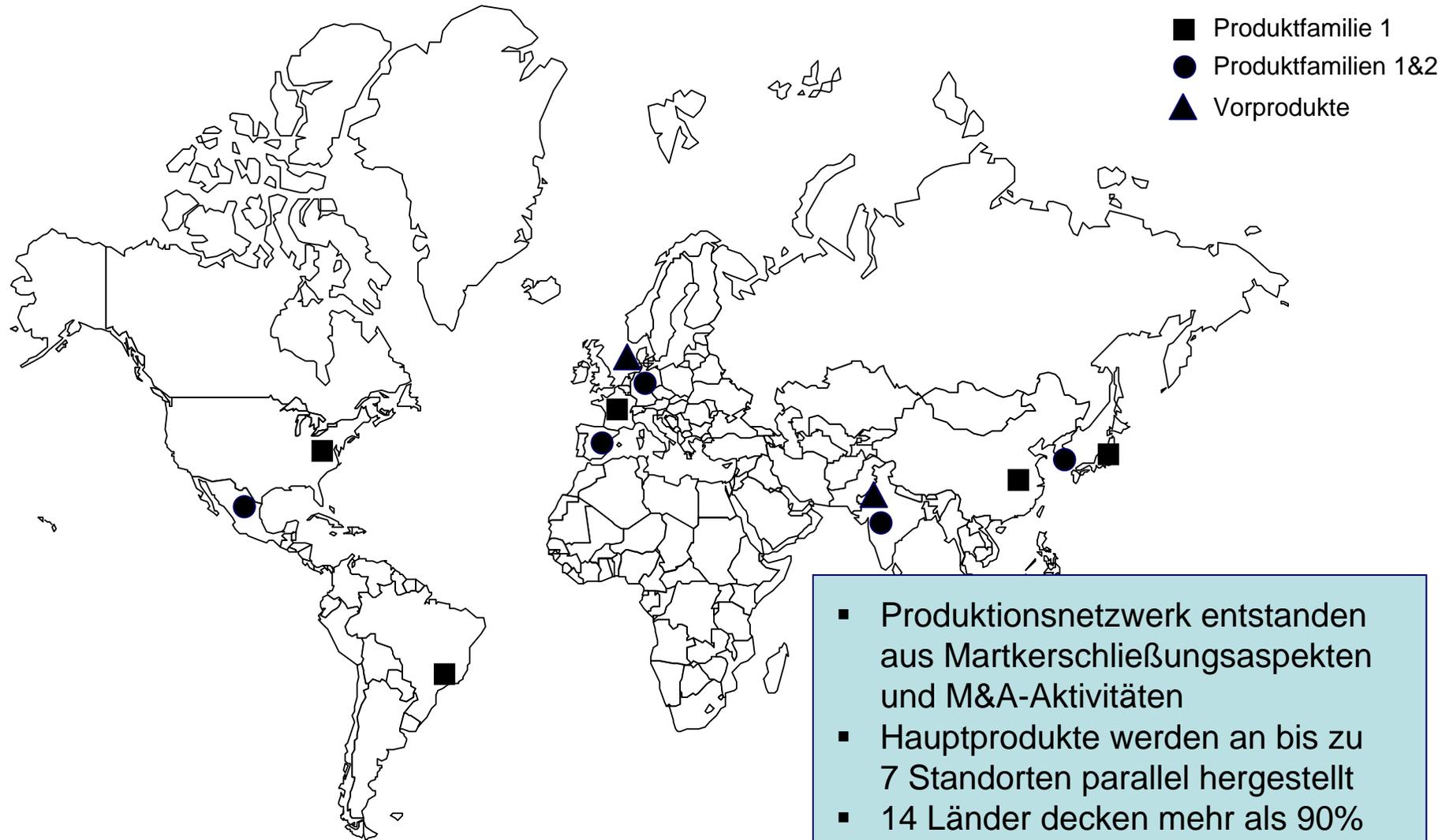
Segmentierung der chemischen Industrie nach Kline (1976)



- Produktportfolio besteht typischerweise aus Vielzahl heterogener Produkte
- Standorte bestehen i.d.R. aus mehreren Betrieben unterschiedlicher Wertschöpfungsketten
- Geringe/keine Materialflüsse zwischen Betrieben eines Standortes
- Konvergierende Materialflüsse



Struktur eines typischen Produktionsnetzwerks



- Produktionsnetzwerk entstanden aus Markterschließungsaspekten und M&A-Aktivitäten
- Hauptprodukte werden an bis zu 7 Standorten parallel hergestellt
- 14 Länder decken mehr als 90% des gesamten Absatzes ab

-
- Produktionsnetzwerke in der Spezialchemie
 - **MILP-Modelle zur strategischen Netzwerkoptimierung**
 - **Literaturüberblick**
 - Praxisanforderungen
 - Wahl der Zielfunktion
 - Modellierung branchenspezifischer Anforderungen
 - Modellüberblick
 - Produktionskapazität
 - Produktverlagerung
 - Produkt-Standort-Allokation und Single Sourcing
 - Zölle und Zollerstattungen
 - Datenanforderungen, Systemintegration und numerische Performance
-

Veröffentlichungen

Nicht optimal
lösbare Modelle
mit BWL-
Hintergrund

Lösbare OR-
Modelle mit ein-
geschränkter
Praxistauglichkeit

Modelle mit
Fokus auf Praxis-
anwendung

Aktuelle
Publikationen

- **Kendrick (1967)**: Programming Investments in the Process Industries
- **Manne (1967)**: Investments for Capacity Expansion: Size, Location and Time-Phasing
- **Pomper (1976)**: International investment planning: an integrated approach

- **Geoffrion and Graves (1974)**: Multicommodity distribution system design by benders decomposition
- ...

- **Arntzen et al. (1995)**: Global Supply Chain Management at Digital Equipment Corporation
- **Martel et al. (2005)**: International Factors in the Design of Multinational Supply Chains: The Case of Canadian Pulp and Paper Companies
- **Nickel et al. (2005)**: Strategische Supply-Chain Entscheidungen in der Stahlindustrie - Eine Fallstudie
- **Charkravarty (2005)**: Global plant capacity and product allocation with pricing decisions
- **Melo et al. (2005)**: Dynamic multi-commodity capacitated facility location: a mathematical modeling framework for strategic supply chain planning
- ...

-
- Produktionsnetzwerke in der Spezialchemie
 - MILP-Modelle zur strategischen Netzwerkoptimierung
 - Literaturüberblick
 - **Praxisanforderungen**
 - Wahl der Zielfunktion
 - Modellierung branchenspezifischer Anforderungen
 - Modellüberblick
 - Produktionskapazität
 - Produktverlagerung
 - Produkt-Standort-Allokation und Single Sourcing
 - Zölle und Zollerstattungen
 - Datenanforderungen, Systemintegration und numerische Performance
-

Anforderungen für den Einsatz in der Spezialchemie

| | | |
|-------------------------------|-------------------------|---------------------------|
| Zielfunktion | Kostenminimierung | Gewinnmaximierung |
| Planungshorizont | Statisch | Dynamisch |
| Produkte | Ein Produkt | Mehrere Produkte |
| Unsicherheit | Deterministisch | Stochastisch |
| Geografische Abdeckung | National | International |
| Funktionale Abdeckung | Produktion | Mehrere Funktionsbereiche |
| Supply-Chain - Stufen | Eine Stufe (Fertigung) | Mehrere Stufen |
| Kapazitätsbeschränkung | Nein | Ja |
| Kapazitätsveränderung | Nein | Ja |
| Budgetbeschränkungen | Nein | Ja |
| Lagerbestände | Nein | Ja |
| Lösungsverfahren | Heuristik / Algorithmus | Kommerzieller Solver |

-
- Produktionsnetzwerke in der Spezialchemie
 - MILP-Modelle zur strategischen Netzwerkoptimierung
 - Literaturüberblick
 - Praxisanforderungen
 - **Wahl der Zielfunktion**
 - Modellierung branchenspezifischer Anforderungen
 - Modellüberblick
 - Produktionskapazität
 - Produktverlagerung
 - Produkt-Standort-Allokation und Single Sourcing
 - Zölle und Zollerstattungen
 - Datenanforderungen, Systemintegration und numerische Performance
-

Wahl der Zielfunktion: NPV und Horizonteffekte

- Dynamische Modelle, die über Investitionszeitpunkte entscheiden, erfordern eine NPV-basierte Zielfunktion
- Ein begrenzter Planungshorizont führt zu Verzerrungen bei der Bewertung von Investitionen am Ende des Planungshorizonts

Ansätze aus der Literatur

Vermeidung durch zusätzliche Annahmen

- Kostenminimierung bei wachsender Nachfrage (Fleischmann et al. 2005)
- Beschränkung von Investitionsentscheidungen auf die erste Planungsperiode (Kouvelis and Rosenblatt 2001)
- Kostenminimierung und Annahme eines kostenfreien Kapazitätsabbaus (Antunes and Peeters 2001)
- NPV-Maximierung unter der Bedingung der Nachfragebefriedigung und Ausschluß von Kapazitätsreduktionen (Canel and Khumawala 1997)

Ignorieren

- Maximierung des NPV, ohne daß gesamte Nachfrage befriedigt werden muß (Papageorgiou et al. 2001)
- NPV-maximierende langfristige Kapazitätsplanung für einen einzelnen Standort (Sahinidis et al. 1989)

Explizites Einbeziehen von Endwerten

- Abschätzung des Endwertes durch Vergleich der Cash Flows in der letzten Periode mit der „Do-Nothing“ – Option für jede Konfigurationsalternative (Pomper 1976)
- Einbeziehung von Endwertfunktionen in die Kapazitätserrichtungskostenfunktion (Fong and Srinivasan 1981)

Optionen zur Behandlung des Horizonteffekts

 Präferierte Option

Option

Pro

Kontra

- | Option | Pro | Kontra |
|---|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> ▪ Unzureichende Bewertung von Investitionen am Ende des Planungshorizonts akzeptieren ▪ Generelle Annahme für Endwerte einbeziehen | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Im Rahmen einer rollierenden Planung werden Investitionsentscheidungen für späte Perioden erst getroffen, wenn mehr Daten verfügbar sind ▪ Annäherung an die buchhalterische Logik | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Wenn Nachfrageerfüllung verlangt wird, liefert der Ansatz u.U. wertvernichtende Investitionsvorschläge ▪ Cash flows in den ersten Jahren ggf. geringer als Abschreibungen ▪ Keine Bewertung von Restrukturierungsmaßnahmen |
| <ul style="list-style-type: none"> ▪ Unterteilung in zwei Zeithorizonte: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Investitionsphase ▪ Fortschreibung statischer Zustand | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Explizite Vorhersagen ohnehin nur für begrenzten Zeitraum möglich ▪ Keine Abschätzung zusätzlicher Parameter erforderlich | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Wahl der Horizonte kann Ergebnis der Optimierungsrechnung beeinflussen |

-
- Produktionsnetzwerke in der Spezialchemie
 - MILP-Modelle zur strategischen Netzwerkoptimierung
 - Literaturüberblick
 - Praxisanforderungen
 - Wahl der Zielfunktion
 - **Modellierung branchenspezifischer Anforderungen**
 - **Modellüberblick**
 - Produktionskapazität
 - Produktverlagerung
 - Produkt-Standort-Allokation und Single Sourcing
 - Zölle und Zollerstattungen
 - Datenanforderungen, Systemintegration und numerische Performance
-

$$\max \sum_{t \in T} \left[\sum_{c \in C} \begin{bmatrix} netrev_{ct} \\ - imptariff_{ct} \\ - distrcost_{ct} \end{bmatrix} * exrate_{w^c t} \right. \\
 \left. - \sum_{s \in S} \begin{bmatrix} cvar_{st} \\ + shipcost_{st} \\ + cfix_{st} \\ + ttariff_{st} \\ + invest_{st} \\ + scupcosts_{st} \\ + closurecost_{st} \\ + sevpay_{st} \end{bmatrix} * exrate_{w^s t} \right] * PVF_t \\
 - inventc_t$$

-
- Produktionsnetzwerke in der Spezialchemie
 - MILP-Modelle zur strategischen Netzwerkoptimierung
 - Literaturüberblick
 - Praxisanforderungen
 - Wahl der Zielfunktion
 - Modellierung branchenspezifischer Anforderungen
 - Modellüberblick
 - **Produktionskapazität**
 - Produktverlagerung
 - Produkt-Standort-Allokation und Single Sourcing
 - Zölle und Zollerstattungen
 - Datenanforderungen, Systemintegration und numerische Performance
-

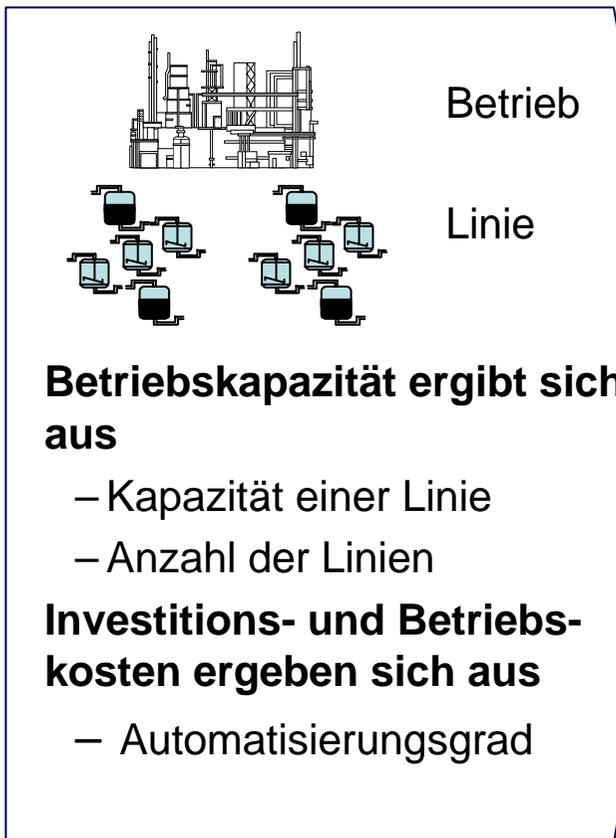
Ansätze zur Kapazitätsmodellierung

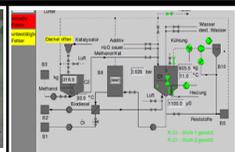
| | Beschreibung | Beispiele |
|--|--|---|
| Kontinuierlich ohne Skaleneffekte | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Kapazität modelliert als kontinuierliche Variable mit linearen Errichtungskosten | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Bhutta et al. 2003 ▪ Melo et al. 2005 ▪ Nickel et al. 2005 (Stahlindustrie) |
| Kontinuierlich mit Skaleneffekten | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Kapazität modelliert als kontinuierliche Variable mit monoton ansteigenden, konkaven Errichtungskosten | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Dasci and Verter 2001 |
| Diskrete Kapazität | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Auswahl aus einem Set vorgegebener Betriebstypen | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Haug 1985 ▪ Mazzola and Neebe 1999 ▪ Sankaran and Raghavan 1997 |
| Modulare Kapazität | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Auswahl aus einem Set vorgegebener Betriebstypen ▪ Parallele Installation mehrerer Module mit <ul style="list-style-type: none"> ▪ nur einer Modulgröße ▪ mehreren Modulgrößen | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Antunes and Peeters 2001 (Schulen) ▪ Shulman 1991 ▪ Syam 2000 |

Modularer Ansatz mit nur einer Größe je Betrieb ist am besten für technische Kapazität von Spezialchemiebetrieben geeignet

Modellierung eines Spezialchemiebetriebs

300,000 € Investitionskosten
 2,000t Kapazität (für Referenzprodukt)
 35 FTE* Anzahl Mitarbeiter



| | | Automatisierungsgrad | | |
|-----------|--------|---|--|--|
| | |  |  |  |
| | | gering | mittel | hoch |
| Kapazität | klein |  300.000 € 2000t 35 FTE* |  380.000 € 2000t 25 FTE* | |
| | mittel |  400.000 € 3000t 45 FTE* |  500.000 € 3000t 35 FTE* |  600.000 € 3000t 20 FTE* |
| | groß | |  700.000 € 5000t 40 FTE* |  800.000 € 5000t 20 FTE* |

* Full time equivalents (Anzahl Mitarbeiter erforderlich für 24 h / 7 Tage - Betrieb)

-
- Produktionsnetzwerke in der Spezialchemie
 - MILP-Modelle zur strategischen Netzwerkoptimierung
 - Literaturüberblick
 - Praxisanforderungen
 - Wahl der Zielfunktion
 - Modellierung branchenspezifischer Anforderungen
 - Modellüberblick
 - Produktionskapazität
 - **Produktverlagerung**
 - Produkt-Standort-Allokation und Single Sourcing
 - Zölle und Zollerstattungen
 - Datenanforderungen, Systemintegration und numerische Performance
-

- Problem**
- In Spezialchemienetzwerken ist theoretisch eine Vielzahl von Betrieben in der Lage, ein Produkt herzustellen
 - Die Verlagerung/Neueinführung eines Produktes in einem Betrieb erfordert einen erheblichen Aufwand für Rezeptanpassung, Produktionsversuche, Ausbildung des Betriebspersonals, etc.
- Vorgehen**
- Modell muß die mit der Verlagerung/Neueinführung verbundenen Kosten und Produktionsversuche explizit berücksichtigen
 - Wurde ein Produkt einmal an einem Standort hergestellt, so kann es auch künftig an diesem Standort produziert werden

$$prvol_{pfst} \leq u_{pfst} * BigM$$

$$u_{pfst} \geq u_{pfst-1}$$

$$scupdem_{pfst} \geq \sum_{p \in P} \sum_{f \in F} (u_{pfst} - u_{pfst-1}) * scupvol_p$$

$$scupcosts_{st} \geq \sum_{p \in P} \sum_{f \in F} (u_{pfst} - u_{pfst-1}) * \frac{scupcost_p}{exrate_{c^s t}}$$

-
- Produktionsnetzwerke in der Spezialchemie
 - MILP-Modelle zur strategischen Netzwerkoptimierung
 - Literaturüberblick
 - Praxisanforderungen
 - Wahl der Zielfunktion
 - Modellierung branchenspezifischer Anforderungen
 - Modellüberblick
 - Produktionskapazität
 - Produktverlagerung
 - **Produkt-Standort-Allokation und Single Sourcing**
 - Zölle und Zollerstattungen
 - Datenanforderungen, Systemintegration und numerische Performance
-

Produkt-Standort - Allokation

- Problem**
- Konsequenzen aus der Verteilung der Produkte auf Produktionsstandorte lassen sich schlecht direkt in Optimierungsmodell integrieren
 - Parameter zur Abschätzung von Scale- und Scope – Effekten kaum zu ermitteln
 - Zusätzliche Aspekte wie Risikostruktur nicht quantifizierbar
- Vorgehen**
- Externe Festlegung einer minimalen und maximalen Anzahl von Betrieben, die ein Produkt parallel fertigen müssen/dürfen
 - Alternative: Explizite Modellierung von „großen“ Rüstvorgängen

$$\sum_{f \in F_p} x_{pfst} / \text{BigM} \leq v_{pst} \leq \sum_{f \in F_p} x_{pfst}$$

$$\underline{\text{numbersites}}_p \leq \sum_{s \in S} v_{pst} \leq \overline{\text{numbersites}}_p$$

**Führt zu erheblicher Verlängerung der Rechenzeit, da nicht wirksam in Zielfunktion
=> Nachträglicher Einsatz wenn Restriktionen verletzt wurden unter Fixierung
Netzwerkstruktur**

Single Sourcing

- Problem**
- Volumenprodukte werden i.d.R. an mehreren Standorten parallel gefertigt
 - Produktcharakteristika sind nicht notwendigerweise identisch (innerhalb der Spezifikationen)
 - Bei Kunden können Qualitätsprobleme auftreten, wenn die Lieferung von mehreren Standorten aus erfolgt
 - Manche Zuordnungen von Produktions- und Absatzländern können aus politischen oder handelsrechtlichen Gründen ungünstig sein
- Vorgehen**
- Ausschluß bestimmter Standort-Markt – Zuordnungen
 - Festlegung von Mindestmengen für Single Sourcing - Konstellationen



$$dext_{psct} = 0$$

$$\forall \langle p, s, c \rangle \in PSC^-, t \in T$$

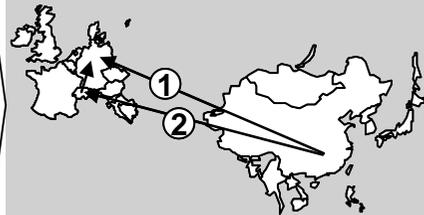
$$dext_{psct} \geq demand_{pct} * minquantity_{psc}$$

$$\forall \langle p, s, c \rangle \in PSC^+, t \in T$$

-
- Produktionsnetzwerke in der Spezialchemie
 - MILP-Modelle zur strategischen Netzwerkoptimierung
 - Literaturüberblick
 - Praxisanforderungen
 - Wahl der Zielfunktion
 - Modellierung branchenspezifischer Anforderungen
 - Modellüberblick
 - Produktionskapazität
 - Produktverlagerung
 - Produkt-Standort-Allokation und Single Sourcing
 - **Zölle und Zollerstattungen**
 - Datenanforderungen, Systemintegration und numerische Performance
-

Prinzip der Zollabwicklung

Vermeidung durch Netzwerkdesign



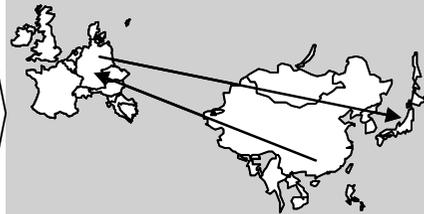
① Direkte Netzwerkzuordnung

- Einfuhr von Rohstoff aus China nach Deutschland (Zoll 4.5%)
- Produktion und Verkauf des Endprodukts innerhalb der EU

② Indirekte Netzwerkzuordnung

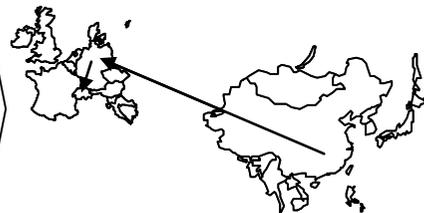
- Einfuhr des Rohstoffs aus China in die Schweiz (kein Einfuhrzoll)
- Herstellung des Endproduktes in der Schweiz und Export in die EU (keine Zollpflicht, da Schweiz Ursprungsland)

Re-export in verändertem Zustand



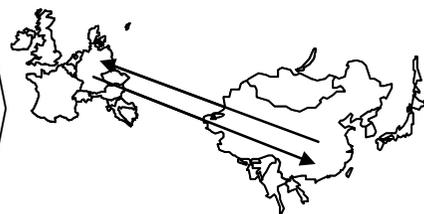
- Einfuhr eines Zwischenprodukts aus China nach Deutschland (Zoll 3%)
- Verkauf des Endprodukts aus Deutschland nach Japan
- Rückerstattung des Einfuhrzolls in Deutschland aufgrund von Re-export in verändertem Zustand

Re-export in gleichem Zustand



- Einfuhr eines Endproduktes aus China nach Deutschland (Zoll 6%)
- Re-export des Endproduktes aus Deutschland in die Schweiz (Zollsatz 3% für chinesischen Ursprung)
- Zollrückerstattung in Deutschland aufgrund von Re-export in gleichem Zustand

Re-import in verändertem Zustand



- Einfuhr eines Zwischenprodukts nach China (Zoll 0%)
- Export des Endprodukts von China nach Deutschland (Zoll 4%)
- Rückerstattung von 4% Zoll auf den Wertanteil des Zwischenprodukts am Endprodukt aufgrund von Re-import in anderem Zustand

Beispiel: Zölle für Rohmaterial

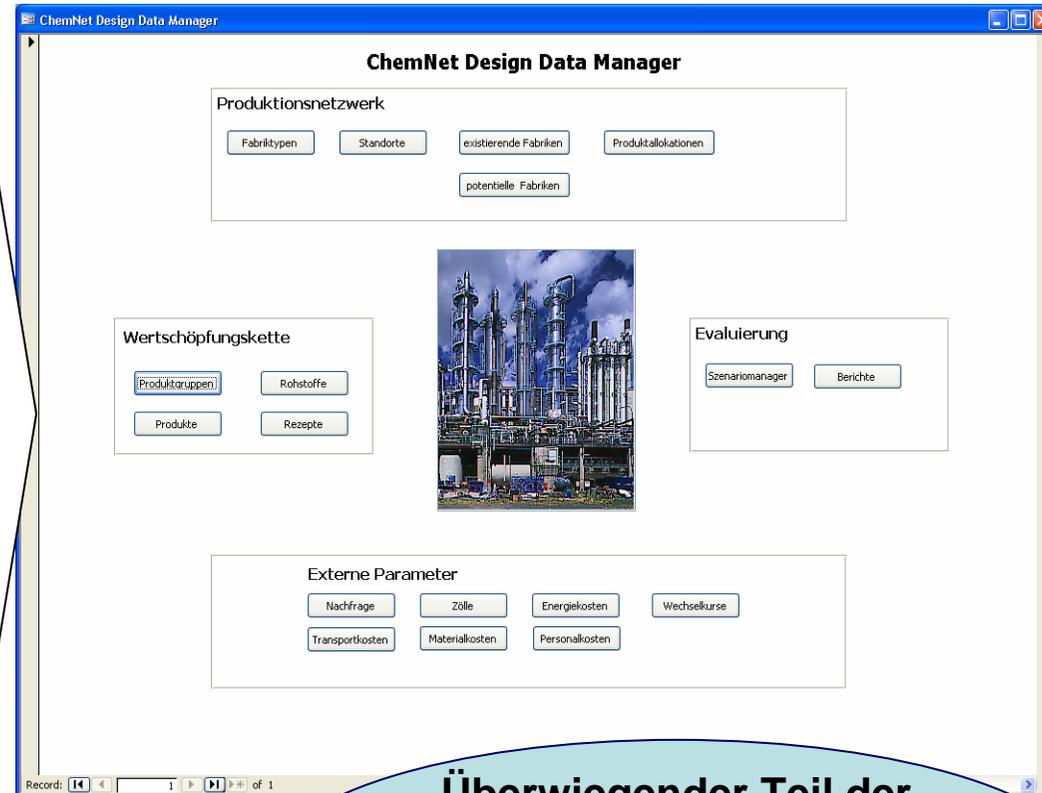
$$\text{tariff}_{st} \geq \left[\begin{array}{l} \textcircled{1} \sum_{p \in P} \left[\sum_{c \in CNE_s} \sum_{r \in R_p} \frac{dext_{psct} * rawreq_{pr} * rawprice_{rst}}{exrate_{q^{st}}} * tariff_{rc^{rs}c^s} \right] \\ \textcircled{2} + \sum_{i \in I} \left[\sum_{r \in R_I} \left[\sum_{s' \in SNE_s} dint_{iss't} - \sum_{p \in P} \sum_{c \in CE_s} dext_{psct} * intreq_{pi} \right] * rawreq_{ir} * rawprice_{rst} * \frac{exrate_{q^{st}}}{exrate_{q^{st}}} * tariff_{rc^{rs}c^s} \right] \end{array} \right]$$

- ① Einsatz von Rohmaterialien für Endprodukte, die nicht exportiert werden
- ② Rohmaterialien, die für die Herstellung eines Zwischenprodukts, das nicht exportiert wird, verwendet werden abzüglich
 - Mengen dieses Zwischenprodukts, die in ein am gleichen Standort hergestelltes Endprodukt, das später exportiert wird, eingehen

-
- Produktionsnetzwerke in der Spezialchemie
 - MILP-Modelle zur strategischen Netzwerkoptimierung
 - Literaturüberblick
 - Praxisanforderungen
 - Wahl der Zielfunktion
 - Modellierung branchenspezifischer Anforderungen
 - Modellüberblick
 - Produktionskapazität
 - Produktverlagerung
 - Produkt-Standort-Allokation und Single Sourcing
 - Zölle und Zollerstattungen
 - **Datenanforderungen, Systemintegration und numerische Performance**
-

Ein funktionsübergreifender Ansatz ist erforderlich, um die Datenbasis zu schaffen

- Hauptprodukte mit Einsatzfaktoren
- Standortspezifische Faktorkosten, Transportkosten, Zölle und Wechselkurse
- Abbildung des existierenden Produktionsnetzwerkes
- Entwicklung alternativer Konfigurationsoptionen (potentielle Standorte, Produktallokation, etc.)



Überwiegender Teil der erforderlichen Daten ist nicht direkt aus ERP-System abrufbar

Numerische Performance

EXEMPLARISCH

| | Produkte | Märkte | Betriebe | | MIP-GAP | CPU |
|-------------------------------------|----------|--------|----------|------|---------|----------|
| | | | Ist | Pot. | | |
| Einfluß Netzwerk- komplexität | 8 | 9 | 9 | 5 | 0 | 00:02:52 |
| | 16 | 14 | 9 | 5 | 0 | 00:06:18 |
| | 16 | 14 | 9 | 16 | 0 | 18:29:16 |
| Einfluß MIP-GAP | 16 | 14 | 9 | 16 | 5% | 00:02:54 |
| | | | | | 1% | 00:02:54 |
| | | | | | 0,1% | 02:57:21 |
| | | | | | 0,01% | 09:58:57 |

**Basierend auf CPLEX 10
und Rechner mit Athlon 2600
und 1 GB RAM**