

---

72. Wissenschaftliche Jahrestagung des Verbandes  
der Hochschullehrer für Betriebswirtschaft e.V.

**Bremen, 29. Mai 2010**

---

# **Modellierung großer logistischer Netze**

---

**Prof. Dr.-Ing. Uwe Clausen**

TU Dortmund & Fraunhofer IML

In der EU27 werden jährlich fast **4.000.000.000.000 tkm** an Güterverkehrsleistung erbracht.

Die Deutsche Post DHL stellt allein in Deutschland werktäglich rund **72.000.000 Brief- und 2.500.000 Paketsendungen** zu.

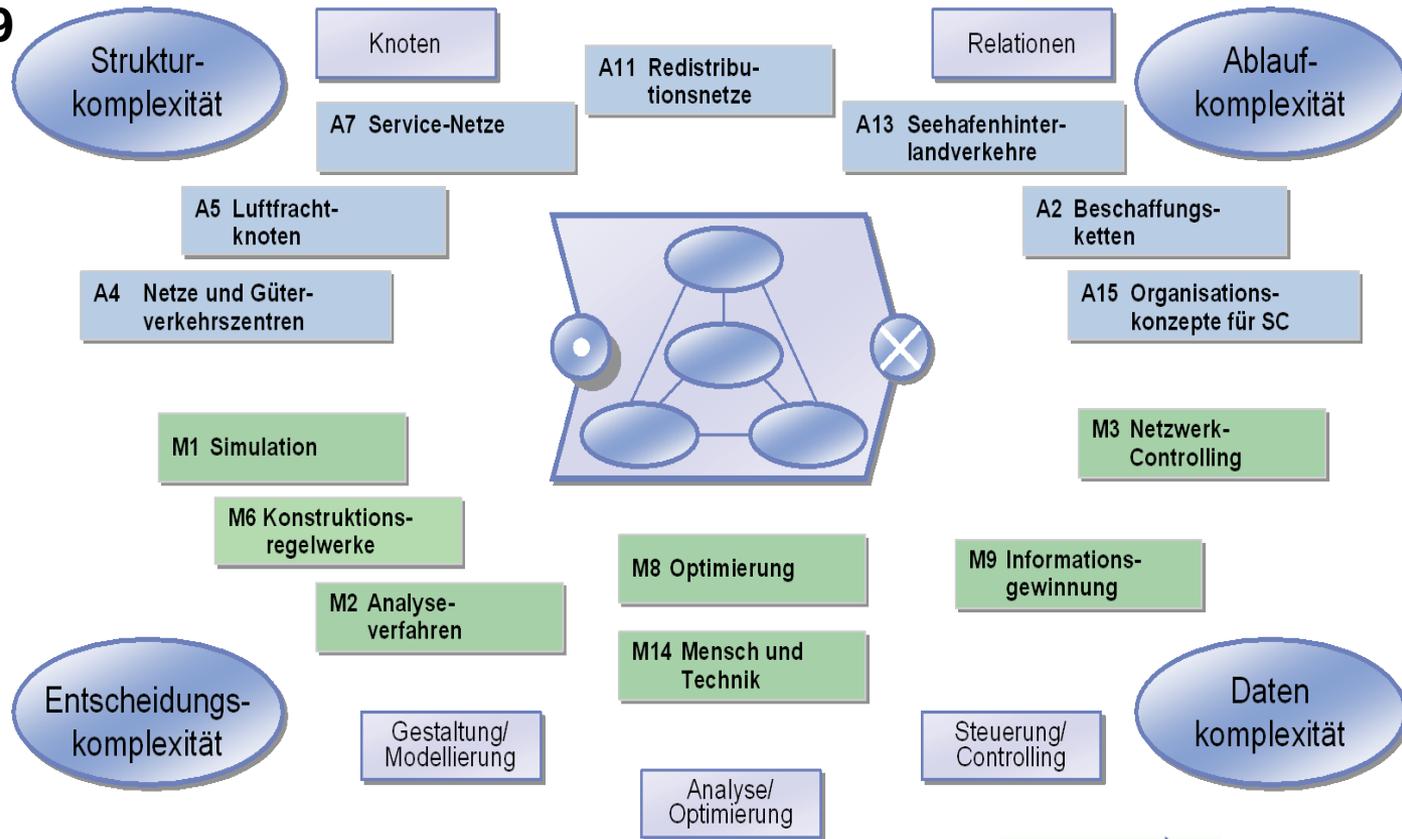
Allein bei Amazon.de wurden am 14.12.2009 **1.700.000 Artikel** bestellt – 20 Stück pro Sekunde.

Der Logistikmarkt in Deutschland wird auf ca. **200.000.000.000 €** p.a. geschätzt – jeden Tag **550.000.000 €**

Wie man Transport- und Logistiknetzwerke optimiert ... ist schon wichtig.

In logistischen Netzen muss Komplexität verschiedener Art abgebildet und beherrscht werden.

**Struktur des SFB 559**  
TU Dortmund 1998 – 2008

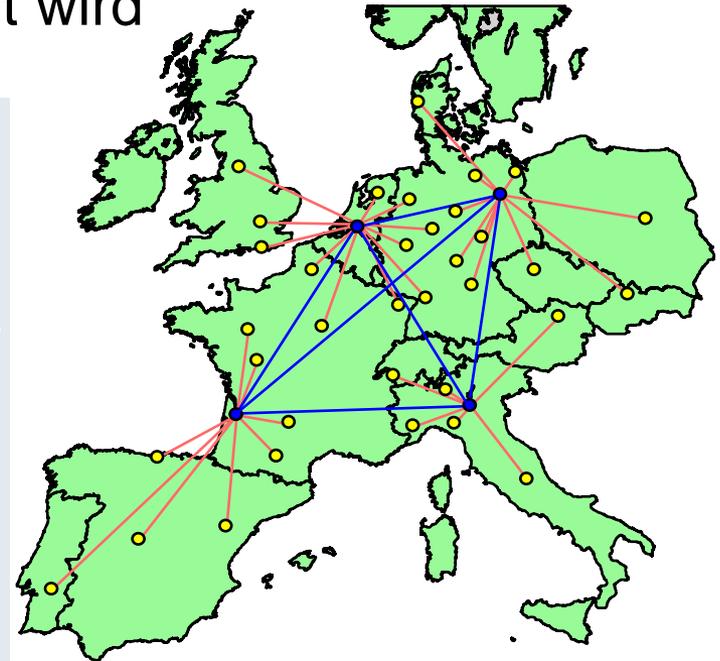


Transport(Service)netze - Strukturen der Verkehrslogistik, mit deren Hilfe für eine Vielzahl von Versendern und Empfängern regelmäßig eine definierte Transportleistung erbracht wird

Eine typische Ausprägung „Hub-and-spoke“

Aufgabe: Optimierung von Depot- und Hubstandorten und des verknüpfenden Netzes

- Verbesserung des Servicegrades bzw. Erreichen eines vorgegebenen Servicegrades
- Untersuchung der Einsparpotenziale bei den Netzkosten
- Berechnung von Hauptlauf-Fahrplänen



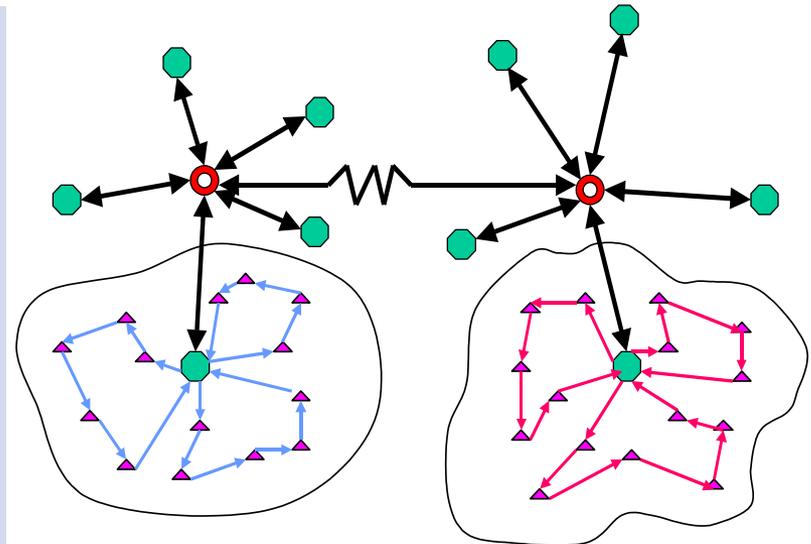
## Aufbau eines Transportnetzes

Elemente von Transportnetzen sind Kunden (Versand und Empfang), Depot- (Sammel- und Verteilfunktion in der Fläche) und Hub-Standorte (Konsolidierung: gute Auslastung der Transportkapazität).

Typische Transportkette für jede Sendung

Kunde => Depot [ => Hub  
(=> Hub) => Depot] => Kunde

Im Hauptlauf (Netzstruktur) muss jedes Depot mit jedem anderen Depot verbunden sein.

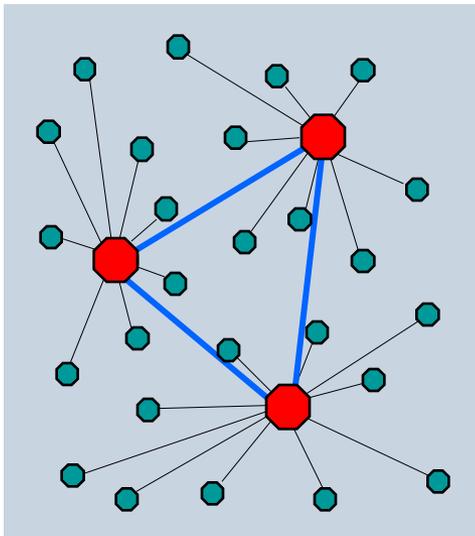


- ▲ Kunde
- Depot
- Hub
- Vorlauf
- Hauptlauf
- Nachlauf

Die Planung von Transportnetzen erfolgt bei gleichzeitiger Verfolgung der konkurrierenden Ziele **Kostenminimierung** und **Service maximierung**

## Eine wesentliche Teilaufgabe im Rahmen der Planung ist die Optimierung von Anzahl und Lage der Hub-Standorte

Für eine gegebene Anzahl und Lage von Depotstandorten und eine gegebene Transportmenge zwischen je zwei Depots soll die optimale **Anzahl und Lage von Hubstandorten** ermittelt werden, wobei als Hubstandorte nur Depots in Frage kommen und jedes Depot dem nächstgelegenen Hub zugeordnet wird.



Vollständige Enumeration aller möglichen Hub-Auswahlen:

Bei  $n$  Depots und  $p$  Hubs:  $\binom{n}{p}$  mögliche Lösungen.

Praktikabel nur für kleine  $n$  und  $p$ .

Für große  $n$  und  $p$  geeignete Algorithmen erforderlich.

# Netzoptimierungsrechnungen mit Leistungsbewertung zur Ermittlung der effizientesten Verfahren und Parameterkombinationen

4 Klassen von Optimierverfahren sind verwendet worden:

Vollständige Enumeration

Neighborhood Search Heuristik (nach John G. Klincewicz)

(1+1)-Evolutionstrategie (ES)

Evolutionäre Algorithmen mit Rekombination (EA)

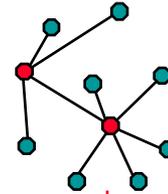
## Neighborhood Search Heuristik (nach John G. Klincewicz)

- (a) **initialisiere** alle  $p$  Hubs mit einem Depot per Zufall;  
**berechne die Netzqualität;**
  
- (b) **für jedes  $p$** 
  - setze **jedes Depot** einmal als Hub  $p$ ;
  - berechne die Netzqualität**  
(gewichteter Faktor aus Kosten und Servicezielerreichung);
  - wähle das Depot mit der besten Netzqualität als Hub  $p$ ;**
  
- (c) **wiederhole** Schritt (b) **bis** keine Verbesserung gefunden wird.

**Nachteil:** Es kann immer nur ein einziger Hub ausgetauscht werden.

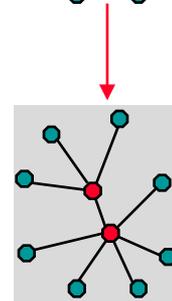
## (1+1)-Evolutionstrategie (ES)

Elter-Netz in Generation t



Netzqualität  
8,5314

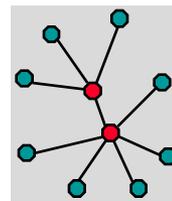
Erzeugung des Kind-Netzes durch **Mutation**



Netzqualität  
9,8832

Kind-Netz in Generation t

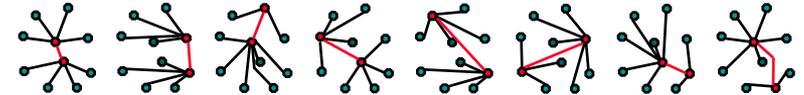
**Selektion** des besten Netzes als Elter-Netz in Generation t+1



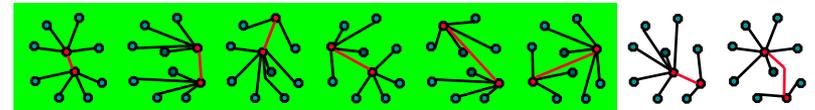
Netzqualität  
9,8832

## Evolutionäre Algorithmen mit Rekombination (EA)

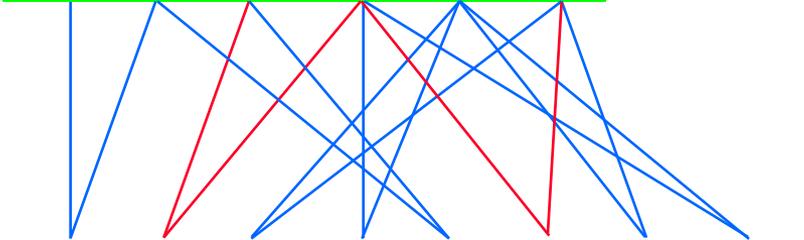
Eltern-Population in Generation t



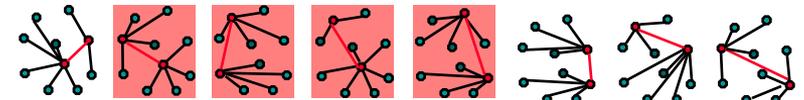
Durchführung der **Mating Selection**



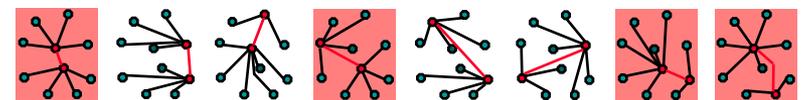
Durchführung der **Rekombination** und ggf. danach der **Mutation**



Kinder-Population in Generation t

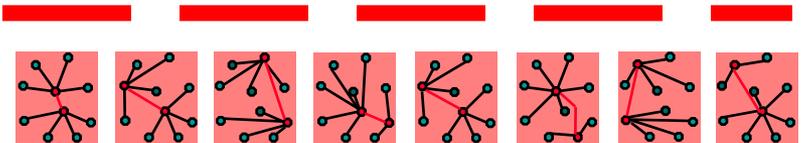


Eltern-Population in Generation t



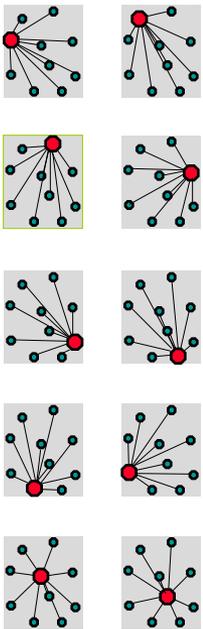
Durchführung der **Acceptance Selection**

Eltern-Population in Generation t+1



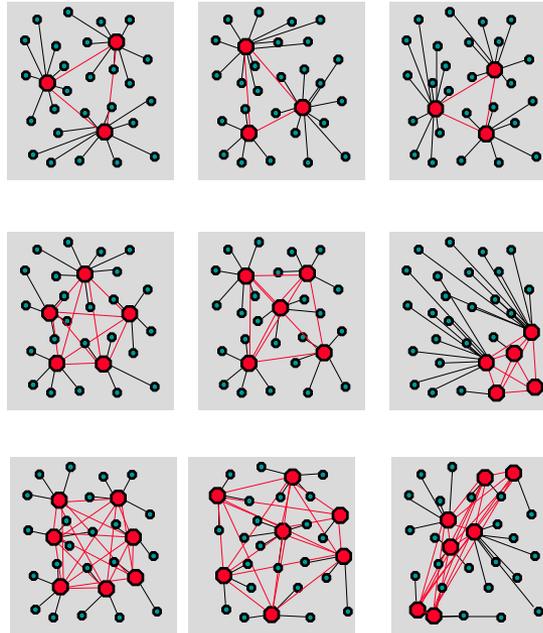
Untersuchungsumfang: 30 Probleminstanzen =  
3 Transportnetze mit jeweils 10 Hub-Anzahlen (1 bis 10)

**10 Depots**



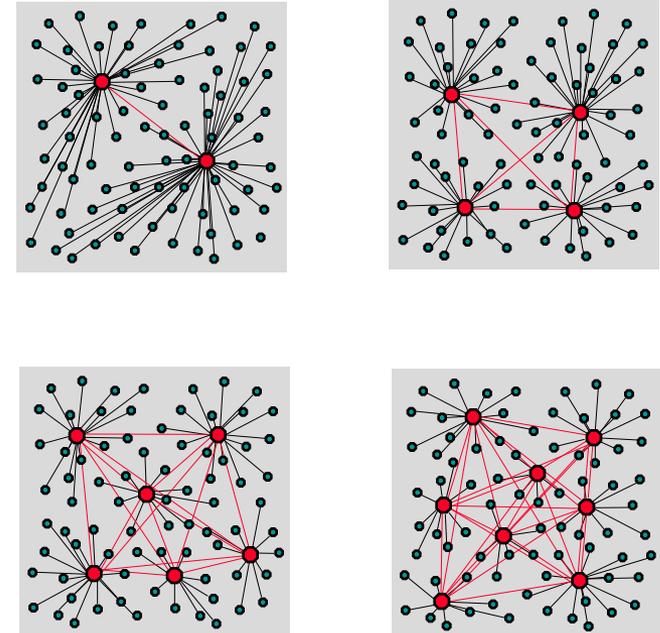
**1 Hub**

**29 Depots**



**3 / 5 / 7 Hubs**

**84 Depots**



**2 / 4 / 6 / 8 Hubs**

## Untersuchungsumfang: Methoden und Parameter

- Vollständige Enumeration: keine Parameter 1 Lauf
- Neighborhood Search Heuristik (Klincewicz); keine Parameter; 100 Läufe
- (1+1)-ES: 6 Mutationsraten mit 16.384 Generationen; jeweils 100 Läufe
- EA mit 8 Populationsgrößen (zwischen 2 und 256 Individuen)
  - mit bis zu 512 Generationen
  - mit 6 Mutationsraten ( $1/10n$ ,  $1/3n$ ,  $1/2n$ ,  $1/n$ ,  $2/n$ ,  $3/n$ )
  - mit 4 Selektionsdrücken (2, 4, 8, 16) jeweils 100 Läufe

# Die effizientesten Verfahren: abhängig von der Komplexität

Hubs	Optimierverfahren für Hub-Auswahl	10 Depots					29 Depots					84 Depots				
		beste erreichte Netzqualität (NQ) aus 100 Läufen	Anz. Netzbe-rechnungen pro Lauf	Anzahl Läufe mit bester be-kann-ter NQ	Multi-start-faktor für 90% WSLK	Anz. Netzbe-rechnungen pro 90% WSLK	beste erreichte Netzqualität (NQ) aus 100 Läufen	Anz. Netzbe-rechnungen pro Lauf	Anzahl Läufe mit bester be-kann-ter NQ	Multi-start-faktor für 90% WSLK	Anz. Netzbe-rechnungen pro 90% WSLK	beste erreichte Netzqualität (NQ) aus 100 Läufen	Anz. Netzbe-rechnungen pro Lauf	Anzahl Läufe mit bester be-kann-ter NQ	Multi-start-faktor für 90% WSLK	Anz. Netzbe-rechnungen pro 90% WSLK
1	vollständige Enumeration	29,291154	10	1	1	10	26,458526	29	1	1	29	7,456899	84	1	1	84
	Heuristik nach Klincewicz I	29,291154	19	100	1	19	26,458526	59	100	1	59	7,456899	166	100	1	166
	(1+1)-Evolutionsstrategie	29,291154	9	61	3	27	26,458526	9	23	9	81	7,456899	9	14	16	144
	genetischer Algorithmus	29,291154	37	96	1	37	26,458526	9	40	5	45	7,456899	69	56	3	207
2	vollständige Enumeration	29,291154	45	1	1	45		406	1	1	406		3,486	1	1	3,486
	Heuristik nach Klincewicz I	29,291154	34	100	1	34	26,160205	119	100	1	119	8,037035	334	90	1	334
	(1+1)-Evolutionsstrategie	29,291154	17	54	3	52	26,160205	65	59	3	195	8,037035	9	2	114	1,026
	genetischer Algorithmus	29,291154	21	38	5	105	26,160205	321	92	1	321	8,037035	273	56	3	819
3	vollständige Enumeration	29,797378	120	1	1	120		3,654	1	1	3,654		95,284	1	1	95,284
	Heuristik nach Klincewicz I	29,797378	50	44	4	199	27,514101	195	79	2	390	8,999685	665	3	76	50,570
	(1+1)-Evolutionsstrategie	29,797378	9	11	20	182	27,514101	257	70	2	514	8,999685	513	20	11	5,643
	genetischer Algorithmus	29,797378	41	44	4	164	27,514101	13	4	57	741	8,999685	25	1	230	5,750
4	vollständige Enumeration	30,873726	210	1	1	210		23,751	1	1	23,751		1,929,501	1	1	1,929,501
	Heuristik nach Klincewicz I	30,873726	56	76	2	113	28,885038	311	57	3	932	8,908527	978	15	15	14,672
	(1+1)-Evolutionsstrategie	30,873726	33	42	5	167	28,885038	9	3	76	684	8,908527	65	1	230	14,950
	genetischer Algorithmus	30,873726	265	96	1	265	28,885038	2,081	96	1	2,081	8,908527	81	4	57	4,617
5	vollständige Enumeration	31,052043	252	1	1	252		118,755	1	1	118,755		30,872,016	1	1	30,872,016
	Heuristik nach Klincewicz I	31,052043	62	82	2	124	28,430090	377	11	20	7,535	8,883835	1,247	13	17	21,192
	(1+1)-Evolutionsstrategie	31,052043	17	19	11	189	28,430090	257	6	38	9,766	8,883835	2,049	5	45	92,205
	genetischer Algorithmus	31,052043	265	92	1	265	28,430090	4,129	96	1	4,129	8,883835	289	2	114	32,946
6	vollständige Enumeration	30,641010	210	1	1	210		475,020	1	1	475,020		406,481,544	1	1	406,481,544
	Heuristik nach Klincewicz I	30,641010	55	33	6	331	28,079634	442	24	9	3,981	8,780171	1,561	3	76	118,645
	(1+1)-Evolutionsstrategie	30,641010	5	5	45	227	28,079634	257	4	57	14,649	8,780171	513	1	230	117,990
	genetischer Algorithmus	30,641010	9	8	28	252	28,079634	273	8	28	7,644	8,780171	2,177	8	28	60,956
7	vollständige Enumeration	30,360992	120	1	1	120		1,560,780	1	1	1,560,780		4,529E+09	1	1	4,529E+09
	Heuristik nach Klincewicz I	30,360992	48	14	16	773	27,713882	578	45	4	2,314	8,561644	1,944	12	19	36,936
	(1+1)-Evolutionsstrategie	30,360992	9	11	20	182	27,713882	129	3	76	9,804	8,561644	1,025	2	114	116,850
	genetischer Algorithmus	30,360992	37	40	5	185	27,713882	81	4	57	4,617	8,561644	2,081	10	22	45,782
8	vollständige Enumeration	28,913433	45	1	1	45		4,292,145	1	1	4,292,145		4,360E+10	1	1	4,360E+10
	Heuristik nach Klincewicz I	28,913433	37	100	1	37	26,797438	561	23	9	5,052	8,431845	2,332	2	114	265,879
	(1+1)-Evolutionsstrategie	28,913433	17	49	4	69	26,797438	257	5	45	11,565	8,402302	16,385	0	0	0
	genetischer Algorithmus	28,913433	41	58	3	123	26,797438	265	8	28	7,420	8,431845	2,065	8	28	57,820
9	vollständige Enumeration	26,871607	10	1	1	10		10,015,005	1	1	10,015,005		3,681E+11	1	1	3,681E+11
	Heuristik nach Klincewicz I	26,871607	19	100	1	19	25,119948	586	20	11	6,443	8,249328	2,616	7	32	83,727
	(1+1)-Evolutionsstrategie	26,871607	9	59	3	27	25,119948	65	1	230	14,950	8,249328	16,385	2	114	1,867,890
	genetischer Algorithmus	26,871607	25	94	1	25	25,119948	261	8	28	7,308	8,249328	2,065	8	28	57,820
10	vollständige Enumeration	22,734506	1	1	1	1		20,030,010	1	1	20,030,010		2,761E+12	1	1	2,761E+12
	Heuristik nach Klincewicz I	22,734506	1	100	1	1	22,257339	708	9	25	17,708	8,064451	3,039	7	32	97,239
	(1+1)-Evolutionsstrategie	22,734506	5	100	1	5	22,257339	129	1	230	29,670	7,889484	16,385	0	0	0
	genetischer Algorithmus	22,734506	7	100	1	7	22,257339	2,113	24	9	19,017	8,064451	1,261	4	57	73,017

Vollständige Enumeration

Neighborhood Search

(1+1)-Evolutionsstrategie

Evolutionäre Algorithmen

## Realitätsnahes Beispielnetz: 3 Hubs bei 84 Depots

### Beste Netzqualität:

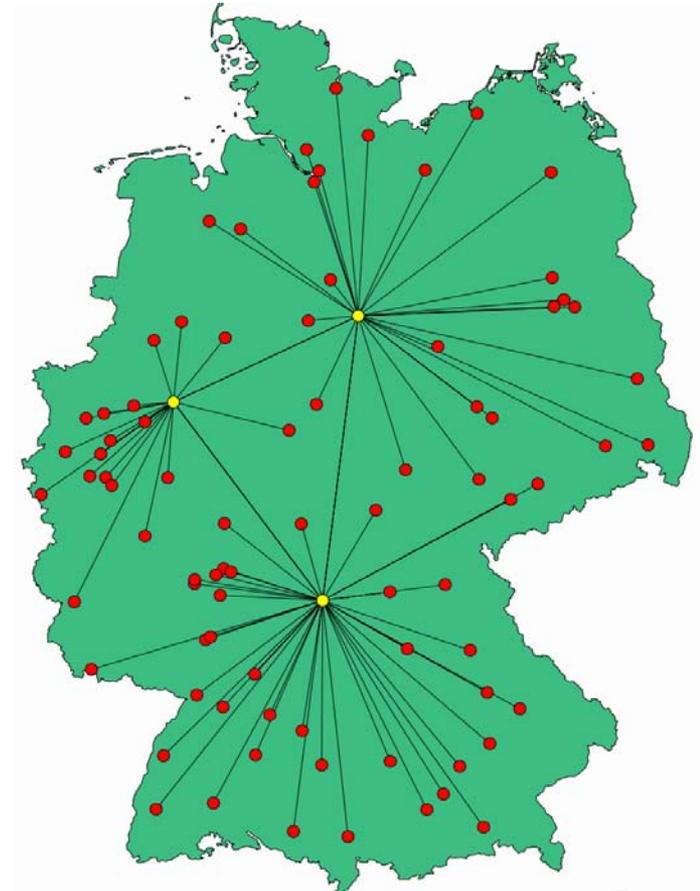
8,999685

### Effizientestes Verfahren:

(1+1)-Evolutionsstrategie  
mit 5.643 Netzberechnungen

### Parameterkombination:

Mutationsrate:  $1/10n$   
Generationsanzahl: 512  
Multistartfaktor: 11



## Generalisierung: Klassifizierung nach Suchraumgröße

1	$\binom{n}{p} < 10^2$
2	$\binom{n}{p} < 10^4$
3	$\binom{n}{p} < 10^6$
4	$\binom{n}{p} < 10^8$
5	$\binom{n}{p} < 10^{10}$
6	$\binom{n}{p} \geq 10^{10}$

$\begin{matrix} n \\ p \end{matrix}$	10	29	84
1	10	29	84
2	45	406	3.486
3	120	3.654	95.284
4	210	23.751	1.929.501
5	252	118.755	30.872.016
6	210	475.020	406.481.544
7	120	1.560.780	4.529.365.776
8	45	4.292.145	43.595.145.594
9	10	10.015.005	368.136.785.016
10	1	20.030.010	2.761.025.887.620

## Generalisierung: Die effizientesten Verfahren der Größenklassen und ihre Parameterkombinationen

Komplexitätsklasse	effizientestes Verfahren	Populationsgröße	Mutationsrate	Selektionsdruck	Generationen	Effizienzbewertung
1	Vollständige Enumeration	1	-	-	-	94,29
	Neighborhood Search	1	-	-	-	72,10
	(1+1)-Evolutionsstrategie	1	1/n	-	8	39,71
2	Neighborhood Search	1	-	-	-	75,07
	Vollständige Enumeration	1	-	-	-	56,97
	(1+1)-Evolutionsstrategie	1	1/10n	-	32	47,61
3	Neighborhood Search	1	-	-	-	66,82
	Evolutionärer Algorithmus	32	1/2n	16	64	58,82
	Evolutionärer Algorithmus	32	1/3n	16	64	54,77
4	Neighborhood Search	1	-	-	-	92,79
	Evolutionärer Algorithmus	32	1/10n	16	64	51,62
	Evolutionärer Algorithmus	32	1/3n	16	256	50,13
5	Neighborhood Search	1	-	-	-	74,84
	Evolutionärer Algorithmus	64	1/3n	16	64	59,02
	Evolutionärer Algorithmus	4	1/10n	2	256	56,39
6	Evolutionärer Algorithmus	32	1/10n	16	128	86,15
	Evolutionärer Algorithmus	32	1/10n	16	256	82,04
	Neighborhood Search	1	-	-	-	72,61

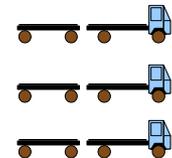
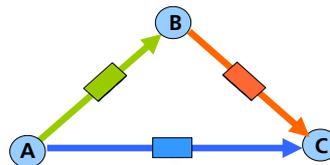
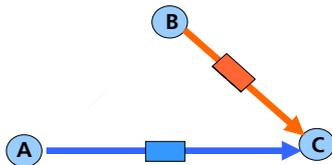
## Generalisierung: Vorgehensweise bei 10 bis 100 Depots

$\begin{matrix} n \\ p \end{matrix}$	10	20	30	40	50	60	70	80	90
1	Light Green								
2	Light Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
3	Green	Green	Green	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
4	Green	Green	Yellow						
5	Green	Yellow							
6	Green	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Pink	Pink	Pink
7	Green	Yellow	Yellow	Yellow	Pink	Pink	Pink	Pink	Pink
8	Green	Yellow	Yellow	Pink	Pink	Pink	Pink	Pink	Pink
9	Green	Yellow	Pink						
10	Green	Yellow	Pink						

## Optimierung der Fahrzeug-Einsatz- und -Umlaufplanung

### Teilproblem „Wechselbrücken-Optimierung“:

- Gegeben ist eine Anzahl von Transportaufträgen für Wechselbrücken mit Startort, Zielort und Zeitfenster-Vorgabe.
- Gesucht ist eine Zuordnung von Aufträgen zu einer (unbeschränkten) Anzahl von Fahrzeugen sowie eine Festlegung der Fahrstrecke, so dass die Summe der Fahrzeiten minimal wird.
- In dieser Aufgabenstellung ist kein Rundlauf gefordert, weil Fahrzeuge am Zielort ggf. weiter eingesetzt werden.

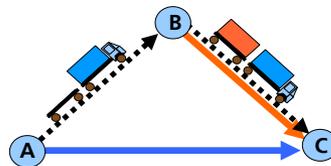


## Optimierung der Fahrzeug-Einsatz- und -Umlaufplanung

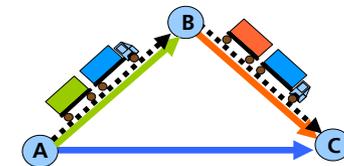
### Lösungsansatz: „Erweiterte Savings-Heuristik“

- Klassische Lösungsansätze sind Linienbildung und Dreiecksverkehre.
- Mit Hilfe der erweiterten Savings-Heuristik werden diese beiden Lösungsansätze abgebildet und weitere Kombinationen berücksichtigt.

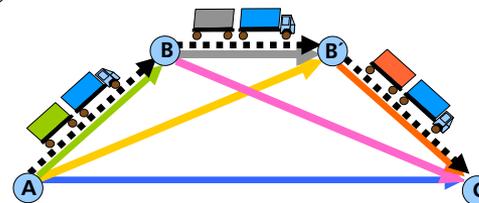
Linienbildung:



Dreiecksverkehr:



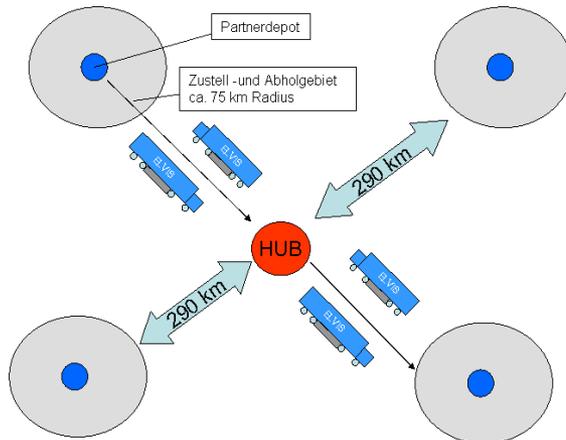
Erweiterter Ansatz:



.....> Fahrstrecke  
—> Auftrag

In vier Beispielszenarien mit 30 bzw. 52 Depots und **170 bis 408 Wechselbrücken** ergaben sich **Einsparpotenziale zwischen 8,8 % und 12,2 %**.

## Praxislösung: „Truck-meets-Truck“ für Komplettladungen

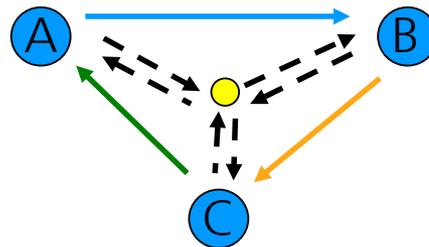


- ca. 25 % Leerfahrtenanteil im Komplettladungsverkehr deutschlandweit
- ca. 20 % höhere Fahrpersonalkosten durch Änderungen der gesetzlichen Lenk- und Ruhezeiten
- Kooperation mehrerer Spediteure mit dem Ziel eines deutschlandweiten Leistungsangebots für Komplettladungen
- Zentrale Planungsunterstützung durch optimale Auftragszuordnung
  - Einhaltung der gesetzlichen Rahmenbedingungen
  - Minimierung der Leerkilometer
  - Optimierung des Fahrereinsatzes
  - Begegnungsverkehre praxisnah und dynamisch ermittelbar sind.

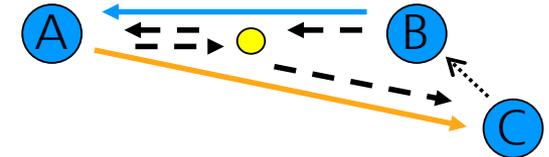
## „Truck-meets-Truck“ für Komplettladungen



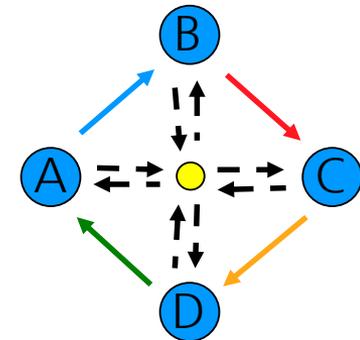
1) Begegnungsverkehr



3) Zusammenführung in Hubs (3 Depots)



2) Begegnungsverkehr mit Leerfahrt



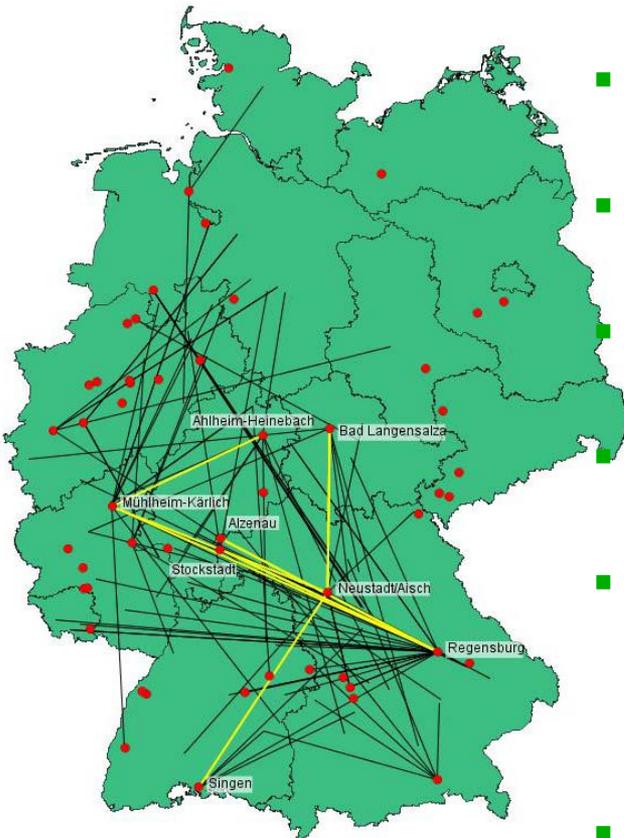
4) Zusammenführung in Hubs (4 Depots)

### Legende

-  Depot
-  Begegnungspunkt
-  Transportauftrag
-  Transportabwicklung
-  Leerfahrt

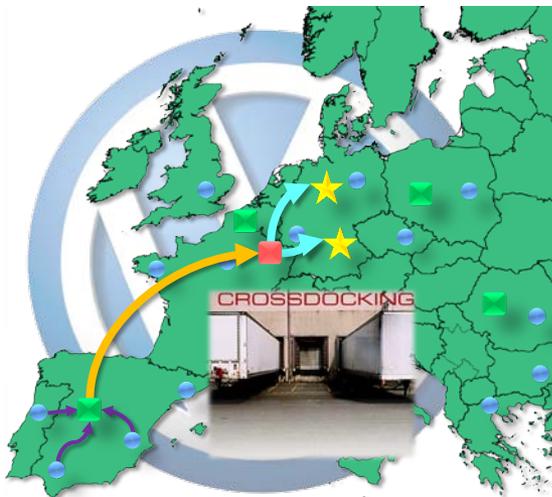
## „Truck-meets-Truck“ für Komplettladungen

### Auswertung der Pool-Transporte der E.L.V.I.S. - AG



- Von 100% Aufträgen im Pool ~47% generell nicht für Begegnungsverkehre geeignet
- Mögliche Begegnungskombinationen: 252 Kombination
- Durchführbare Begegnungsverkehre: 156 Verkehre
- Gesamtauswertung ergab **ca. 20%** begegnungsfähige Transporte
- Systemlösung: Aus Datenbank werden „Begegnungs-orte und –zeiten“ ermittelt und Fahrer vor Abfahrt sowie gegenseitig über Handy informiert.
- Kritische Masse an Aufträgen erforderlich, die bei E.L.V.I.S gegeben ist.

## Praxislösung: Werksbelieferung durch ein Cross-Docking-Konzept

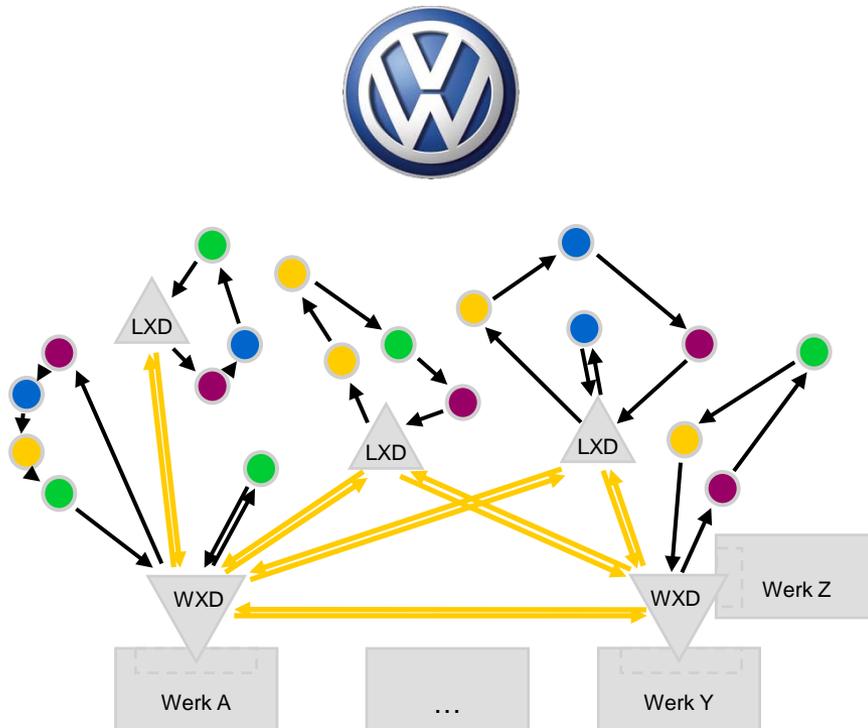


- **Aufgabenstellung**
  - Umgestaltung der Werksbelieferung der Volkswagen AG von Push auf Pull (Neues Logistik Konzept)
  - Evaluierung einer potenziellen Alternative (Crossdocking) durch das Fraunhofer IML
- **Vorgehensweise**

Erweiterung eines Tourenplanungsverfahrens zur integrierten Optimierung von Sammeltouren und Hauptlaufverkehren bei variabler Zuordnung zu Logistikdienstleister-Crossdock-Standorten
- **Zielsetzung**

Verringerung der Transportkosten

## Praxislösung: Werksbelieferung durch ein Cross-Docking-Konzept



Quelle: VW Logistics 2009, Flender 2010

© Prof. Clausen, 2010

## Erweitertes Tourenplanungsverfahren

- Netz mit bis zu zweistufigem Umschlag – alle Lieferungen enden an einem Werk (WXD)
- Hauptläufe durch getaktete Verkehre - Vorläufe durch Touren (TLV)
- Lieferungen können - müssen aber nicht - über Cross-Dock (LXD) gebündelt werden
- Homogene Flotte (40-Tonner)
- Lösung als **Multidepot-VRPTW** mit ca. **10% Kostenersparnis** im Vergleich zur aktuellen Transportsituation mittels **Neighborhood-Search** mit Operatoren zur Sendungsverschiebung / Tourenverschmelzung

**Fazit: Soviel dezentrale Organisation und so soviel zentrale Optimierung wie nützlich !**



## EffizienzCluster – Förderung durch das BMBF 2010 - 2014



### Effizienter Umgang mit Ressourcen

- Effizienter Warentransport und effiziente Produktion
  - effizienter Umgang mit Ressourcen und Umwelt



### Individualität bewahren

- individuelle Versorgung mit Ware und Information
  - Erhalt der individuellen Mobilität



### Urbane Versorgungssicherheit

- robuste und sichere Logistik für Ballungsräume
  - urbane Logistiksysteme im globalen Kontext

Wir wollen die Individualität von morgen mit 75% der Ressourcen von heute sichern.

# Vielen herzlichen Dank für Ihre Aufmerksamkeit !



## Prof. Dr.-Ing. Uwe Clausen

Institutsleiter,  
Fraunhofer Institut für Materialfluss und -logistik IML  
Bereich Logistik, Verkehr und Umwelt &  
Inhaber des Lehrstuhls Verkehrssysteme und -logistik,  
Technische Universität Dortmund  
Joseph-von-Fraunhofer Str. 2-4  
44227 Dortmund



<http://www.iml.fraunhofer.de>  
**[clausen@iml.fraunhofer.de](mailto:clausen@iml.fraunhofer.de)**

Telefon: +49 (0)231 / 9743 -400  
Telefax: +49 (0)231 / 9743 -402