Verkehrsoptimierung & Klimaschutz

Ralf Borndörfer

Festkolloquium
20 Jahre Stiftung Heureka

Karlsruhe, 01.10.2015

Lange Konjunkturwellen & Basisinnovationen

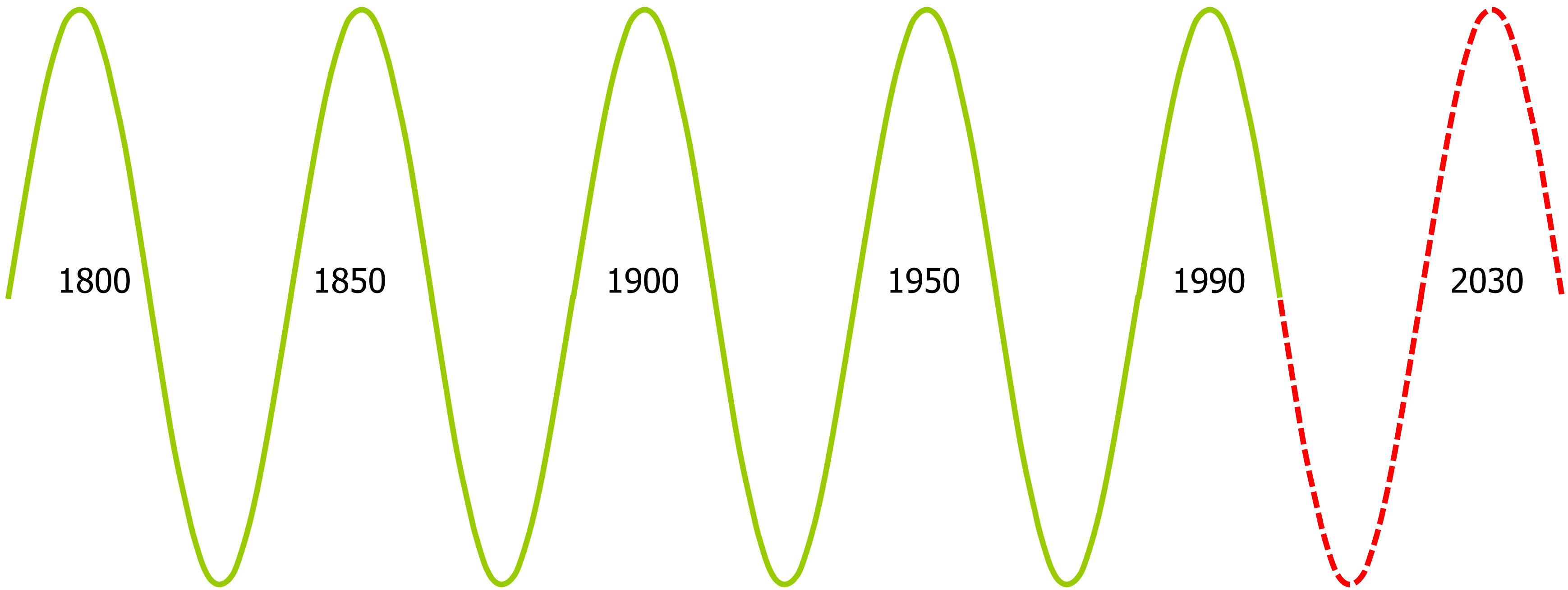
Nikolai D. Kondratieff

Joseph Schumpeter

Welche Bedeutung hat Mobilität?

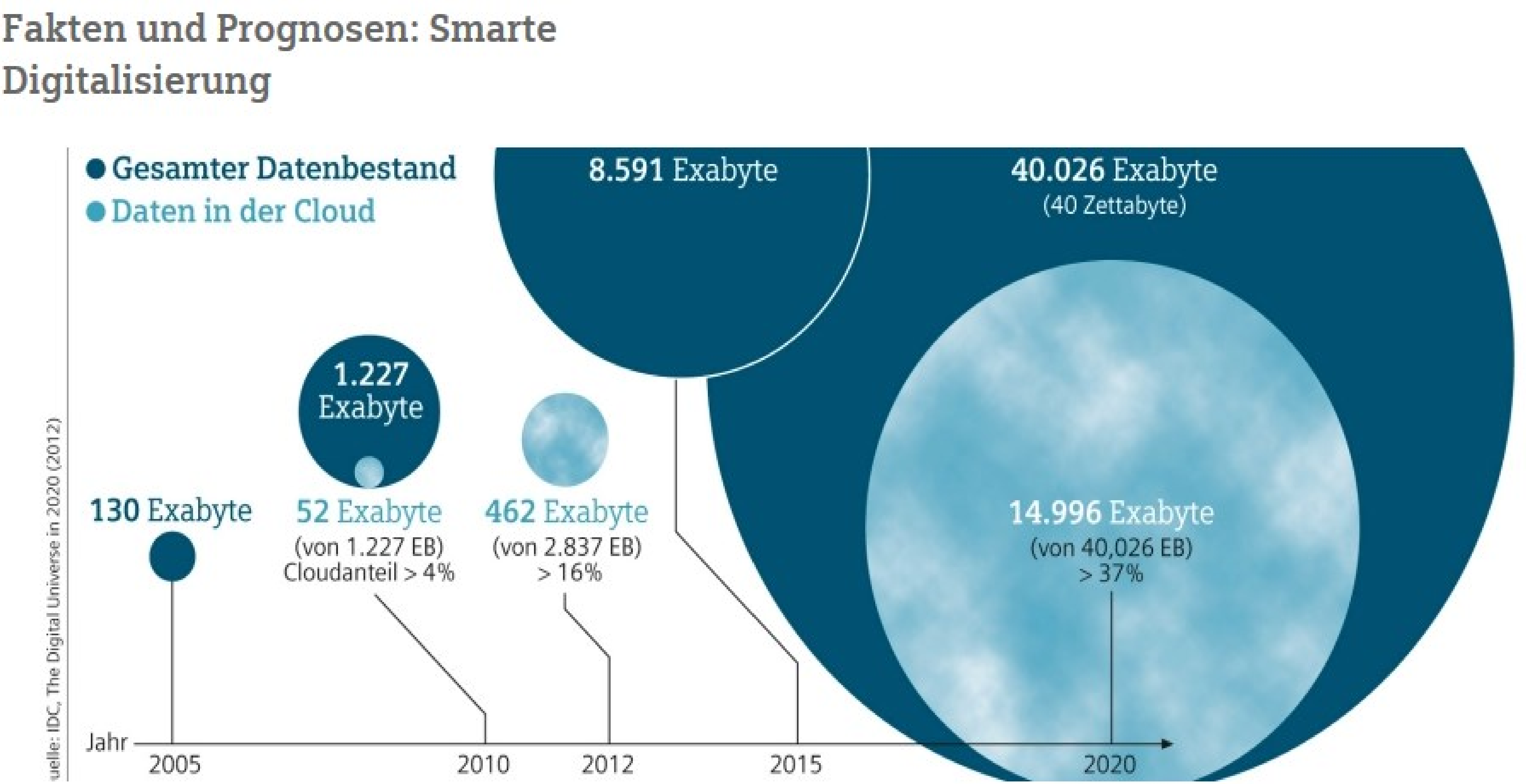
Freie Universität Berlin

Dampfmaschine	Eisenbahn	Elektrischer Strom	Automobil	Informationstechnik	Gesundheit
Textilindustrie	Stahlindustrie	Chemische Industrie	Petrochemie	Strukturierte Inform.	Unstrukt. Inform.



1. Kondratieff	2. Kondratieff	3. Kondratieff	4. Kondratieff	5. Kondratieff	6. Kondratieff

Big Data / Smart Data

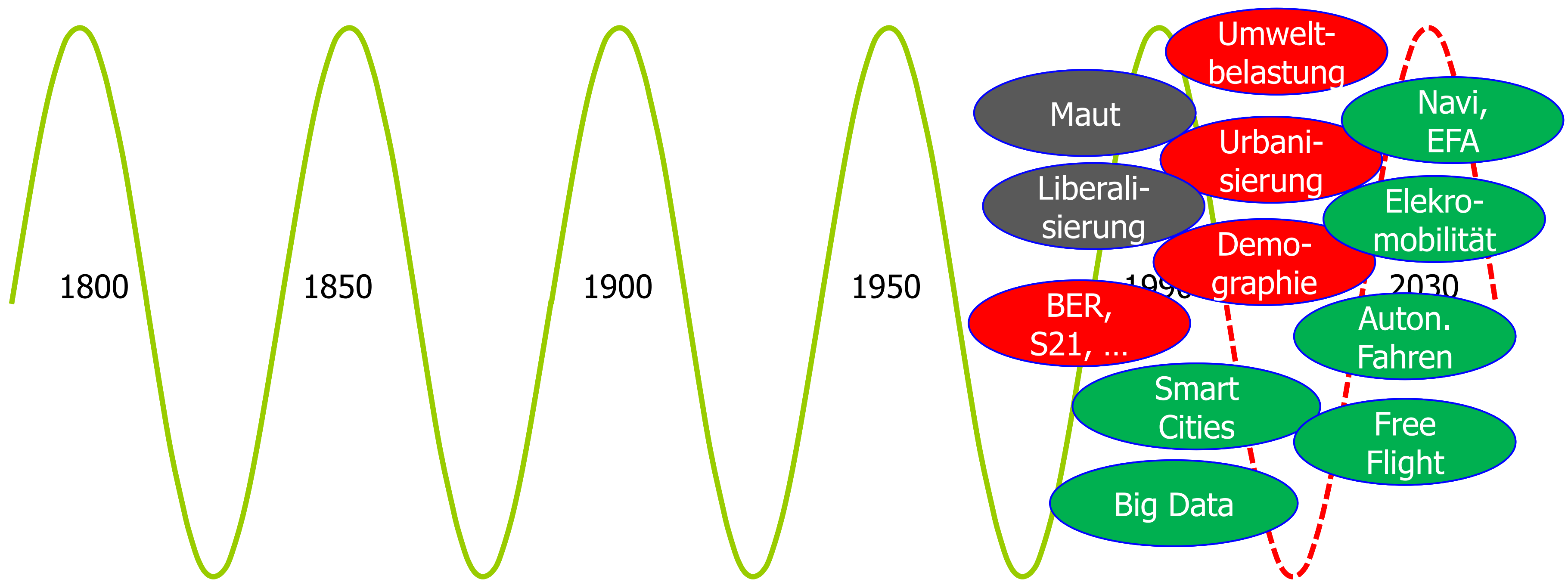


Smart City = Netzwerke + Big Data + Math + …

Welche Herausforderungen gibt es?

Freie Universität Berlin

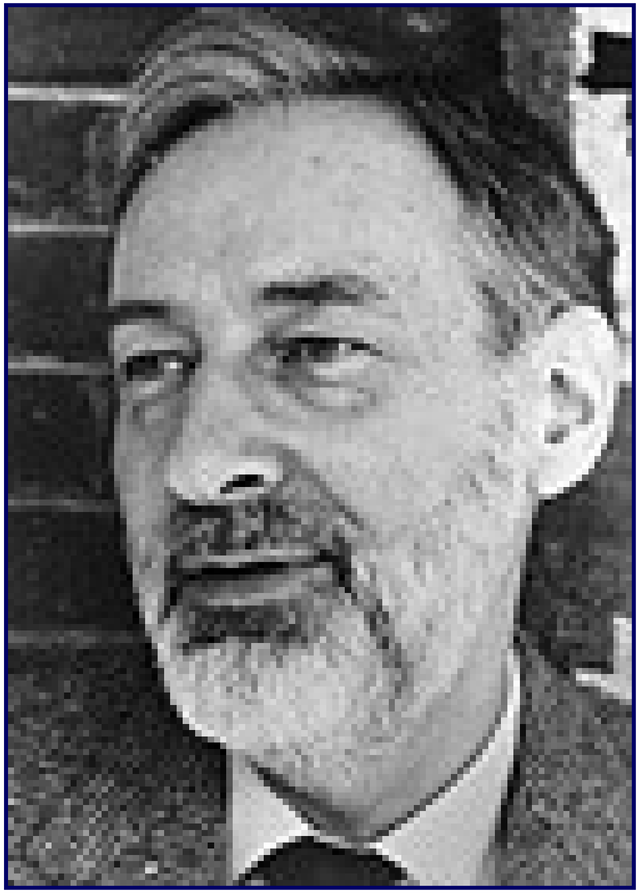
Dampfmaschine	Eisenbahn	Elektrischer Strom	Automobil	Informationstechnik	Gesundheit
Textilindustrie	Stahlindustrie	Chemische Industrie	Petrochemie	Strukturierte Inform.	Unstrukt. Inform.



1. Kondratieff	2. Kondratieff	3. Kondratieff	4. Kondratieff	5. Kondratieff	6. Kondratieff

Was hat die Mathematik beigetragen?

Leonid V. Kantorovich
Nobelpreis für Ökonomie 1975

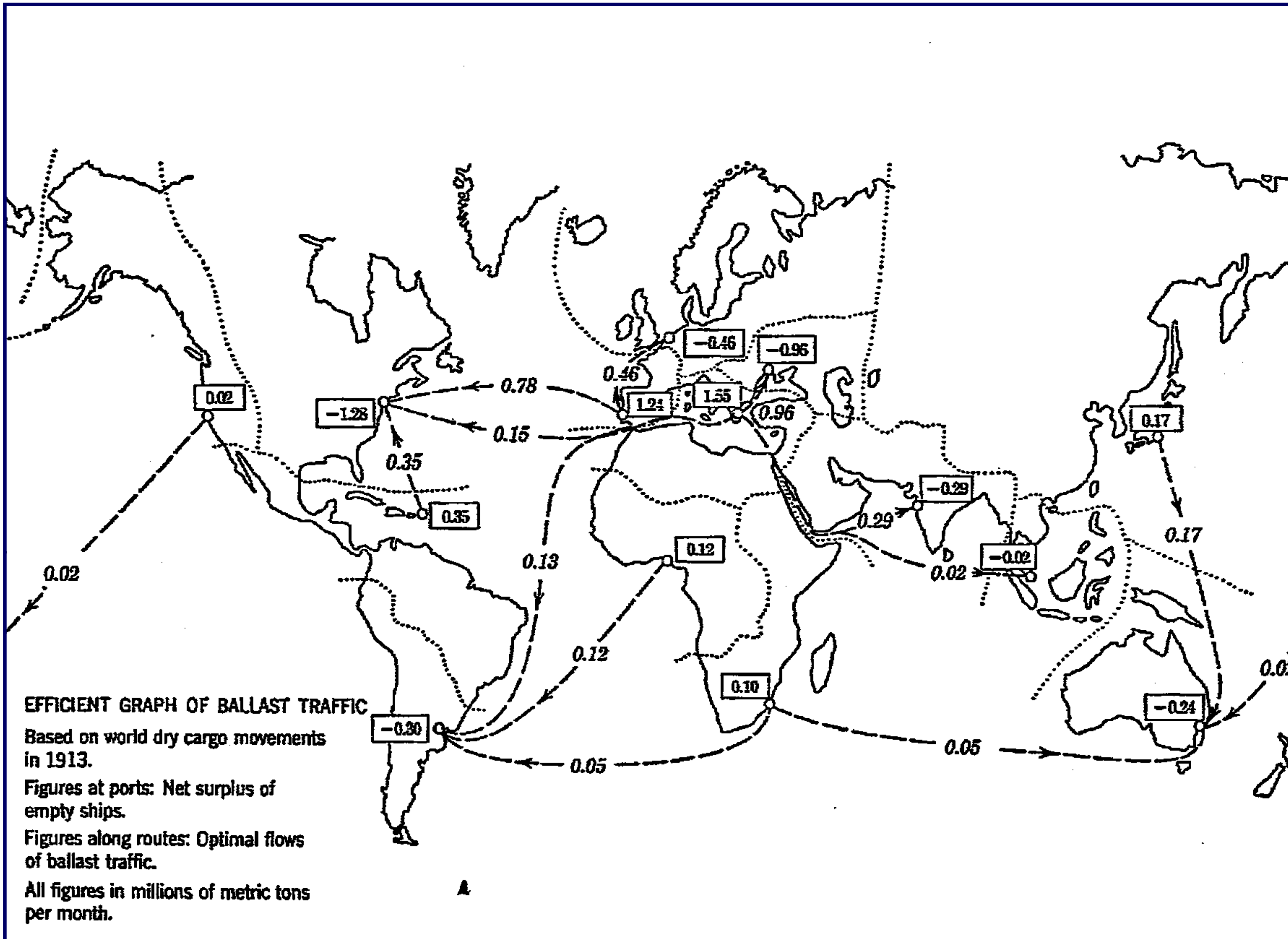


Tjalling C. Koopmans
Nobelpreis für Ökonomie 1975

Optimale Allokation knapper Ressourcen: Seefracht

(Koopmans [1965], 7 Quellen, 7 Senken, alle Seeverbindungen)

Freie Universität Berlin



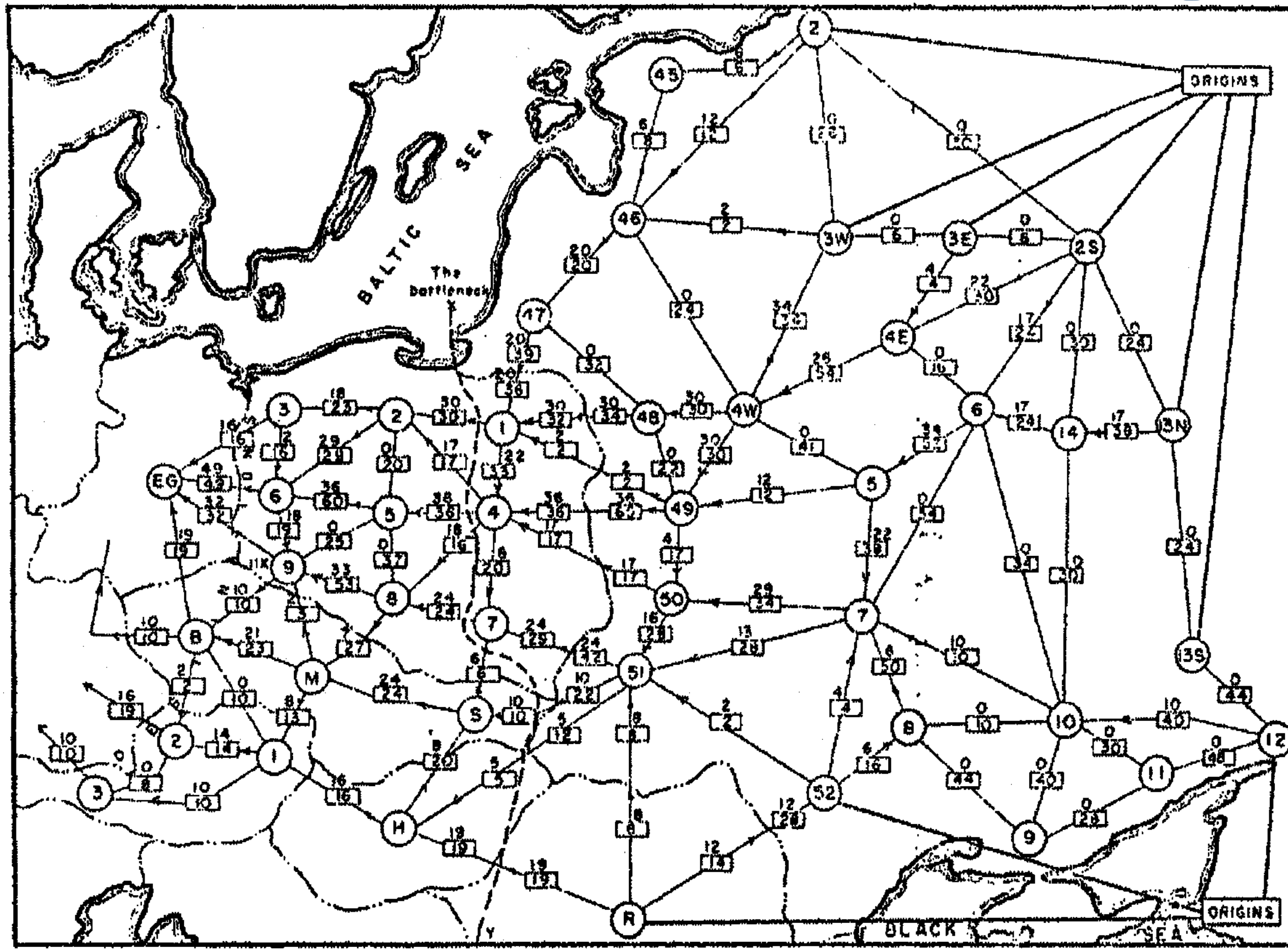
Was hat die Mathematik beigetragen?

D. Ray Fulkerson

L. Randolph Ford Jr.

Netzwerkflüsse: Militärlogistik

(Ford & Fulkerson [1955], Schrijver [2002])

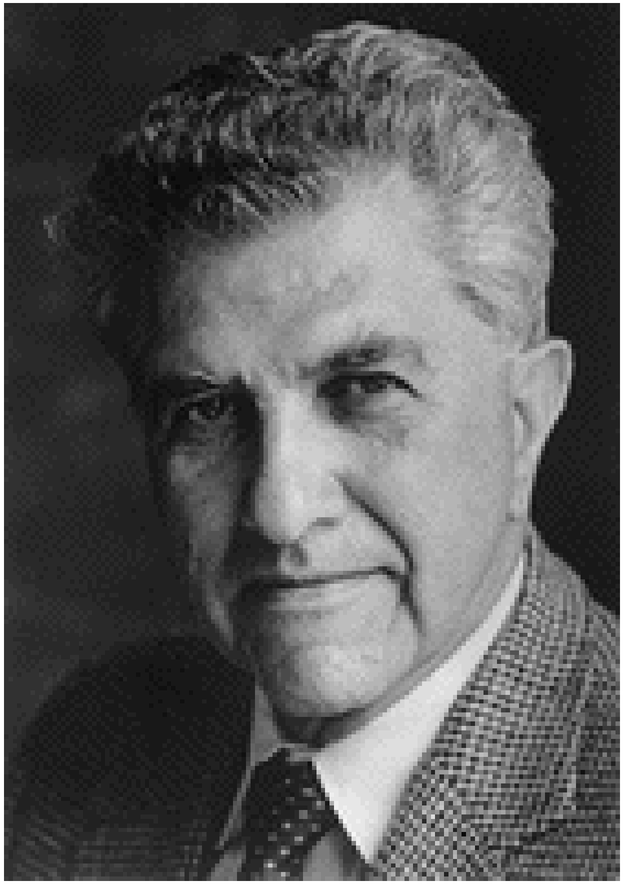


Was hat die Mathematik beigetragen?

Freie Universität Berlin

Abraham Charnes

Finalist für den Nobelpreis für Ökonomie 1975



Merton H. Miller

Nobelpreis für Ökonomie 1990
mit Markowitz & Sharpe

Management Science vol. 3, No. 1, 1956

A MODEL FOR THE OPTIMAL PROGRAMMING OF RAILWAY FREIGHT TRAIN MOVEMENTS*

A. CHARNES AND M. H. MILLER
Purdue University and Carnegie Institute of Technology

The structure shown in Table 1 can be translated into equation form by moving a row of λ's, one for each column, up through the rows and inserting the equal sign to the right of the P_0 column. The first two equations, for example, would be:

$$4 = 1\lambda_1 + 1\lambda_4 - 1\lambda_6 + 1\lambda_{12}$$

$$1 = 1\lambda_1 + 1\lambda_5 - 1\lambda_7 + 1\lambda_{13}$$

With the addition of the variables, the problem has been reduced to a standard simplex problem of the form:

$$\text{Min.} \sum_{i=1}^{n} \lambda_i c_i$$

subject to:

$$\sum_{i=1}^{n} \lambda_i P_i = P_0$$

$$\lambda_i \geqq 0$$

and can be solved by the simplex technique.

More fundamentally, the train-scheduling problem will be seen to possess certain striking structural features which may merit its inclusion among the basic model types of linear programming.[2] The background necessary for an understanding

* The research underlying this paper was supported, in part, by a grant to the Graduate School of Industrial Administration, Carnegie Institute of Technology by the Westinghouse Air Brake Corp. for fundamental research on problems of the transportation industries and in part by the Office of Naval Research.

The authors wish to acknowledge the many contributions made to the study by their colleague, W. W. Cooper; and by their co-workers at the railroad which served as the focus of the study, Messrs. John Cunningham, Robert Lake, Harold Soyster and Glenn Squibb. We also wish to thank Miss Suzanne Levin, Mr. Kenneth Kretschmer and Mr. Richard Poulin for assistance and advice on the computations during the research phase of the project; and the other members of the Westinghouse Air Brake Project, Messrs. Frank Brown, Edwin Mansfield and Harold Wein for many helpful suggestions made throughout the course of the investigation.

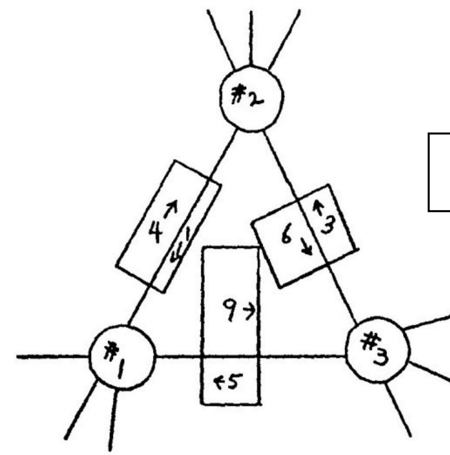
[1] In 1952, there were some 230 companies classified as terminal railroads with roughly 7500 miles of track and a total investment in railway property of over $1 billion [8]. Total revenues from handling some 20 million freight cars were in excess of 250 million dollars. These figures are conservative. They understate considerably the size of the terminal switching operation since they do not include the essentially similar services undertaken directly by the trunklines and consolidated in their regular accounts.

[2] For a discussion of L.P. model types and their significance for management science: See A. Charnes and W. W. Cooper [1].

TABLE 1

Structural tableau of train-scheduling model

$c_j \rightarrow$			1.0	1.0	1.0	1.2	1.2	0	0	0	0	0	0	M	M	M	M	M	M
From	To	Shipment Requirements	Routes					Surplus Vectors (light moves)						Artificial Vectors (legs)					
			1,2	1,3	2,3	1,2,3	1,3,2	1–2	2–1	1–3	3–1	2–3	3–2	1–2	2–1	1–3	3–1	2–3	3–2
		P_0	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}	P_{11}	P_{12}	P_{13}	P_{14}	P_{15}	P_{16}	P_{17}
1	2	4	1			1		−1						1					
2	1	1	1				1		−1						1				
1	3	9		1			1			−1						1			
3	1	5		1		1					−1						1		
2	3	6			1	1						−1						1	
3	2	3			1		1						−1						1



+ rules

CHART 1. Simplified map of terminal switching railroad, showing connections with trunklines, major interchange and customer yard areas, and traffic requirements (in trainloads) between major points.

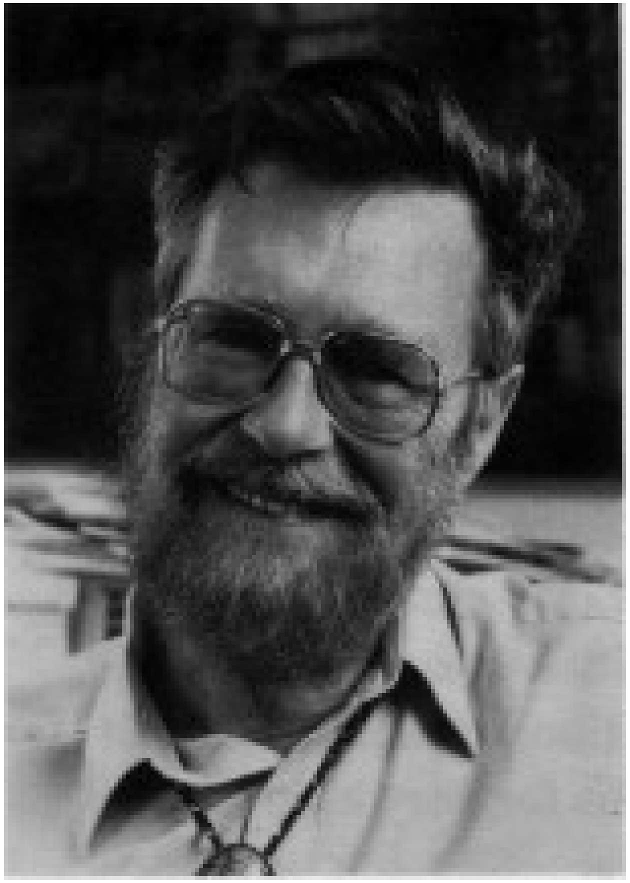
postponed until the description of the model and the computational routine has been completed.

Above the routes, in the row labeled c_j, are entered the costs of assigning a single crew and engine package to the route in question. These costs may be stated either as the standard crew and engine expense, or as the expected costs reflecting the fact that on longer runs there is a greater probability of running into overtime. We constructed working models both ways and found, that optimal programs were not particularly sensitive to variations in the cost of crews. In fact, it was usually possible to simplify the calculation by minimizing the number of crews, that is treating the cost of each crew as 1.

P_6 to P_{11} in the tableau are overfulfillment slack vectors. In the train scheduling context they correspond to "light moves", or trips by a crew and engine without cars. If, for example, four crews should be assigned to the route P_1—which runs

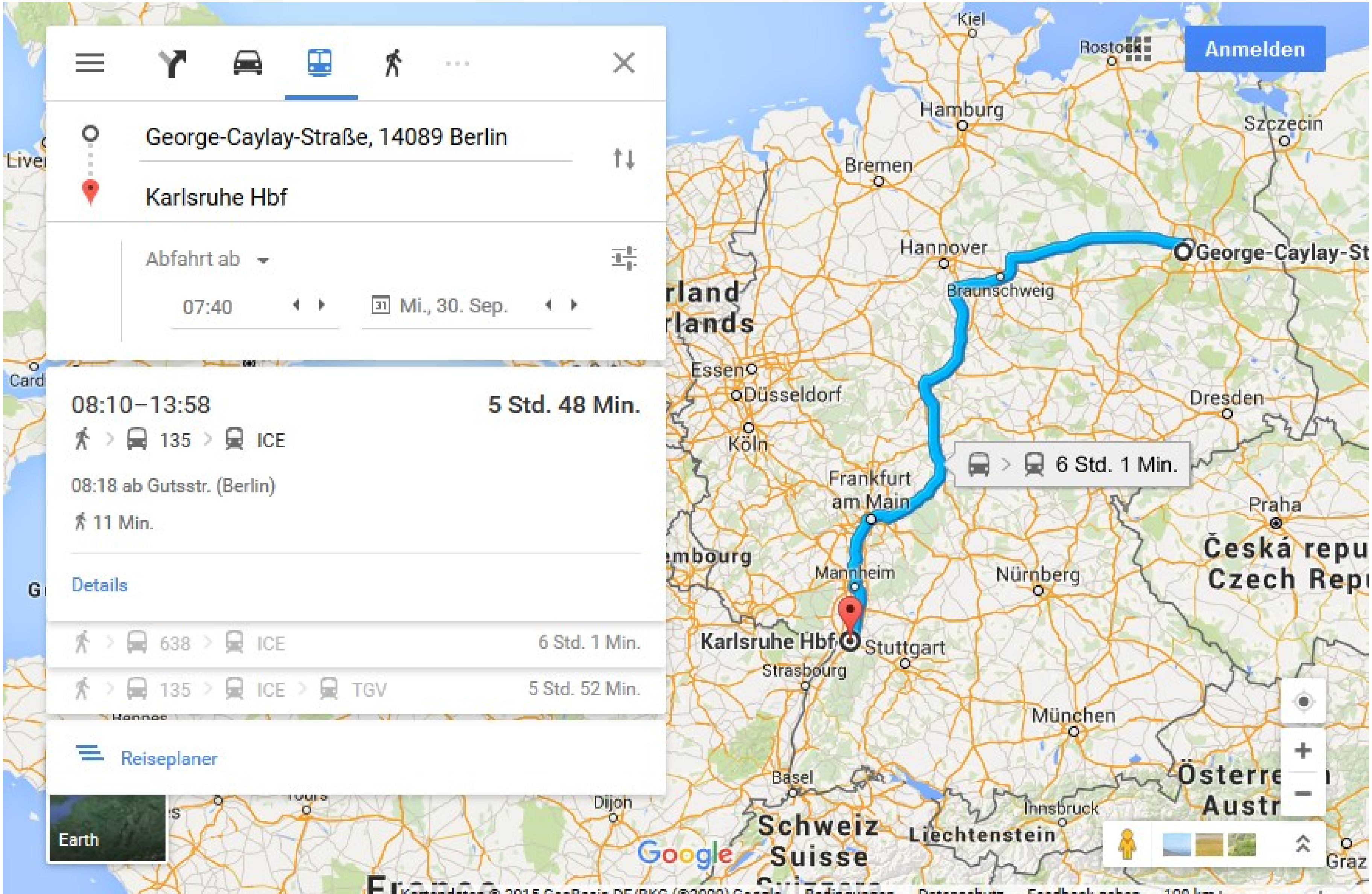
Was hat die Mathematik beigetragen?

Freie Universität Berlin



Edsger W. Dijkstra

Kürzeste-Wege-Algorithmen: Navigationssysteme



Welchen mathematischen Fortschritt gibt es? LP 1987-2000

(Bixby, Solving Real-World Linear Programs: A Decade and More of Progress. Oper. Res. 50(1) 3-15, 2002)

Hardware

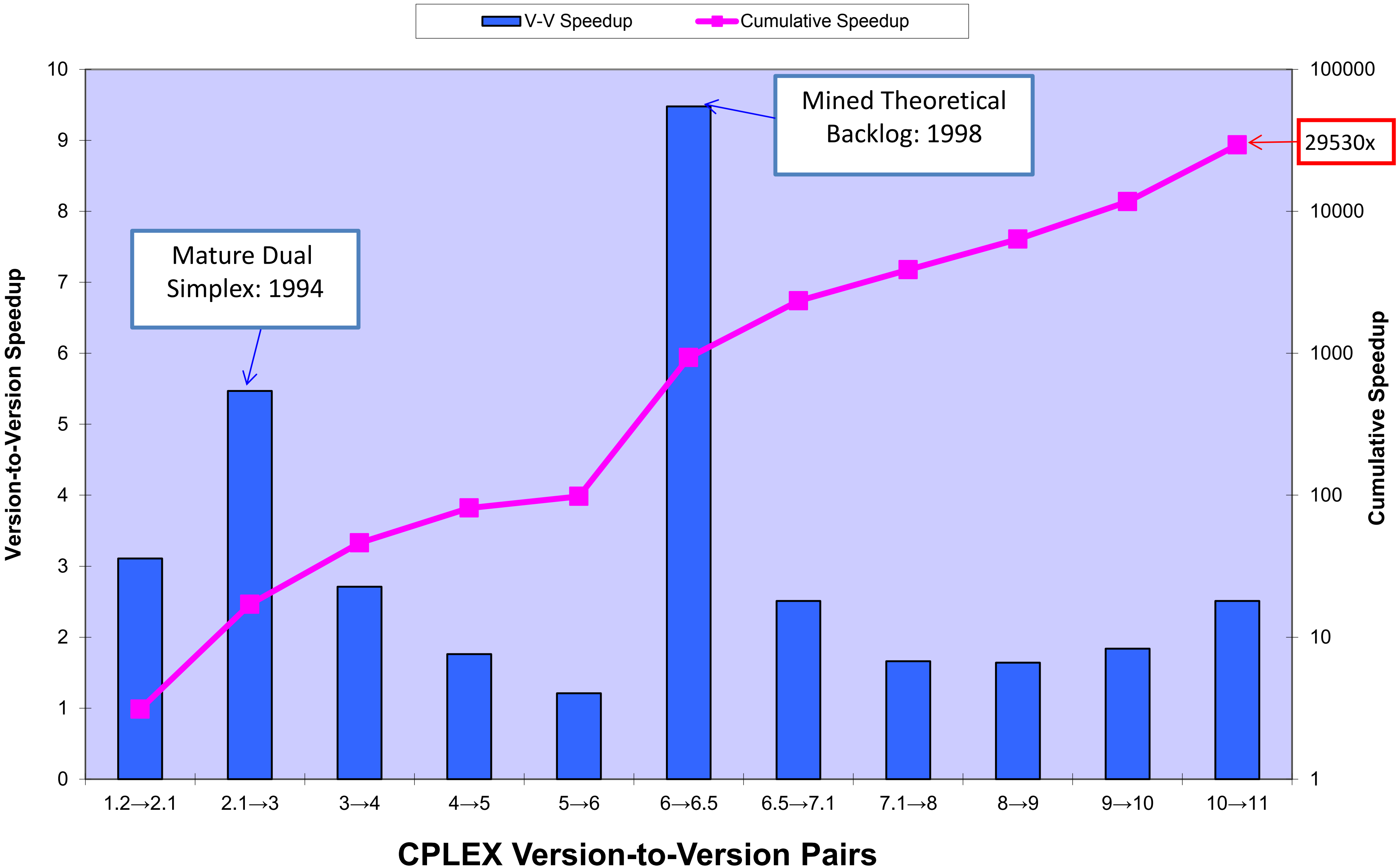
AlterComputer	*Neuer Computer*	*Speedup*
Sun 3/50	Pentium 4, 1.7 GHz	800
Sun 3/50	Compaq Server ES 40, 667 MHz	900
Intel 386, 25 MHz	Compaq Server ES 40, 667 MHz	400
IBM 3090/108S	Compaq Server ES 40, 667 MHz	45

Software

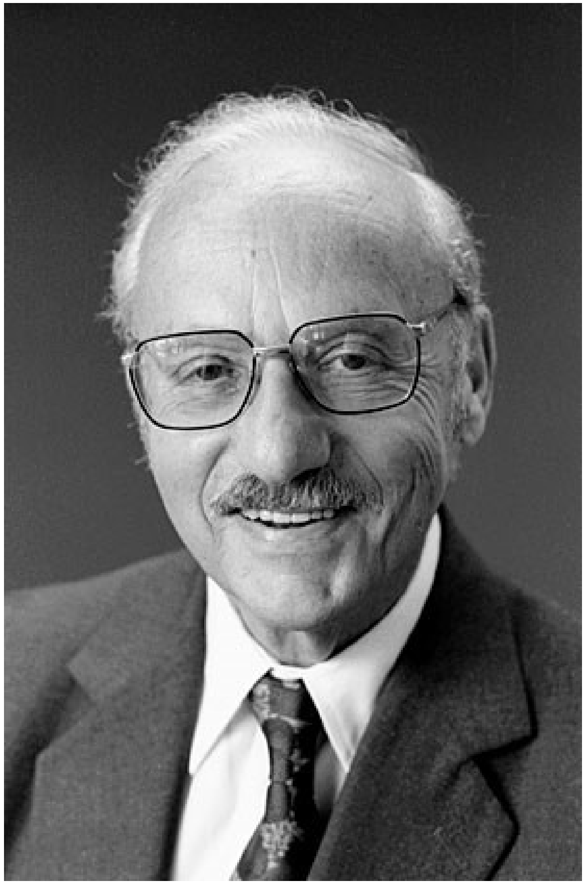
Alter Code	*Neuer Code*	*Geschätzter Speedup*
XMP	Cplex 1.0	4.7
Cplex 1.0	Cplex 5.0	22,0
Cplex 5.0	Cplex 7.1	3.7
XMP	Cplex 7.1	960

"A Model that might have taken a year to solve 10 years ago, can now solve in less than 10 seconds."

Welchen mathematischen Fortschritt gibt es? IP 1991-2010
(Bixby, Lecture on Mixed-Integer Programming, TU Berlin, 20.01.2010)

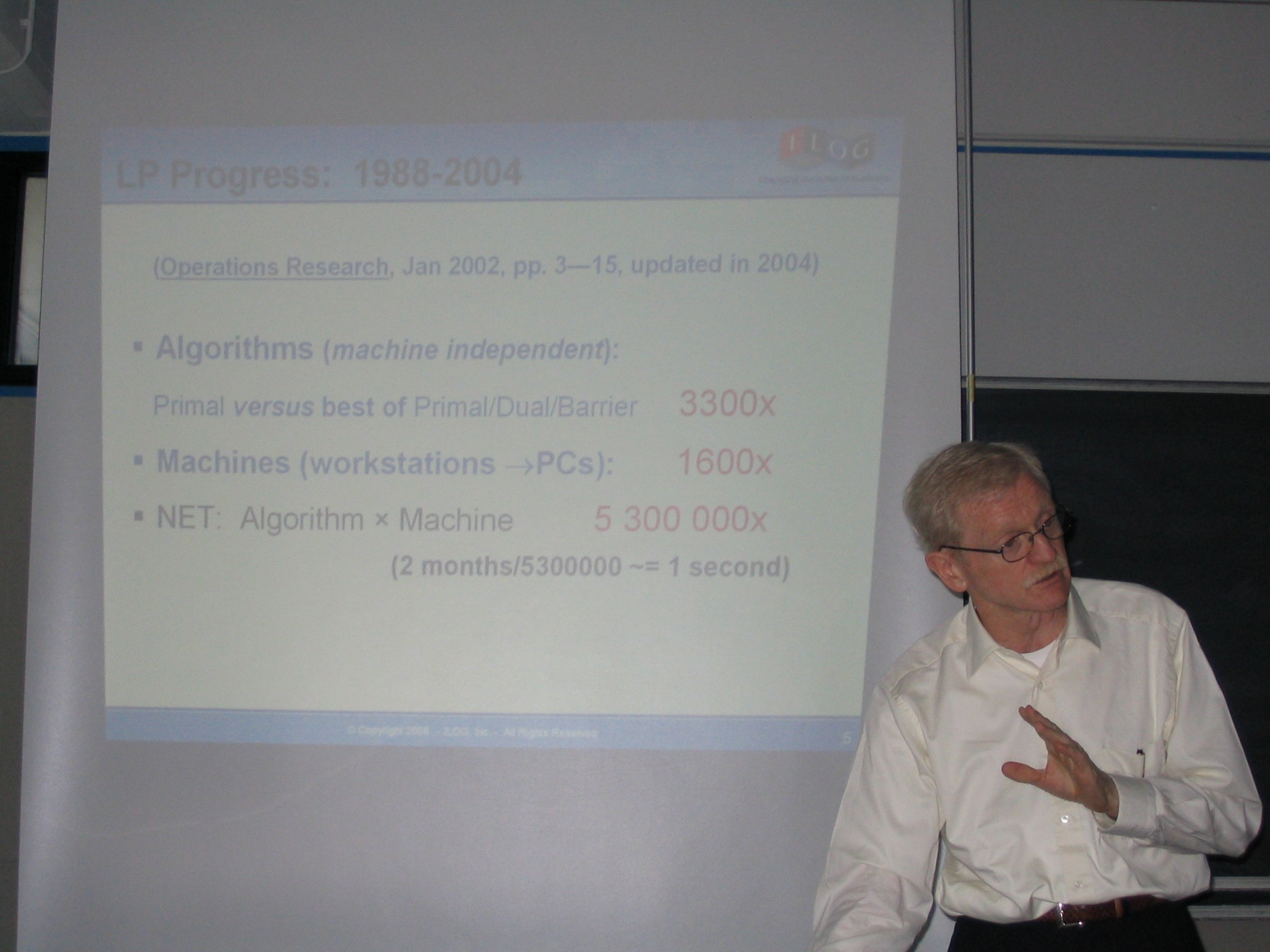


Lineare Programmierung



George B. Dantzig

Robert E. Bixby


LP Progress: 1988-2004
(Operations Research, Jan 2002, pp. 3—15, updated in 2004)
Algorithms (machine independent):
Primal versus best of Primal/Dual/Barrier 3300x
Machines (workstations →PCs): 1600x
NET: Algorithm × Machine 5 300 000x
(2 months/5300000 ~= 1 second)
© Copyright 2006 - ILOG, Inc. - All Rights Reserved
5

Angenommen, Sie hätten die Wahl:

Freie Universität Berlin

Option 1: Ein MIP mit heutiger Löser-Technologie auf einem Rechner von 1991 zu lösen, oder

Option 2: Ein MIP mit der Löser-Technologie von 1991 auf einem heutigen Rechner zu lösen.

Was würden Sie wählen?

Option 1 wäre um einen Faktor 200 schneller!

Wir brauchen uns nicht zu entscheiden. Wir können die Aufgaben mit heutiger Löser-Technologie auf modernen Rechnern lösen.

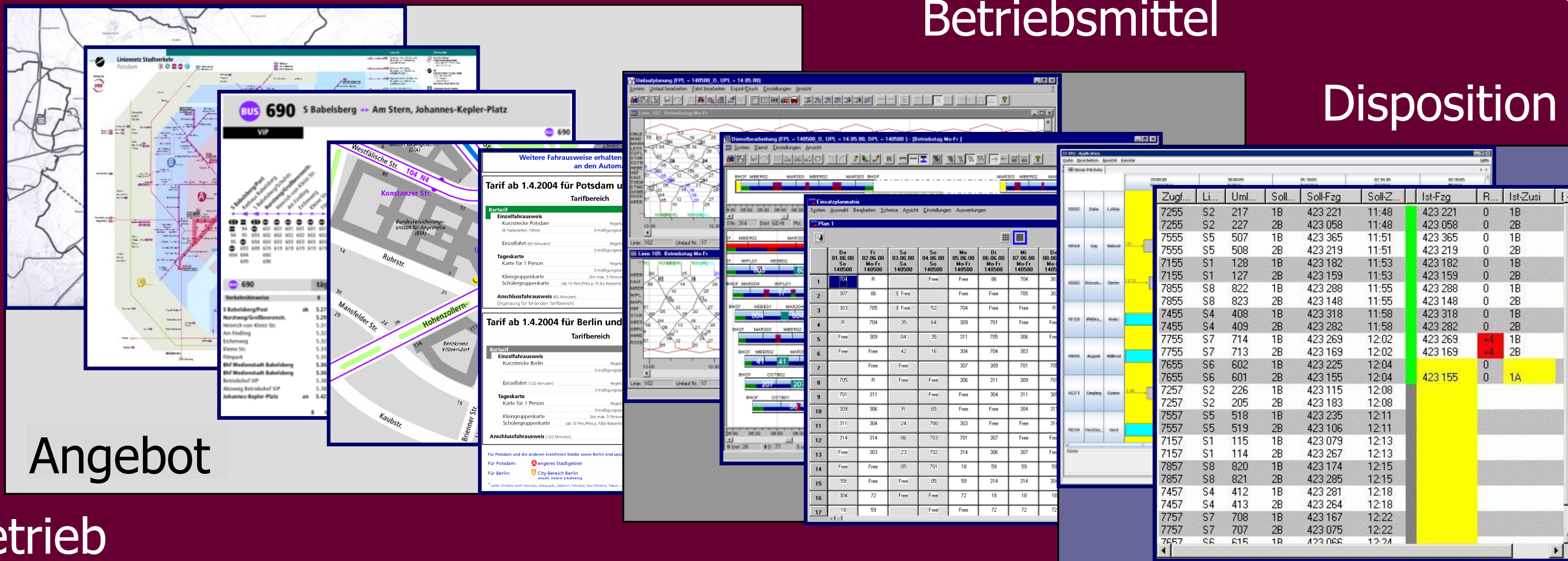
Folie von Bob Bixby, Gurobi

Welche mathematischen Probleme gibt es?

Freie Universität Berlin

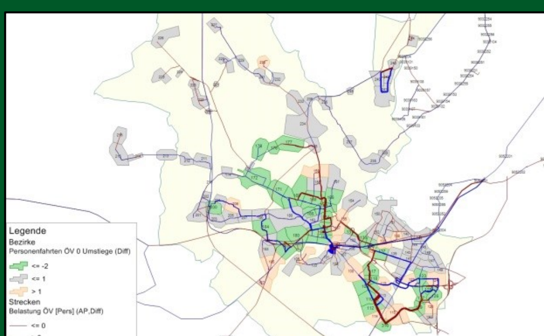
Betriebsmittel

Disposition

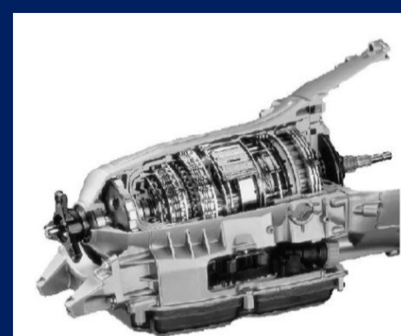


Betrieb

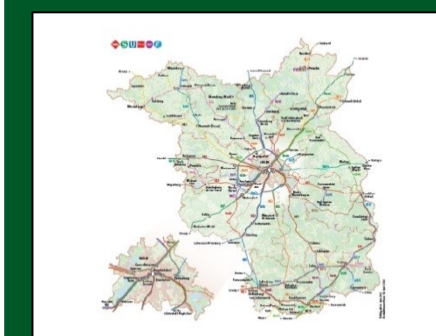
Nutzer



Fahrzeugtechnik



Markt

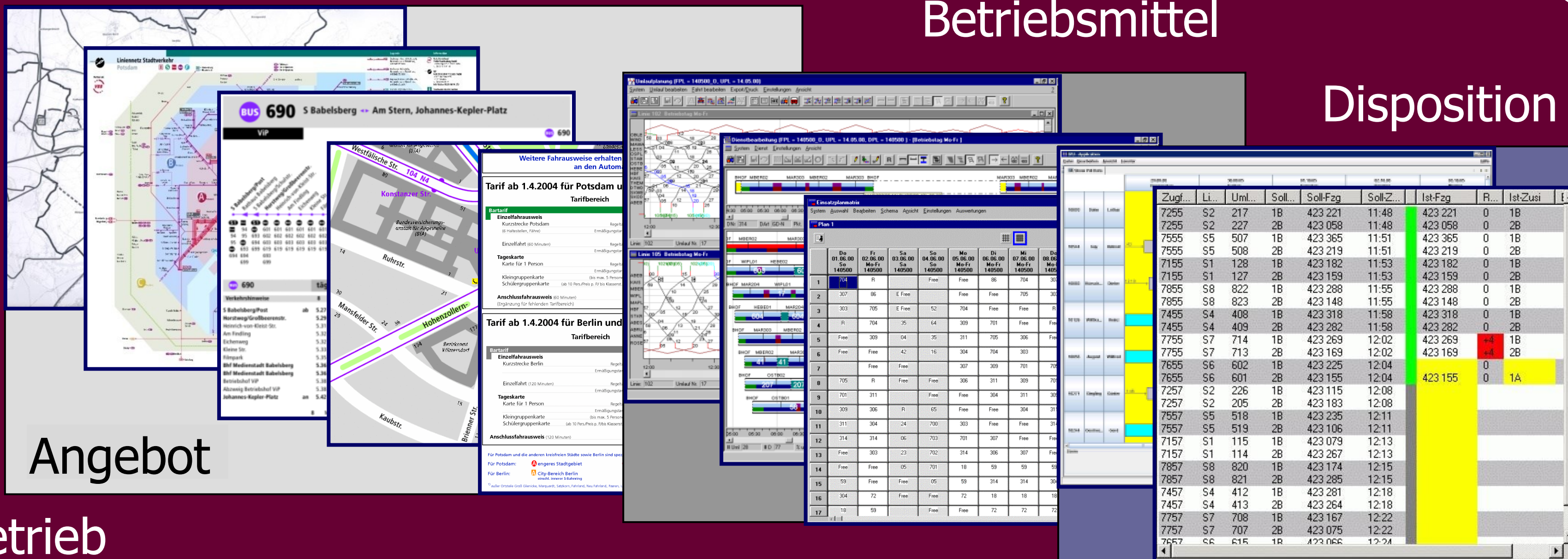


Wo wird Mathematik bereits eingesetzt?

Freie Universität Berlin

Betriebsmittel

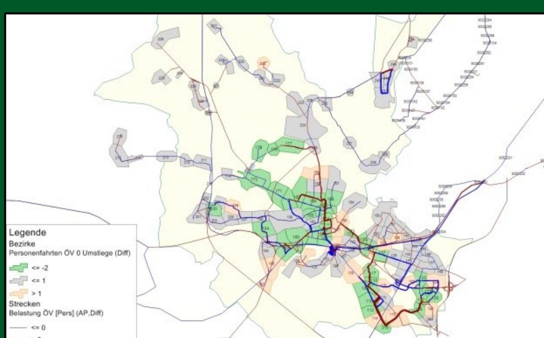
Disposition



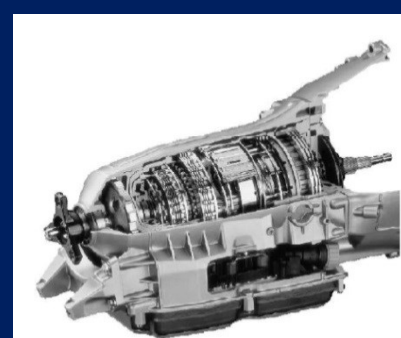
Angebot

Betrieb

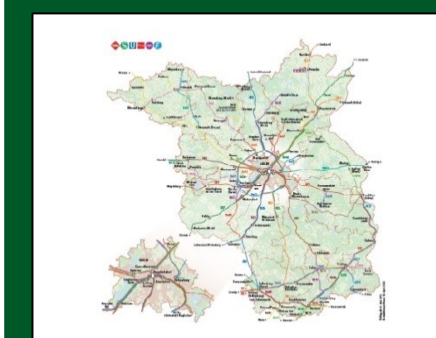
Nutzer



Fahrzeugtechnik

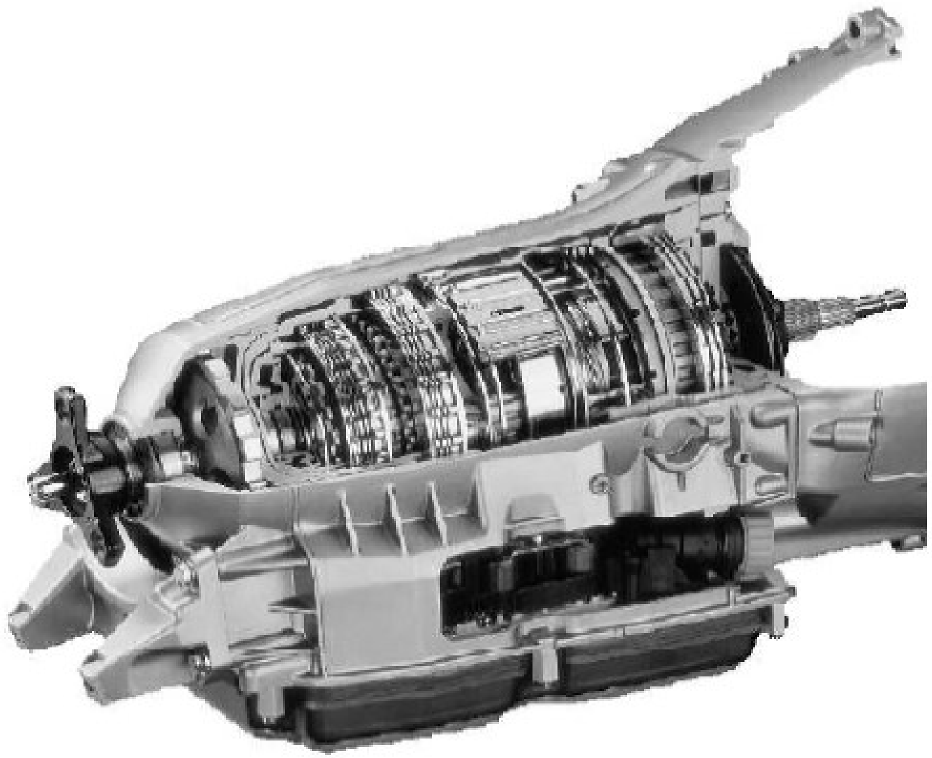


Markt



Modellbasierte Regelung von Automatikgetrieben

Dissertation P. Hamann, Daimler AG



Folie von Volker Mehrmann, MATHEON

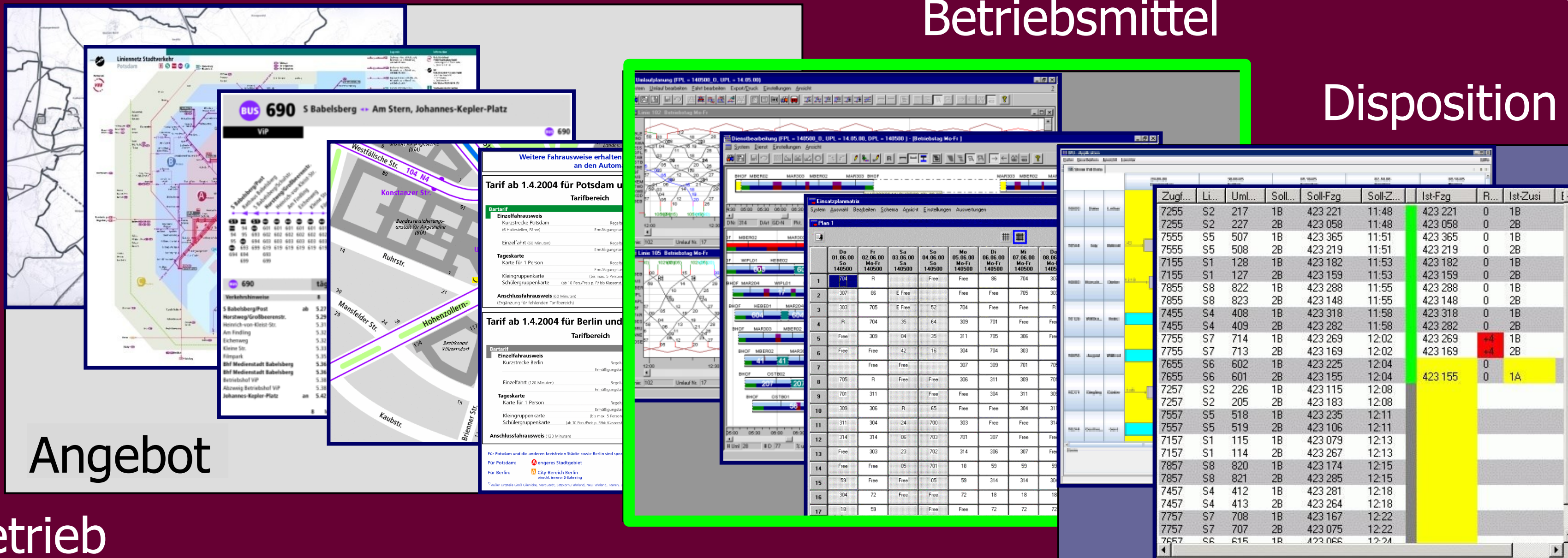
Wo wird Mathematik bereits eingesetzt?

Freie Universität Berlin

ZIB

Betriebsmittel

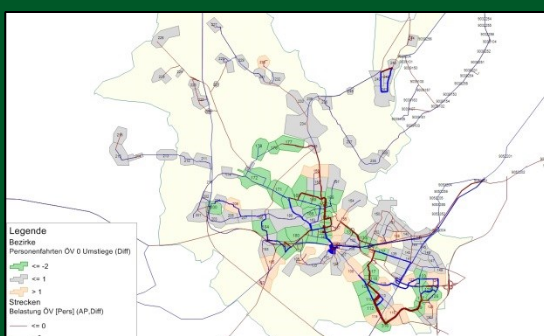
Disposition



Angebot

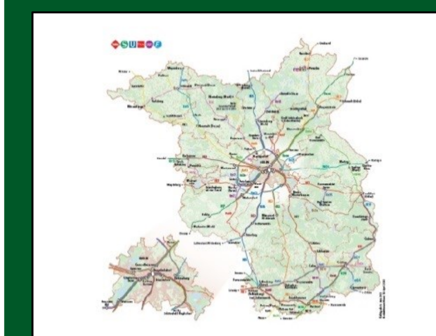
Betrieb

Nutzer

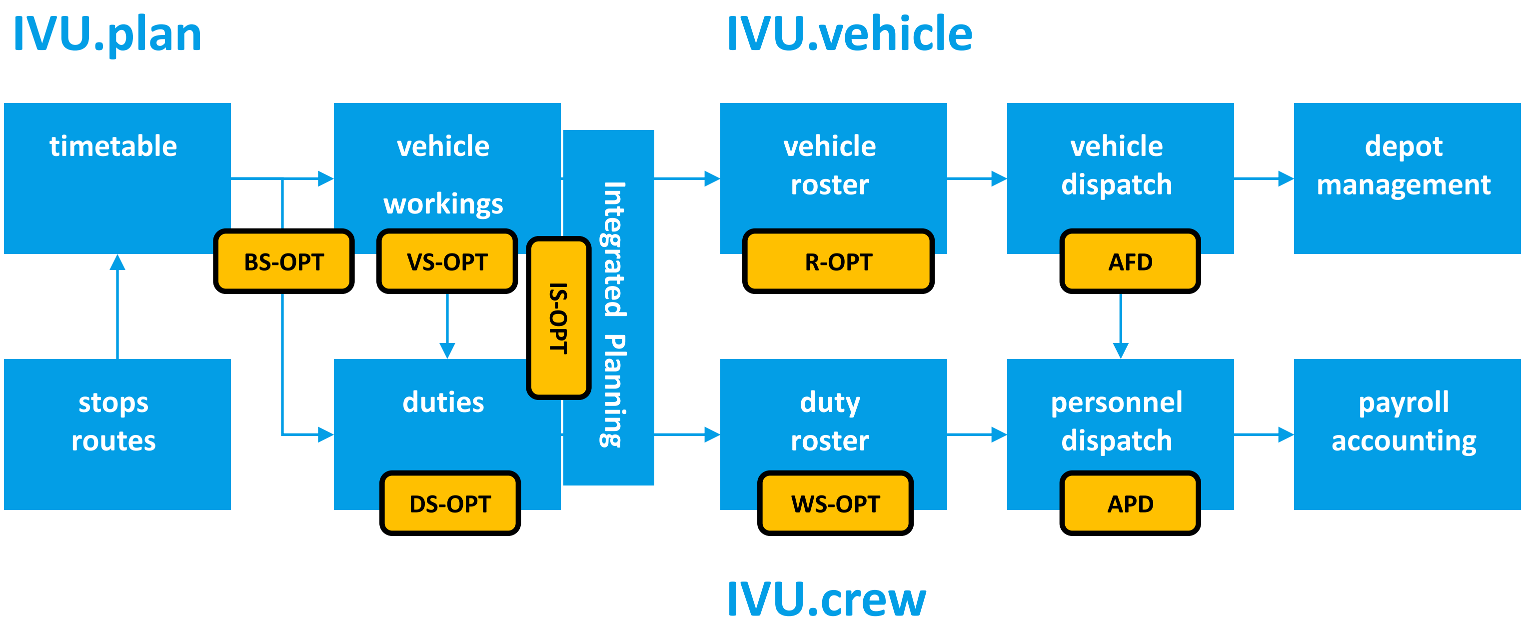


Fahrzeugtechnik

Markt

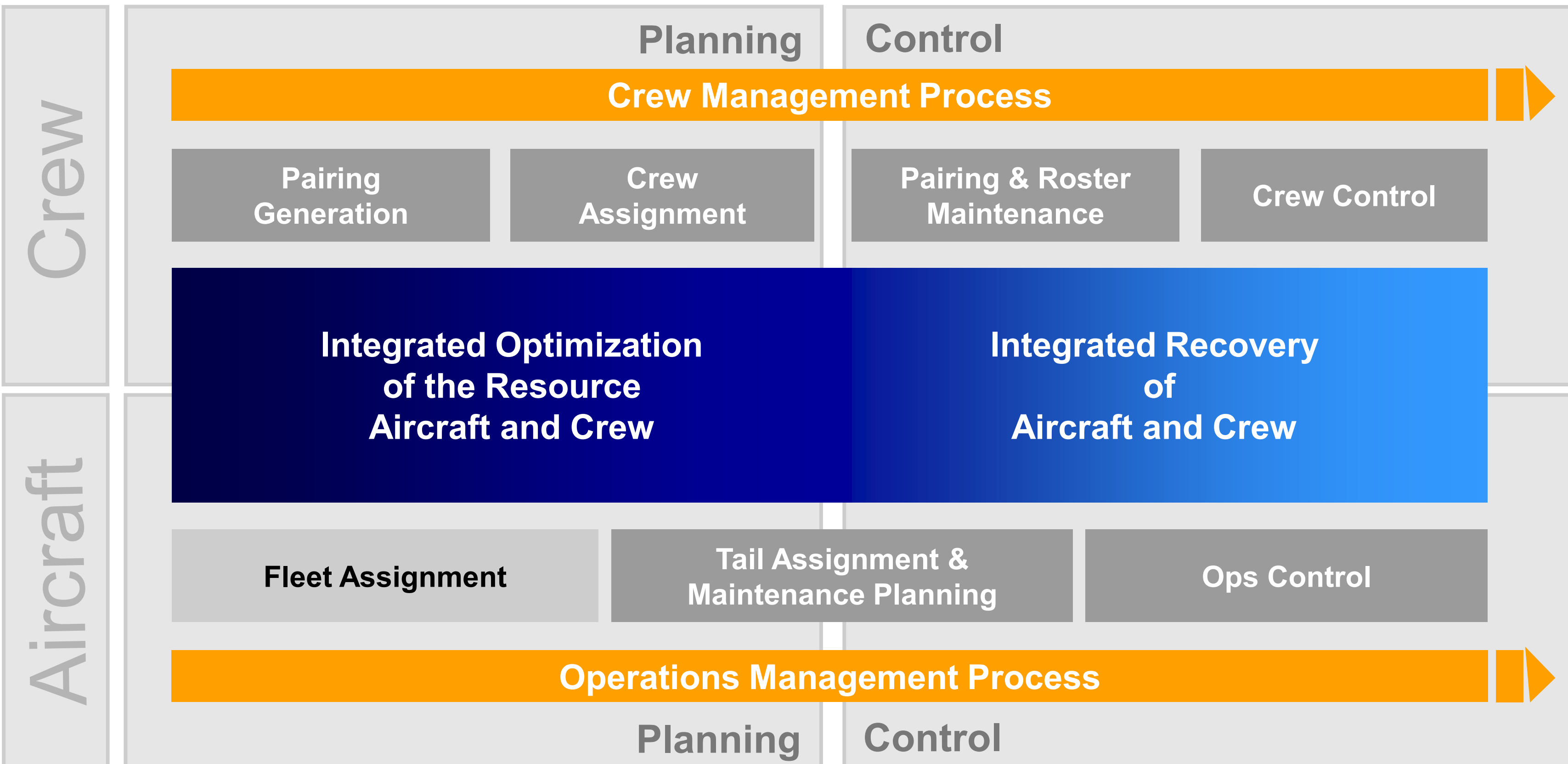


IVU.plan / IVU.crew / IVU.vehicle
System Overview with Optimization Modules



Folie von IVU Traffic Technologies AG

OASIS Project (2005-2010)
Optimization Algorithms for Seamless and Integrated Solvers



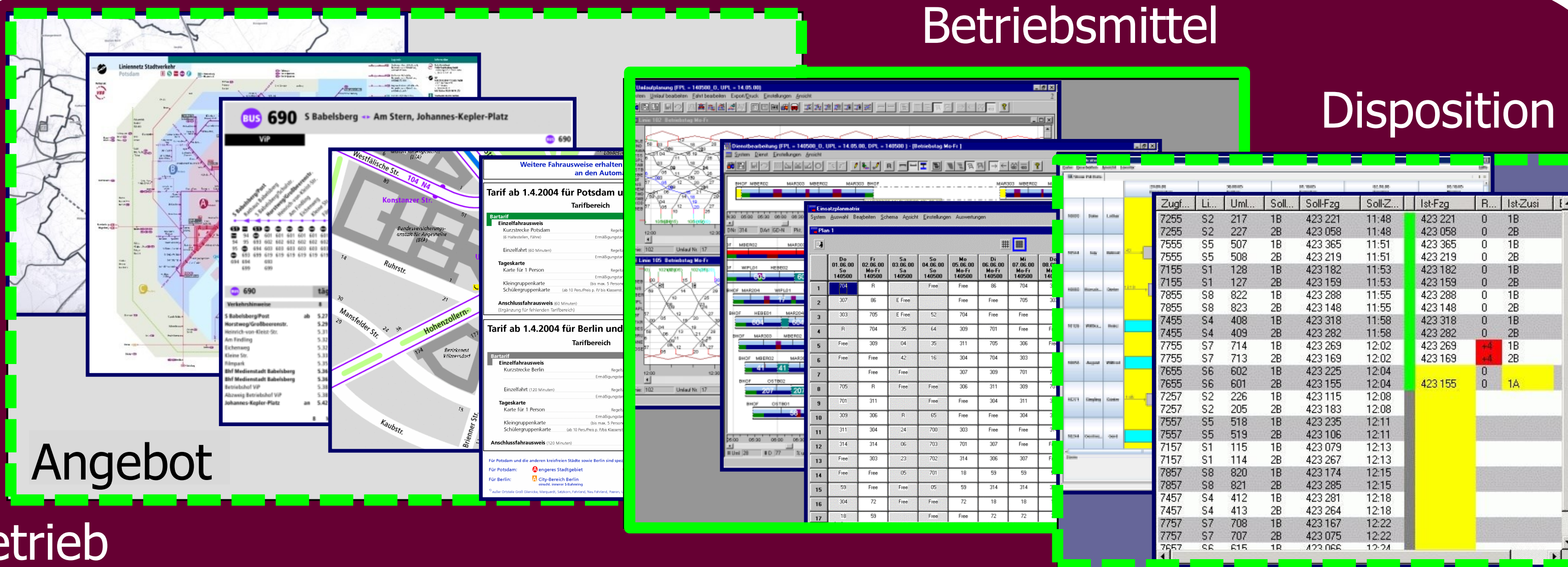
Folie von Lufthansa Systems AG

Wo wird Mathematik bereits eingesetzt?

Freie Universität Berlin

Betriebsmittel

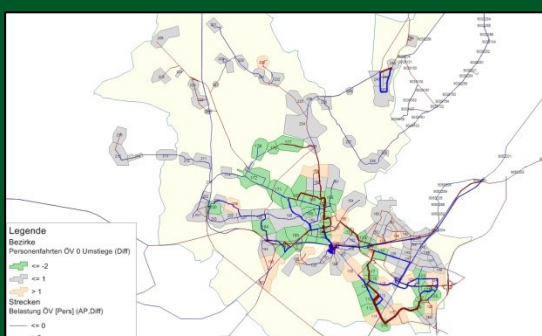
Disposition



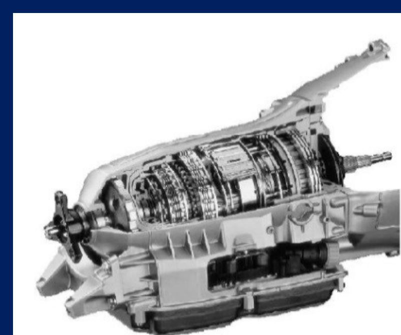
Angebot

Betrieb

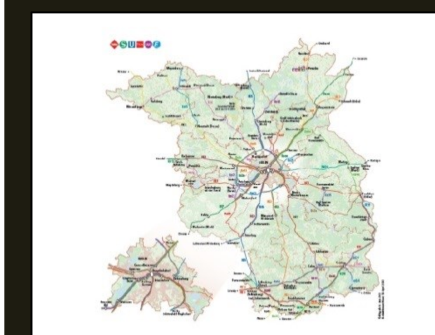
Nutzer



Fahrzeugtechnik

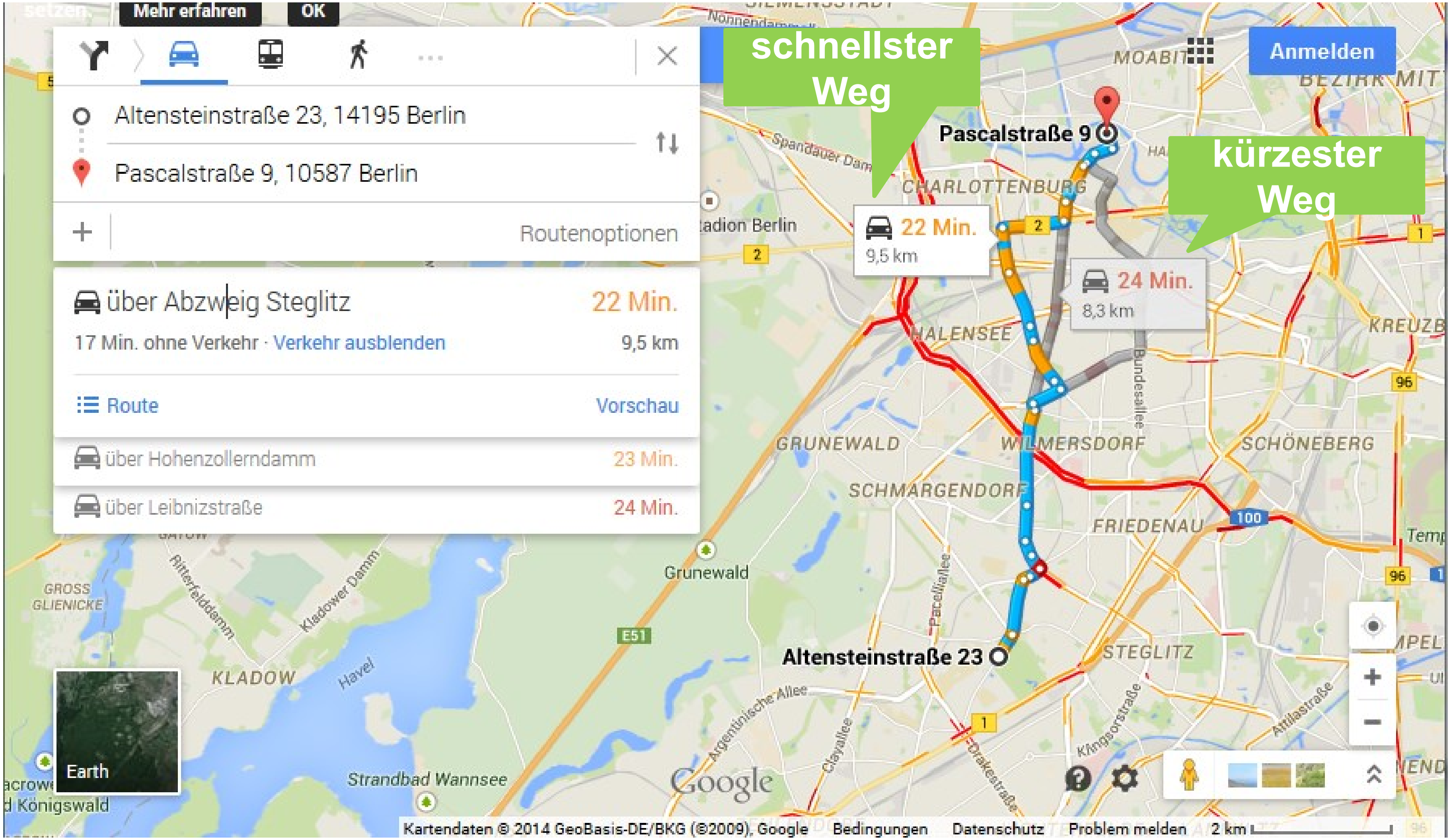


Markt



Was ist die "beste Lösung"?

Was ist der beste Reiseweg von A nach B?

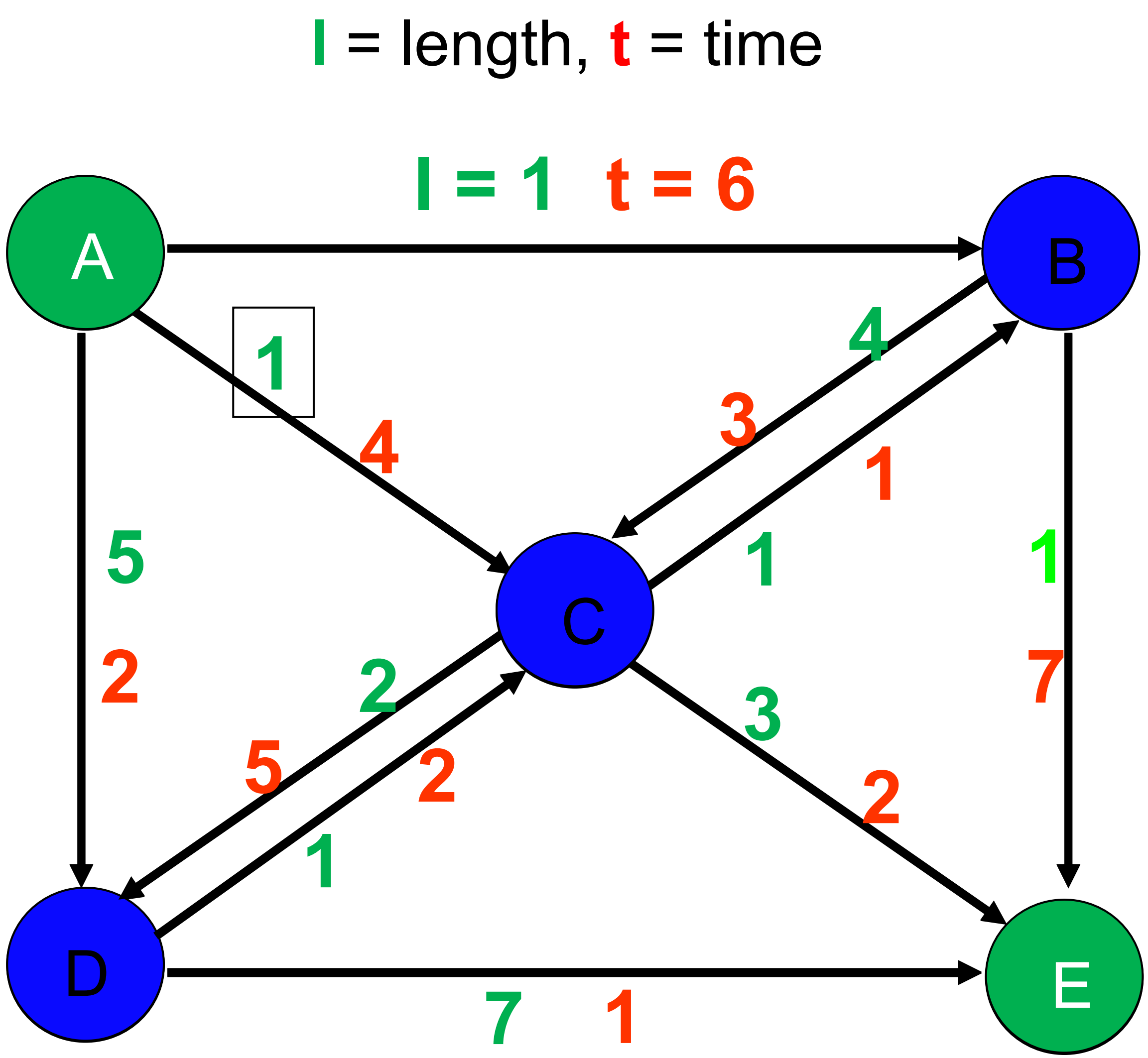


Das Pareto-Prinzip

Vilfredo Pareto

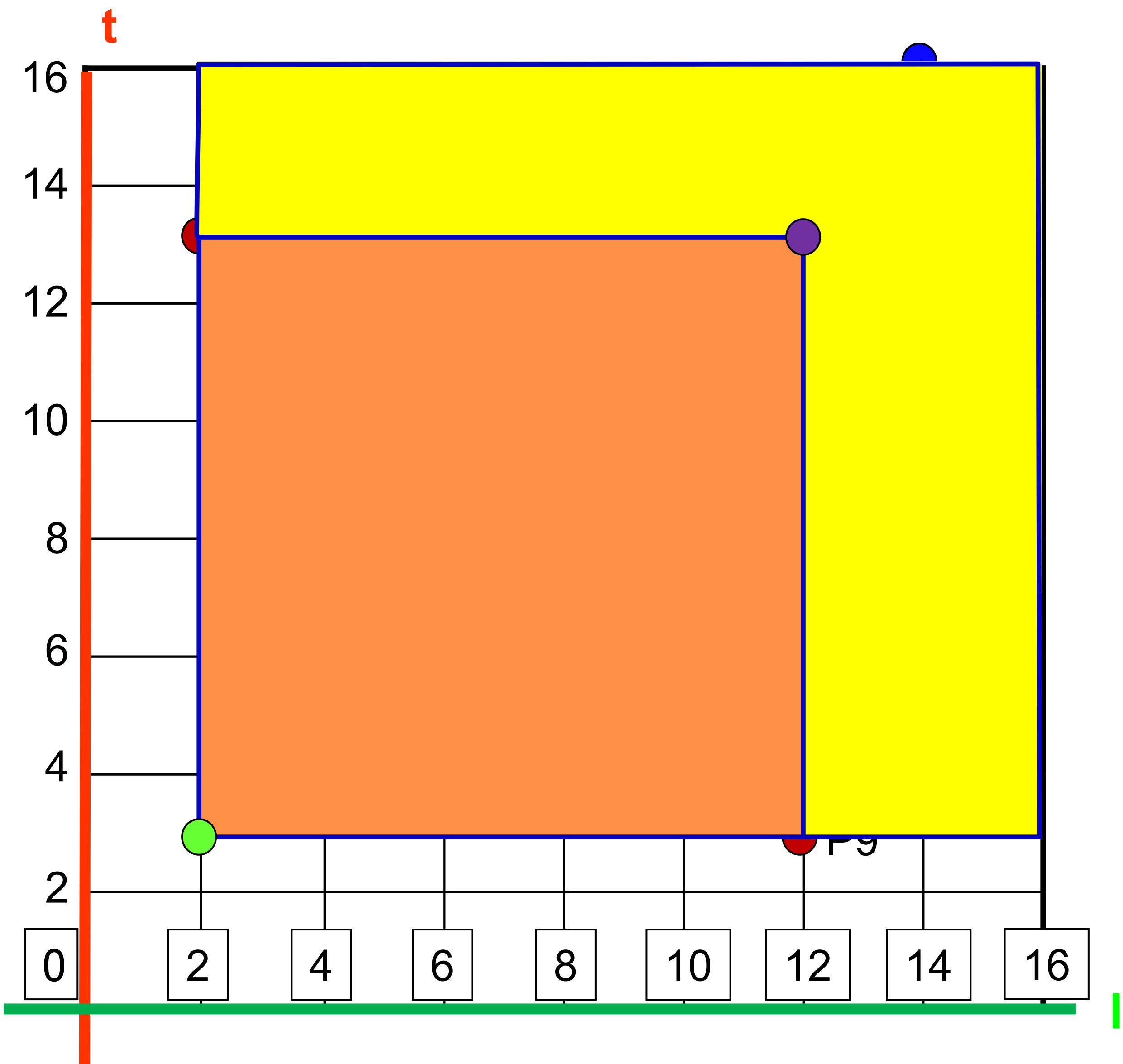
"Eine Gesellschaft ist in einem optimalen Zustand, wenn keines ihrer Mitglieder seine Umstände verbessern kann ohne dass sich die Umstände für ein anderes Mitglied verschlechtern."

Das mehrkriterielle Kürzeste-Wege-Problem



Weg	Knoten	l	t
P1	ABCDE	14	15
P2	ABCE	8	11
P3	ABE	2	13
P4	ACBE	3	12
P5	ACDE	10	10
P6	ACE	4	6
P7	ADCBE	8	12
P8	ADCE	9	6
P9	ADE	12	3

Die Pareto-Menge der effizienten Lösungen



Pareto-Punkt (nicht dominiert, nicht gestützt), effizient

Pareto-Punkt (nicht dominiert, gestützt) effizient

dominiert, ineffizient

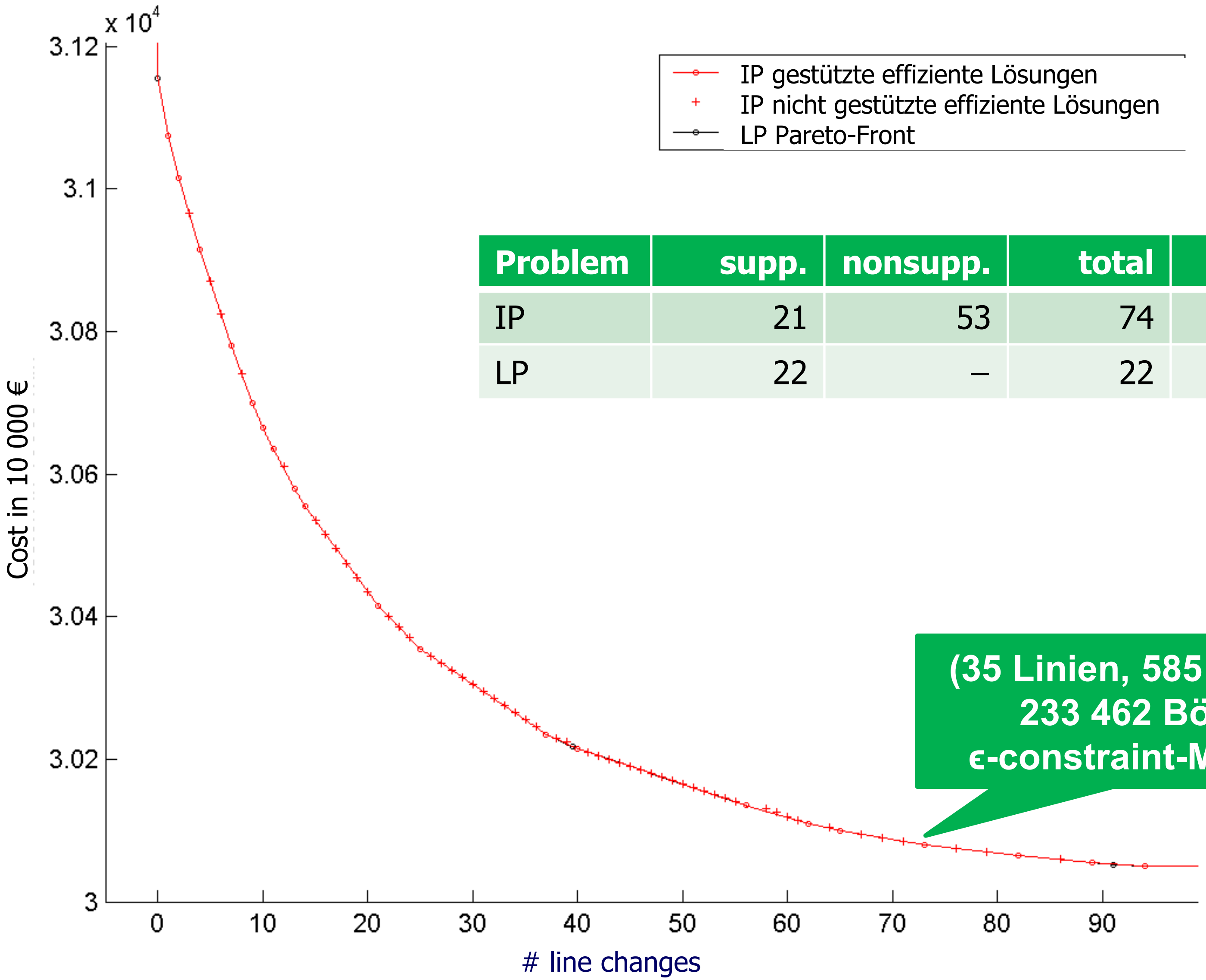
dom(P1,…,P9) Dominante der konvexen Hülle der gestützten Pareto-Punkte

Nadirpunkt

Idealpunkt

Was ist ein guter Umlaufplan?

Freie Universität Berlin



Problem	supp.	nonsupp.	total	cpusec
IP	21	53	74	30 543
LP	22	–	22	5 875

(35 Linien, 585 Fahrten, 233 462 Bögen, ϵ-constraint-Methode

Lufthansa Systems - Overview

Folie von Lufthansa Systems AG

Corporate functions / Infrastructure

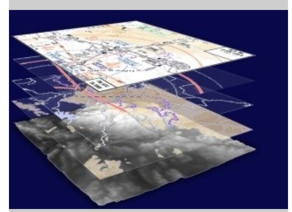
LH Group Airline Solutions	Airline Solutions	Industry Solutions

Flight Planning

- Lido Flight
- Lido R
- L
- e

Flugplanung

Navigation



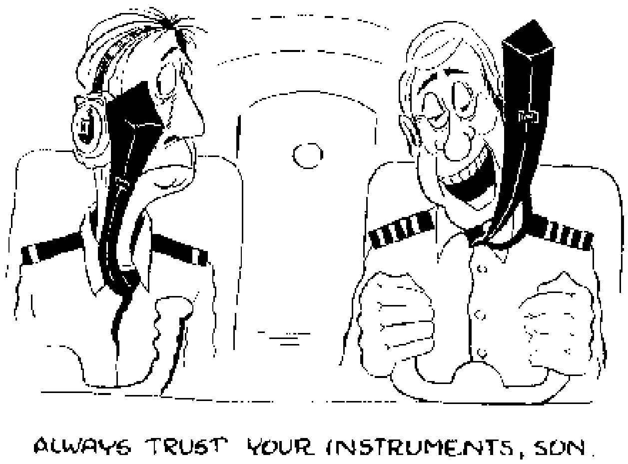
- Lido RouteManual
- Lido eRouteManual
- Lido FMS

EFB

- Lido eFlightBag
- Electronic Flight Bag Class 1-3

Lufthansa Systems

First and only lesson about IFR aviation and flight planning



- **The shortest connection between two points on earth is the „great circle“,**

  but: **Aircrafts never fly the great circle**

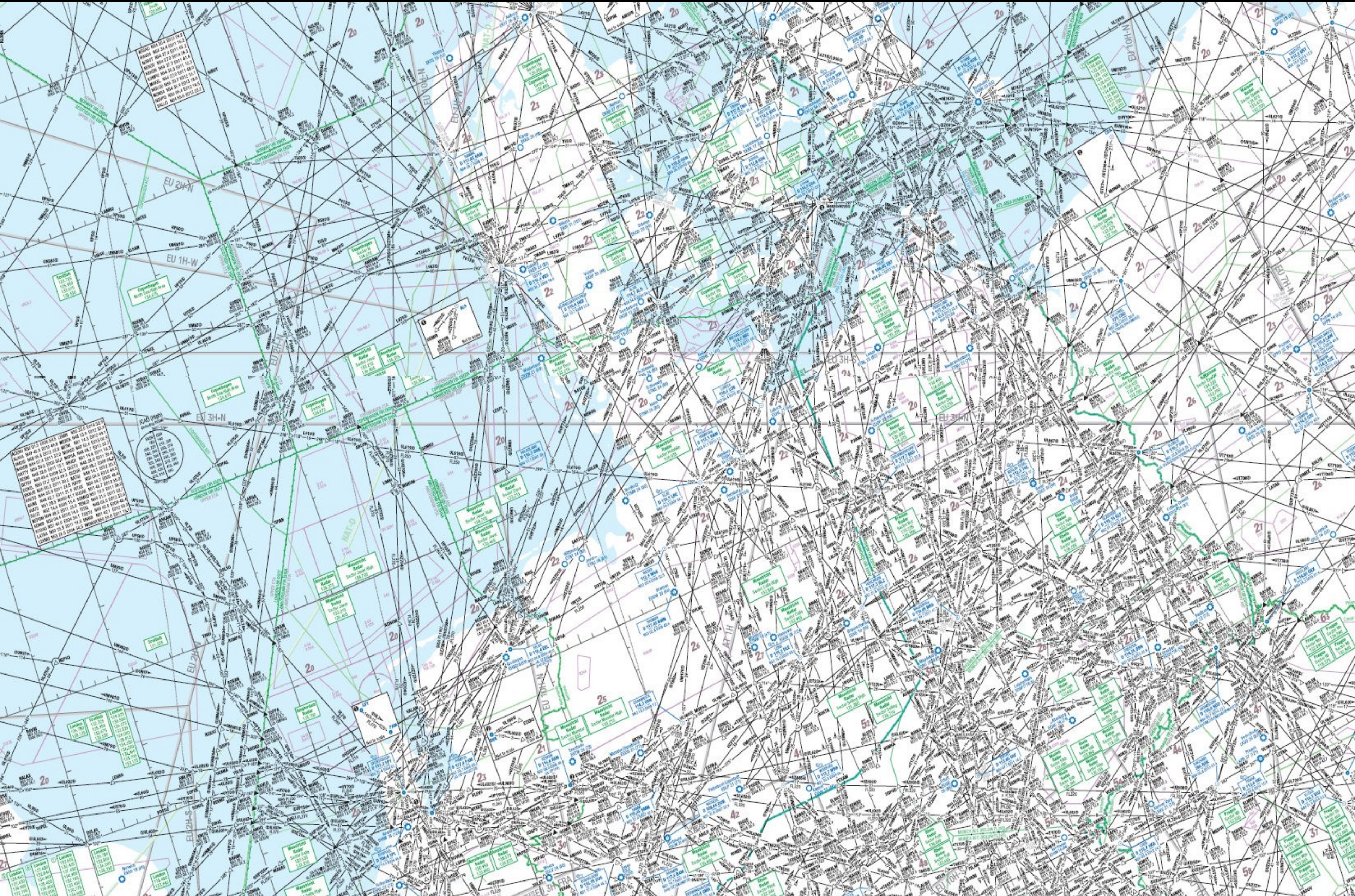
  because: **They have to stay on airways (except Freeflight), and it might be beneficial to fly detours because of winds, restrictions and expensive airspaces.**

- **Aircrafts never fill up their tanks like we do in our cars**

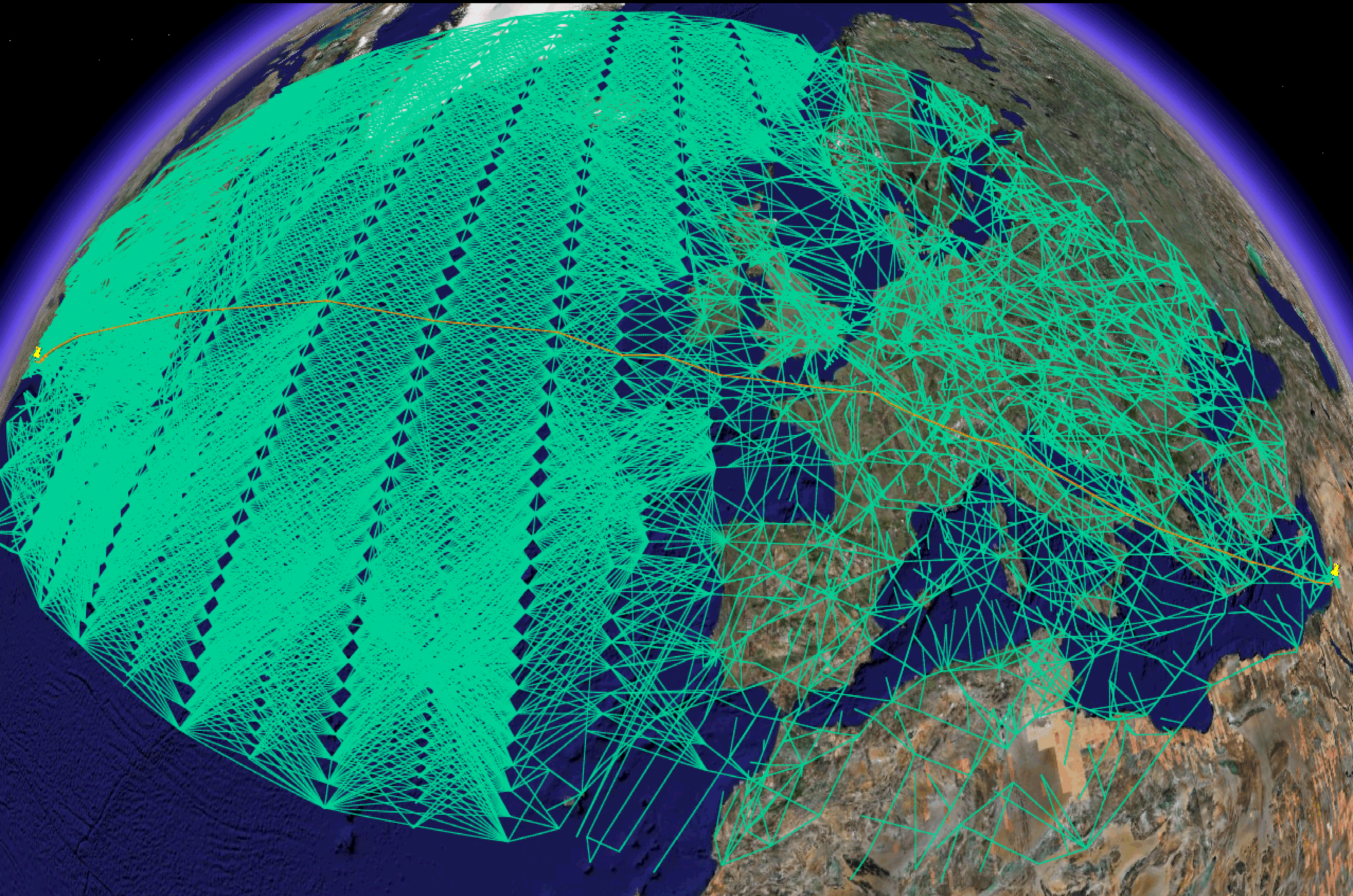
  because: **superflous fuel is weight and weight is burning fuel.**
  Rule of thumb: 3% per hour is burned for extra weight

so predicting the required fuel as accurate as possible is the number one job for us
(and thats the only thing flight planning systems are measured)

Wie fliegen Flugzeuge? Im Luftwegenetz.

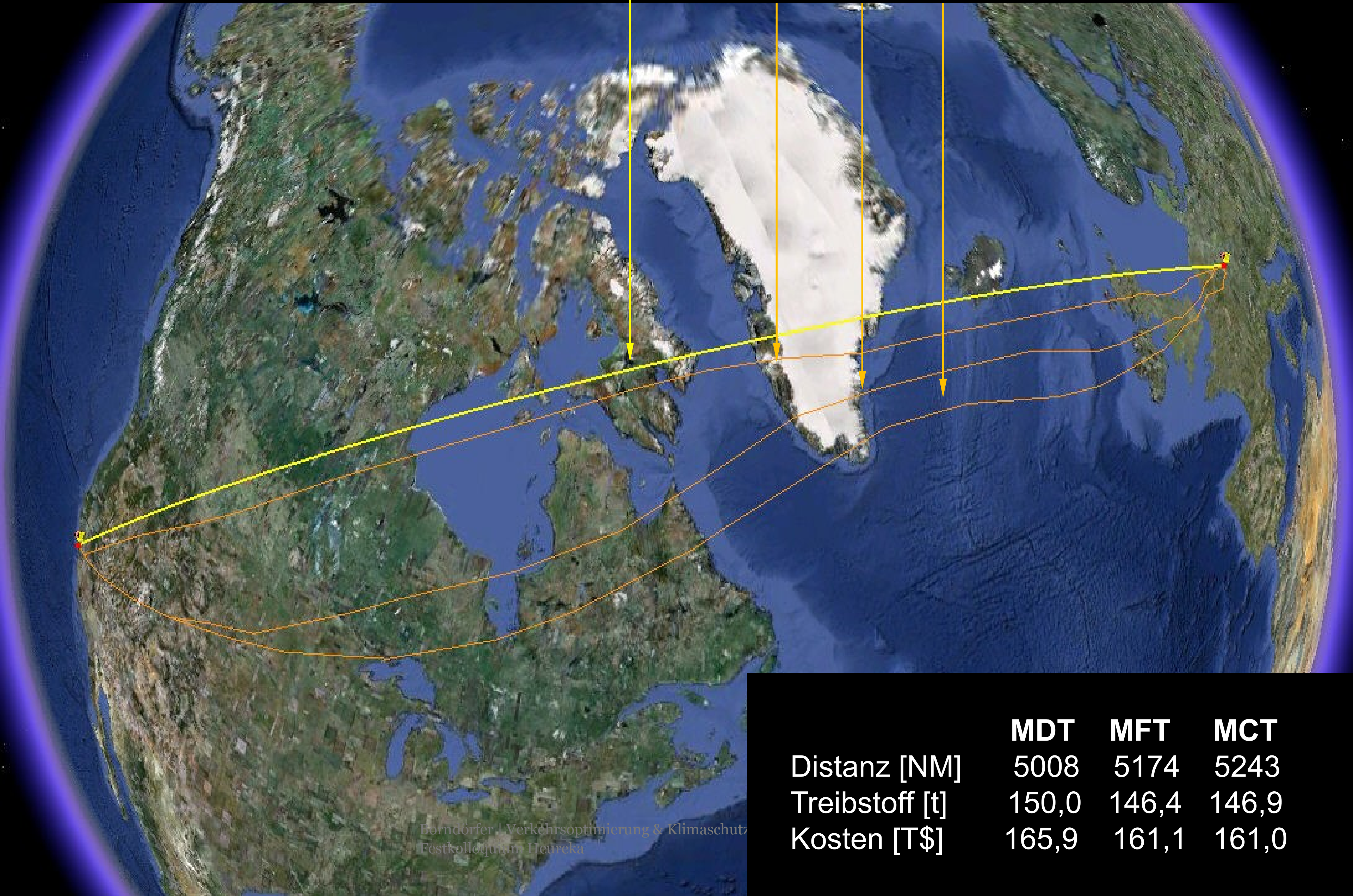


Wie fliegen Flugzeuge? Im Luftwegenetz.



Frankfurt – San Francisco : Großkreis, MDT, MFT, MCT

LH A380 (27SEP11, CI50, 60t Zuladung)



	MDT	MFT	MCT
Distanz [NM]	5008	5174	5243
Treibstoff [t]	150,0	146,4	146,9
Kosten [T$]	165,9	161,1	161,0

1. Route Availability Document

Updated on 12/12/13
Valid from 06/02/14

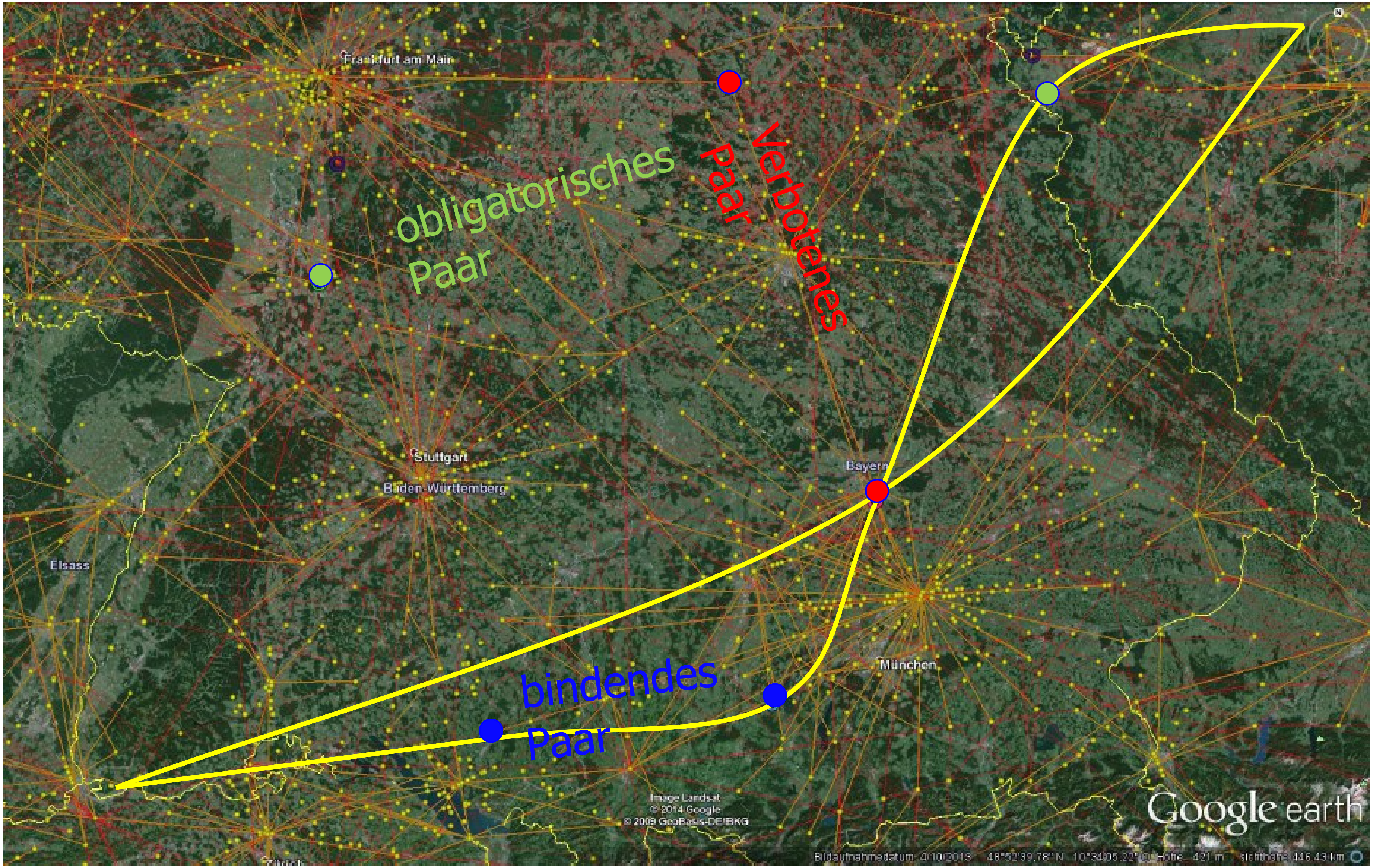
ROUTE RESTRICTIONS THROUGH GERMANY - ED

ANNEX ED
Page 1 of 92

AIRWAY	FROM - TO	RESTRICTION	ID No.	OPERATIONAL GOAL
	ABLOX	Not available for traffic DEP EDAB Except with ARR EDDB/DT, Havel Group	ED2567	SID requirement
		Not available for traffic DEP EDDM Except 1. ARR EDJA Below FL095 2. Type Jet	ED2894	SID requirement for EDDM departures
		Only available and compulsory for traffic DEP EDDM Via MILKA above FL245 1. Daily 22.30 (21.30) - 07.00 (06.00) 2. FRI 16.00 (15.00) - MON 07.00 (06.00) 3. During legal holidays	ED2895	SID requirement for EDDM departures Outside these times file SID MERSI Y110.
	BIBAG	Not available for traffic DEP EDDM Via L/UL605/Q104/Q118	ED3147	SID requirement
		With ARR Farnborough Group, London Group	EDYY1010	SID requirement Time refers to departure time EDDF.
	BODLA/ERGON/GOVEN	Compulsory for traffic DEP/Overflying EPWWFIR/UIR With ARR EDDB/DT	ED2876	To force traffic onto arrivals routes
	COL	Not available for traffic DEP EDDK Except 1. ARR Frankfurt Group, Frankfurt Y/Z Group 2. Training Flights	ED2576	SID requirement

- Bei Start von EDDF darf BIBTI nicht durchflogen werden:
  EDDF $\in$ P $\Rightarrow$ BIBTI $\notin$ P (einfach, weil Abflugort bekannt ist)
- Nach Flug durch MILKA muss ALG durchflogen werden:
  MILKA $\in$ P $\Rightarrow$ ALG $\in$ P (schwer, weil Route nicht bekannt ist)

Verkehrsregeln im Luftraum



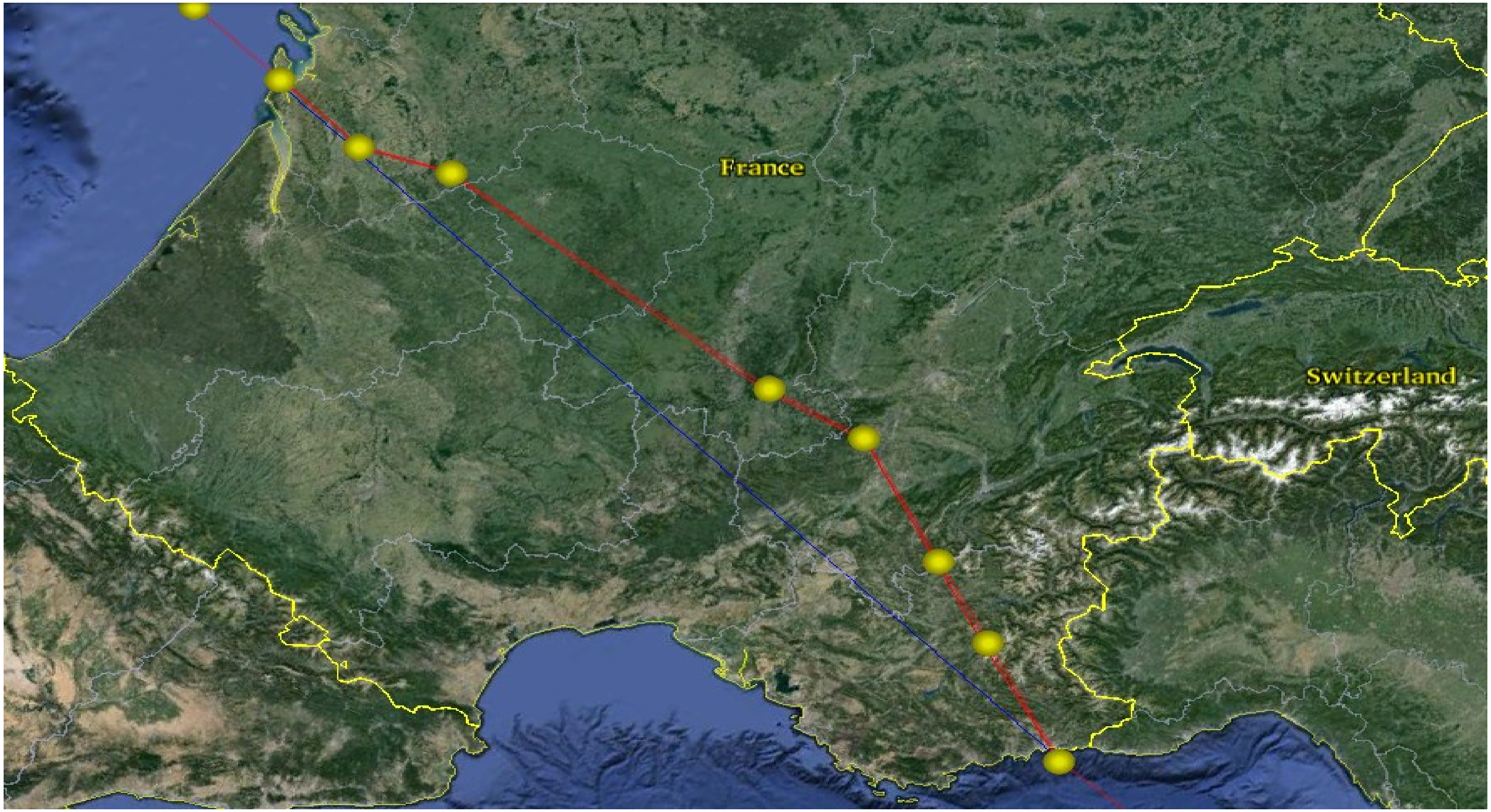
EUROCONTROL

Adjusted unit rates applicable to April 2014 flights

Please find hereunder the unit rates of route charges applicable to April 2014 flights, as well as the exchange rates used for their calculation, i.e. the average exchange rates for the month of March 2014 (monthly average of the "Closing Cross Rate" calculated by Reuters based on daily BID rate).

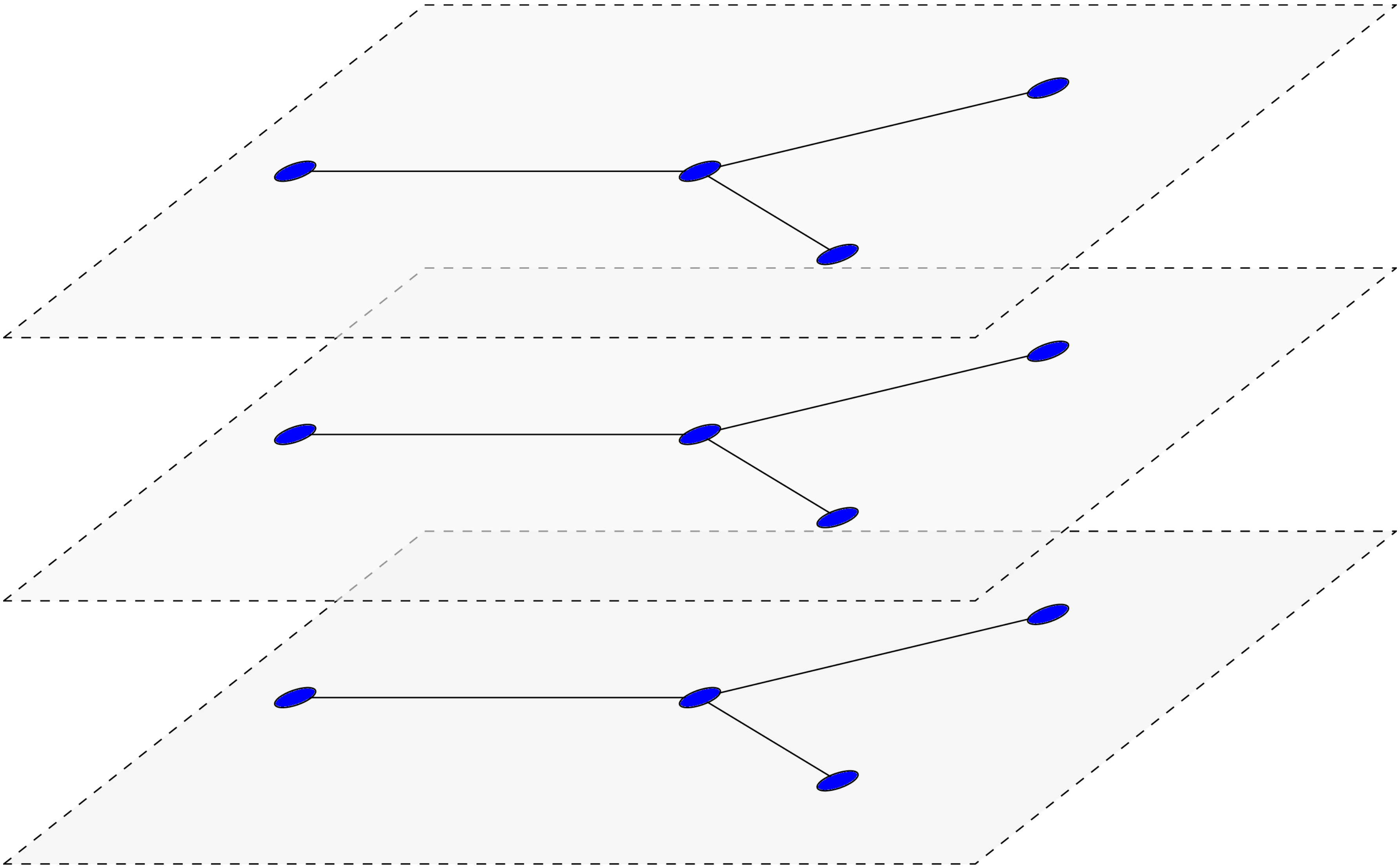
Zone	Taux unitaire Unit rate EUR	Taux de change Exchange rate 1 EUR =		
Portugal Santa Maria *	**10.60**	./.		
Belg.-Luxembourg *	**72.19**	./.		
Allemagne / Germany *	**77.47**	./.		
Finlande / Finland *	**52.21**	./.		
Royaume-Uni / United Kingdom	**84.85**	0.831957		GBP
Pays-Bas / Netherlands *	**66.62**	./.		
Irlande / Ireland *	**30.77**	./.		
Danemark / Denmark	**71.35**	7.46207		DKK
Norvège / Norway	**51.96**	8.29105		NOK
Pologne / Poland	**35.26**	4.19932		PLN
Suède / Sweden	**72.25**	8.86081		SEK
Lettonie / Latvia *	**28.59**	0.702804	***	LVL
Lituanie / Lithuania	**45.92**	3.45158		LTL
Espagne / Spain - Canarias *	**58.51**	./.		

Was kostet der Überflug?

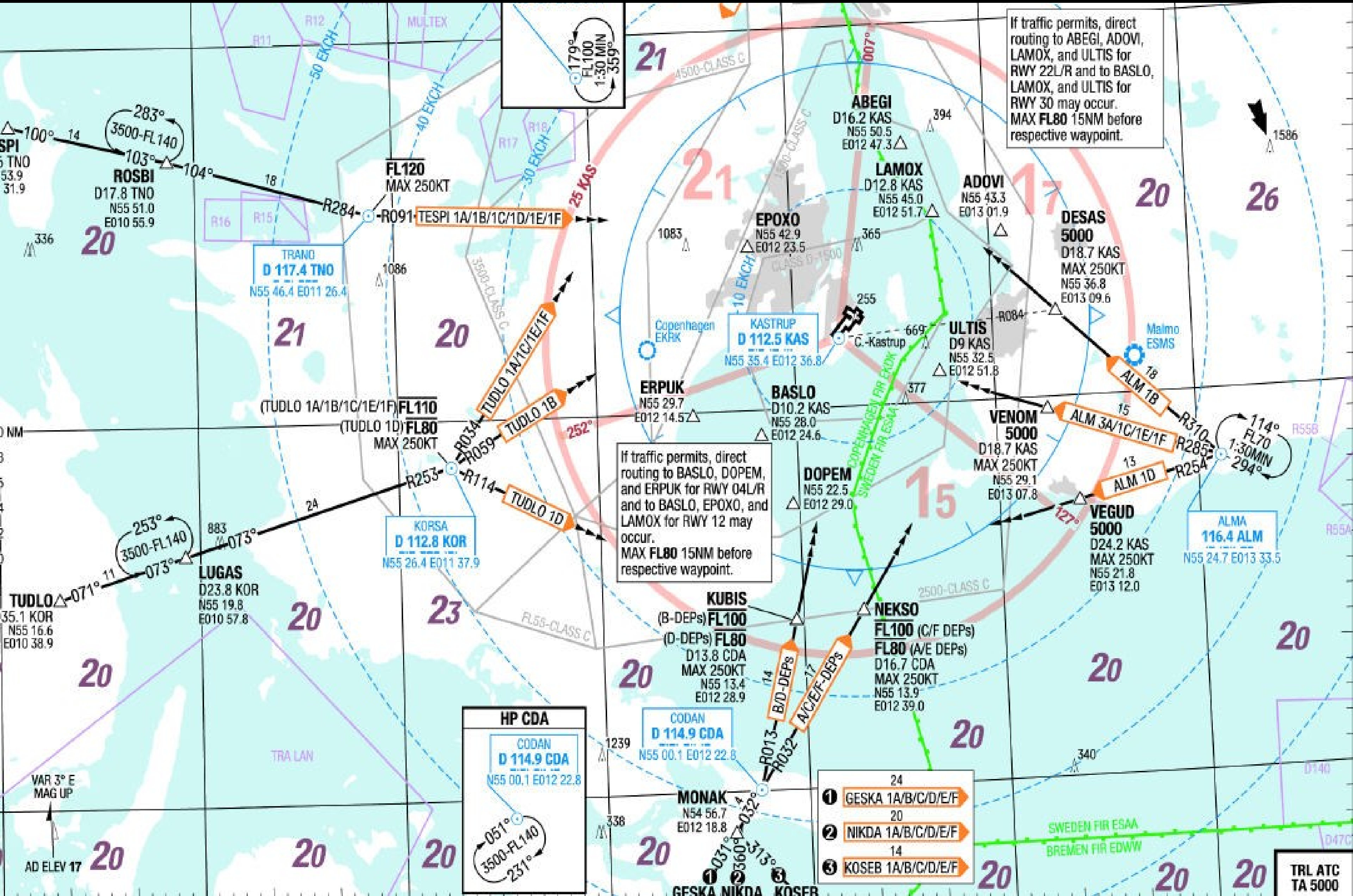


- Kosten pro überflogenen km: einfach
- Kosten pro km im Großkreissegment durch Ein- und Ausflugpunkt: schwer

3. Kürzeste Wege in 3D

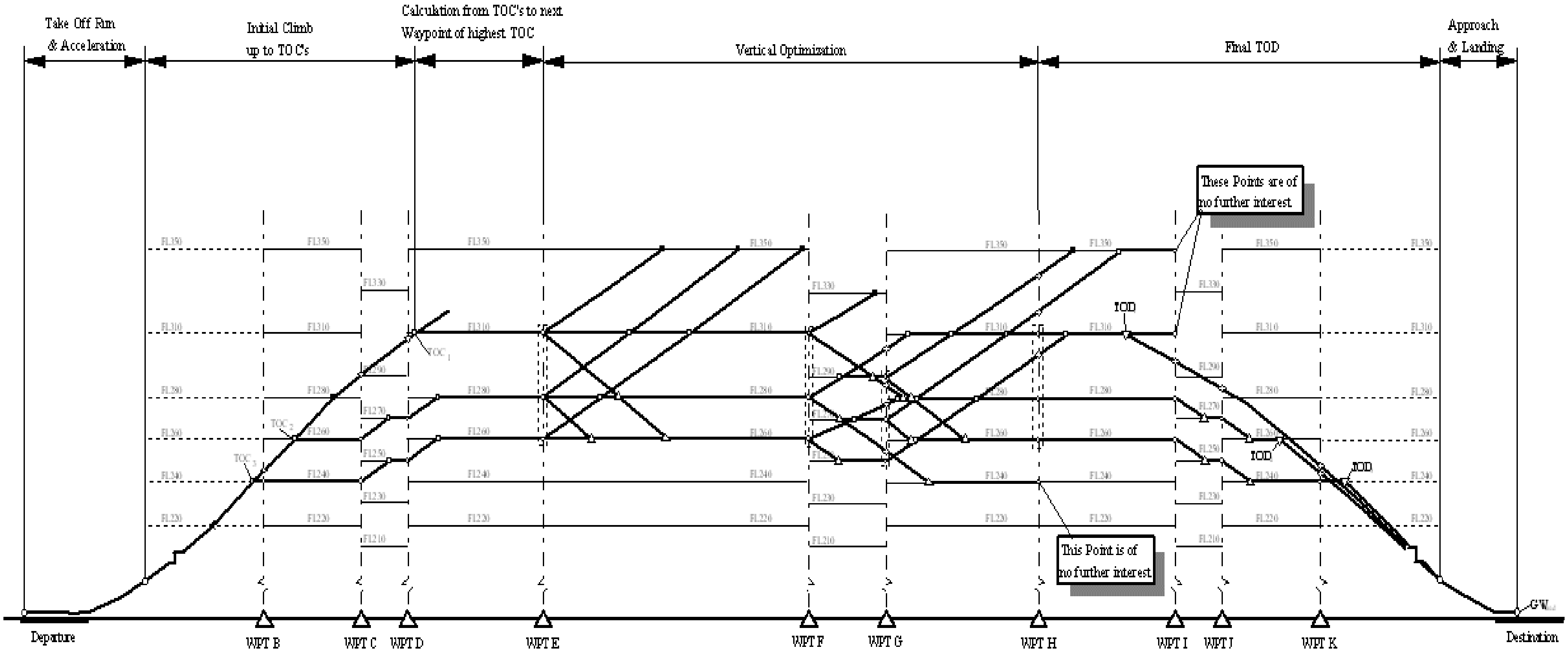


2D ist einfach …



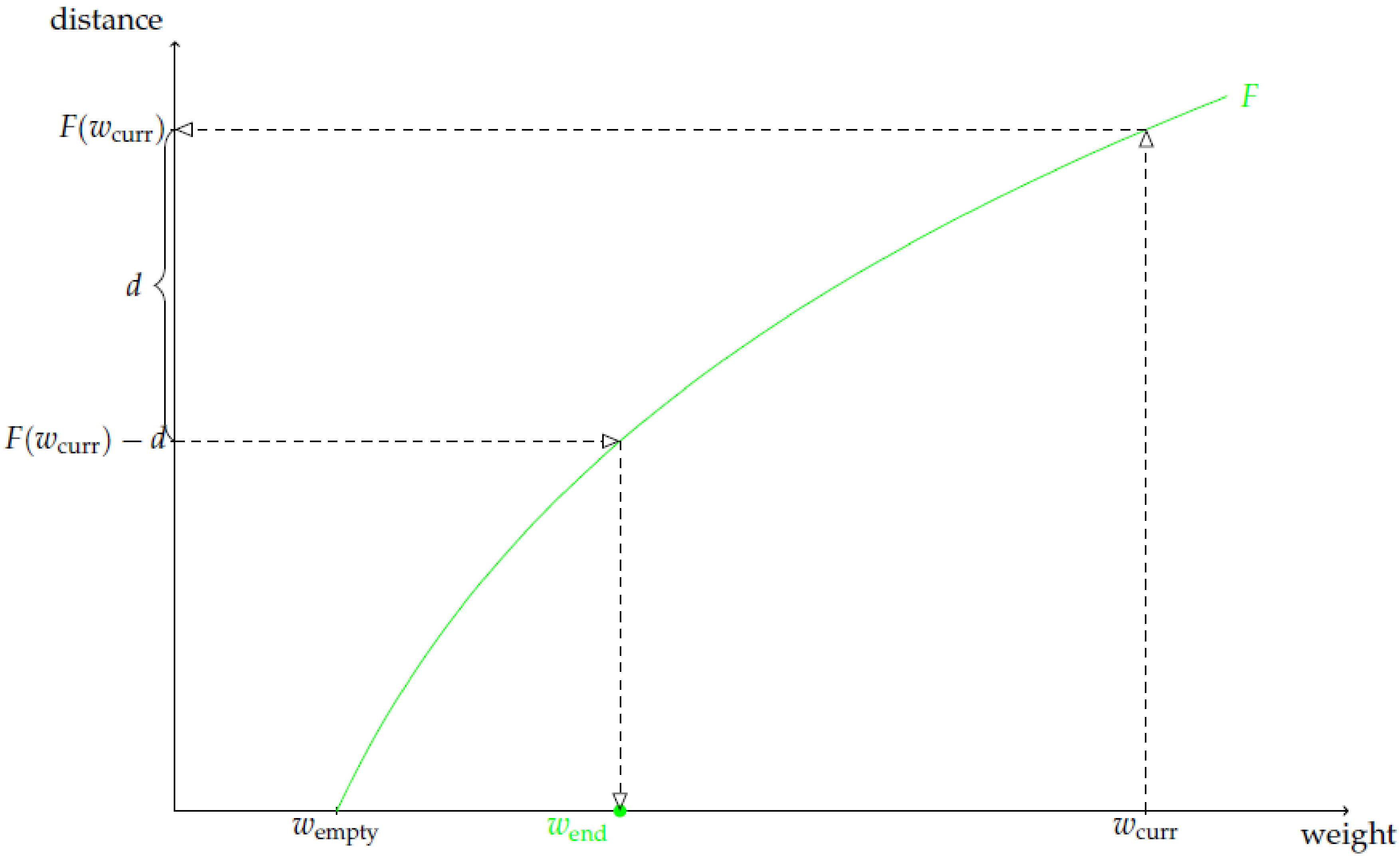
… aber 3D ist schwer

Folie von Lufthansa Systems AG



Lufthansa Systems

4. Wie berechnet man den Treibstoffverbrauch?



Welche Einsparungen kann man erwarten ?

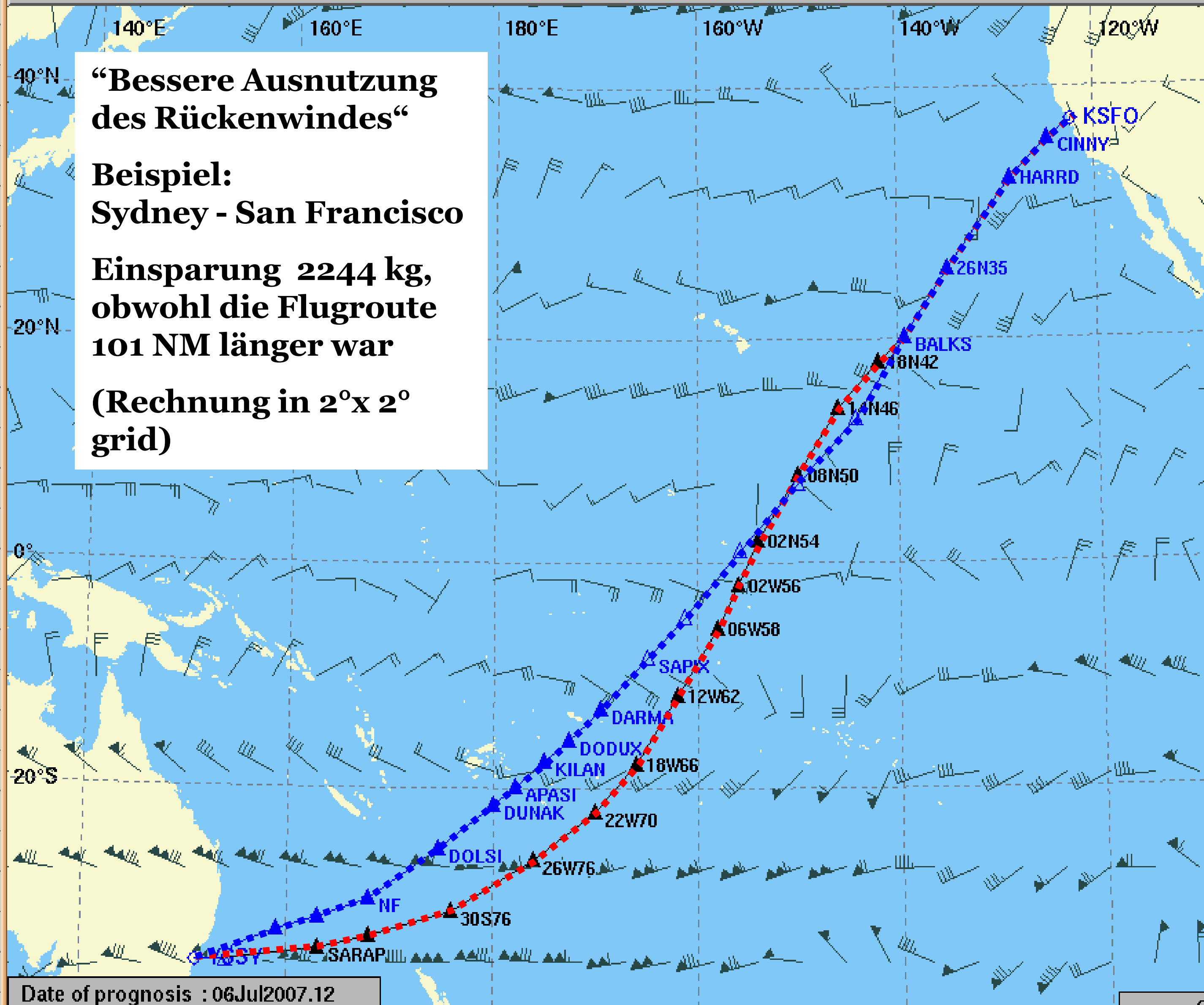
OFP NO	1	2
REG	QF744RR	QF744RR
CRUISE	860/340	860/340
TAXI	736	736
TRIP	127240	129484
TTIME	1234	1244
ETA	0050	0100
COSTS	50109	50855
ALTN		
D FUEL		
S HOLD		
ARR ALL		
VFR	4000	4000
FFR	3560	3560
CONT		
ADDFU		
INTANKS	135536	137780
P EXTRA	35412C	33168C
DIST	6719	6618
AVG WC	P043	P027
EST ZFW	218400	218400
PLN ZFW	218400	218400
MALTOW	394625	394625
PLNTOW	353200	355444
MALLGW	285763	285763
PLNLGW	225960	225960

“Bessere Ausnutzung des Rückenwindes“

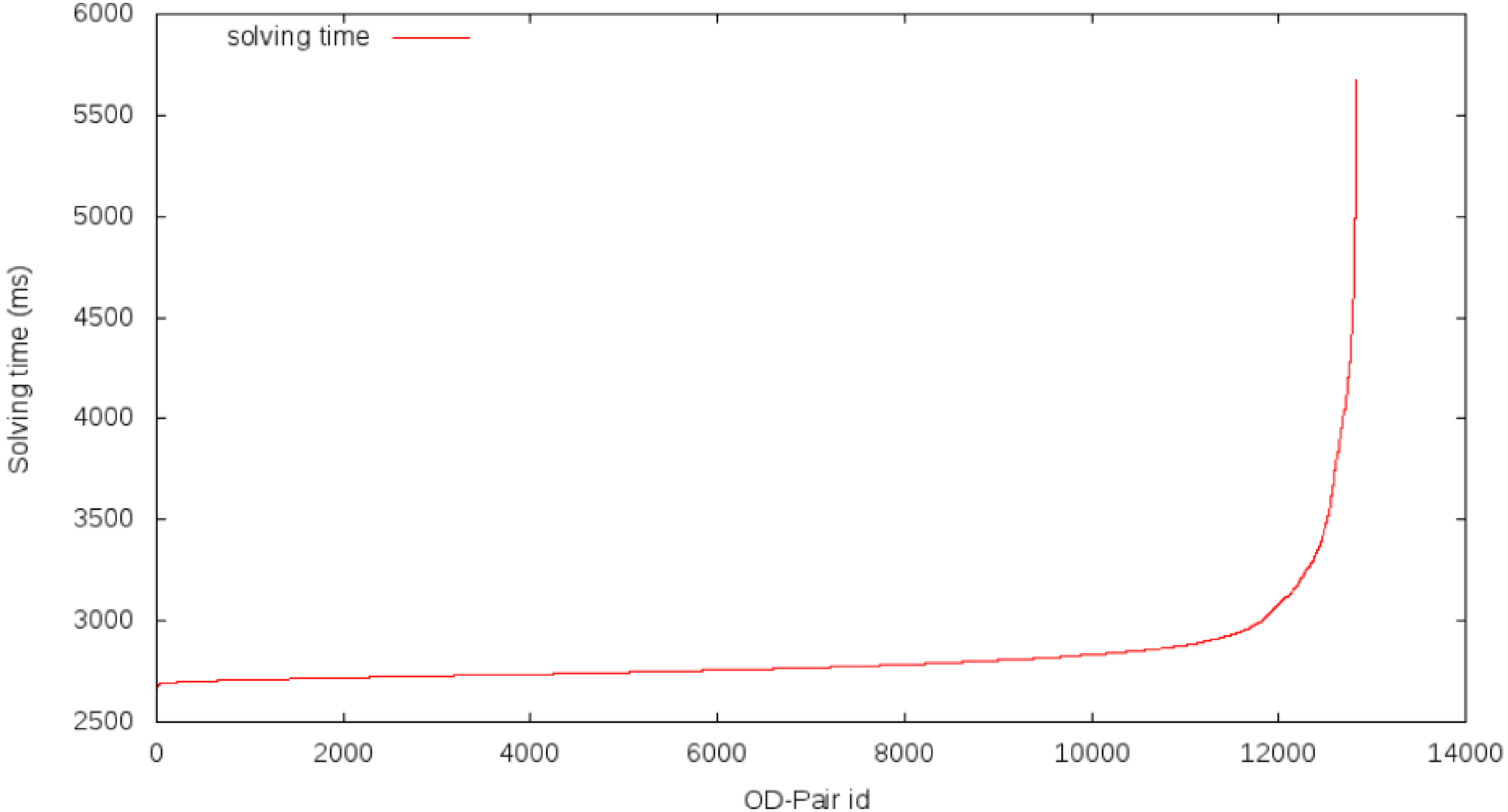
Beispiel:
Sydney - San Francisco

Einsparung 2244 kg, obwohl die Flugroute 101 NM länger war

(Rechnung in 2°x 2° grid)



Wie aufwändig ist die Rechnung?

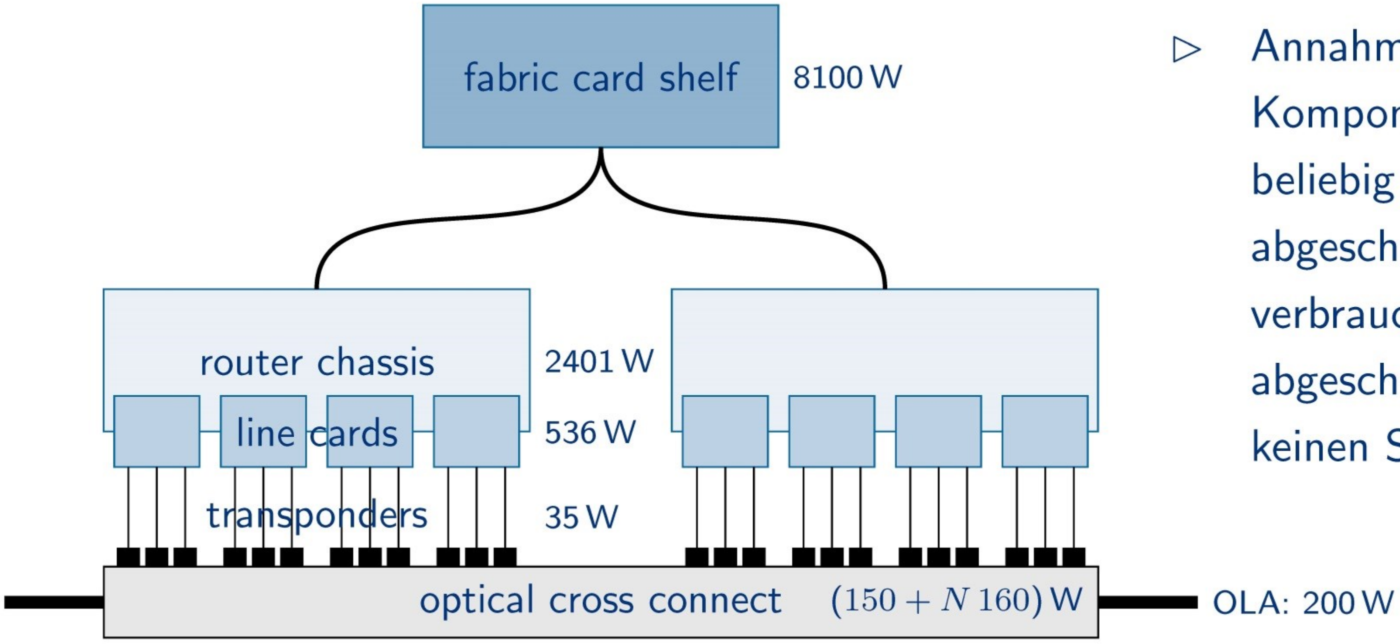


12915 OD-Paare, A380, Geschwindigkeit 0.83MN/300KIAS, konstante Flughöhe FL300, Abflugzeit 06.03.2014, 19:30:25

Behindern sich Flugzeuge nicht gegenseitig?

Horizon 2020: SESAR

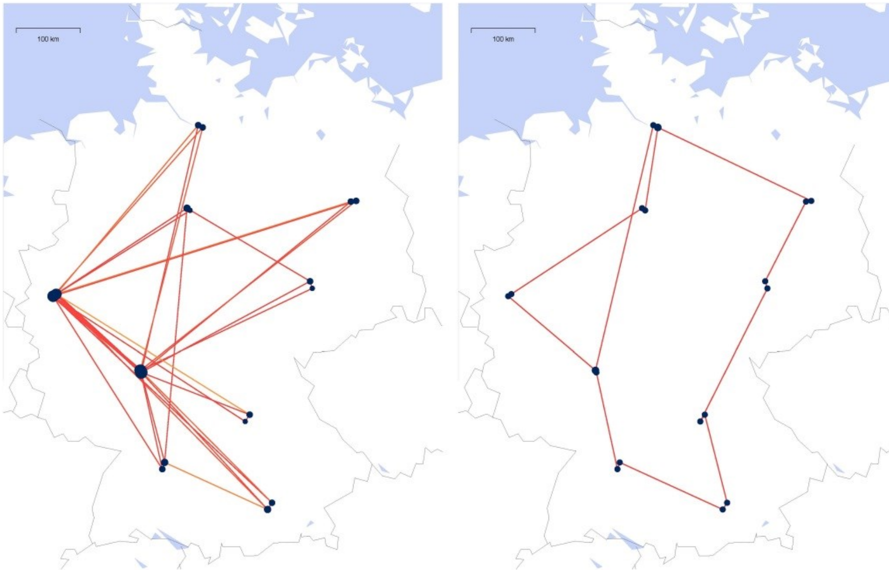
- Wie groß sind Energieverbrauch und Energieeinsparungspotential durch dynamisches Routing in modernen Festnetzen?
- Energieverbrauchsmodell Hardwarekomponenten (Van Heddeghem et al, 2012)

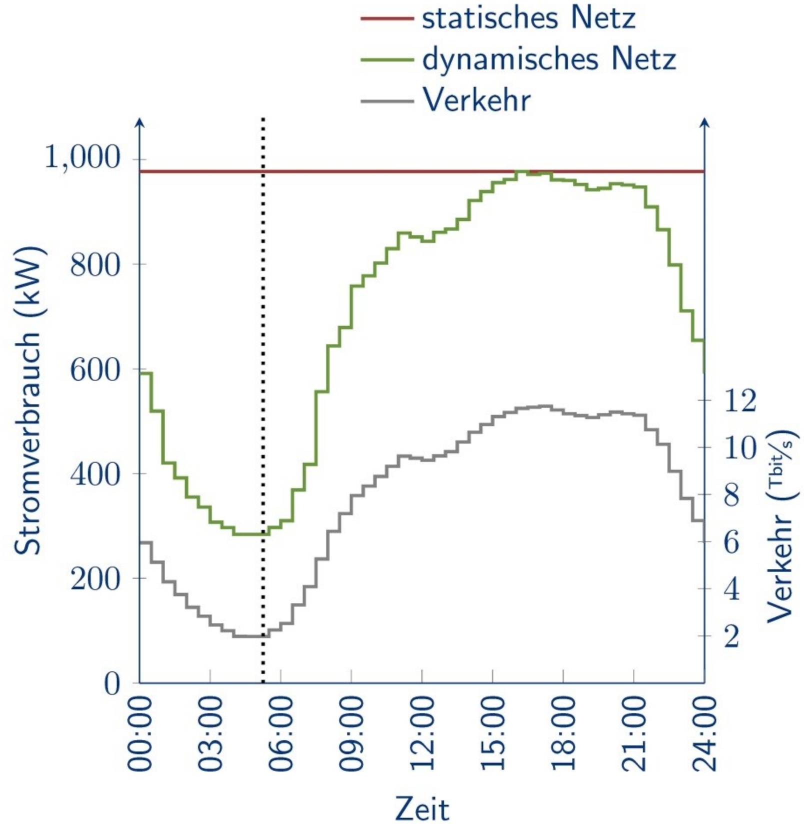


- Annahme: Alle Komponenten können beliebig an- und abgeschaltet werden und verbrauchen im abgeschalteten Zustand keinen Strom

ZIB
DESI Durchgängig Energiesensible IKT-Produktion
IT2Green.de
Gefördert durch:
Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Ergebnisse deutschlandweites Backbone-Netz





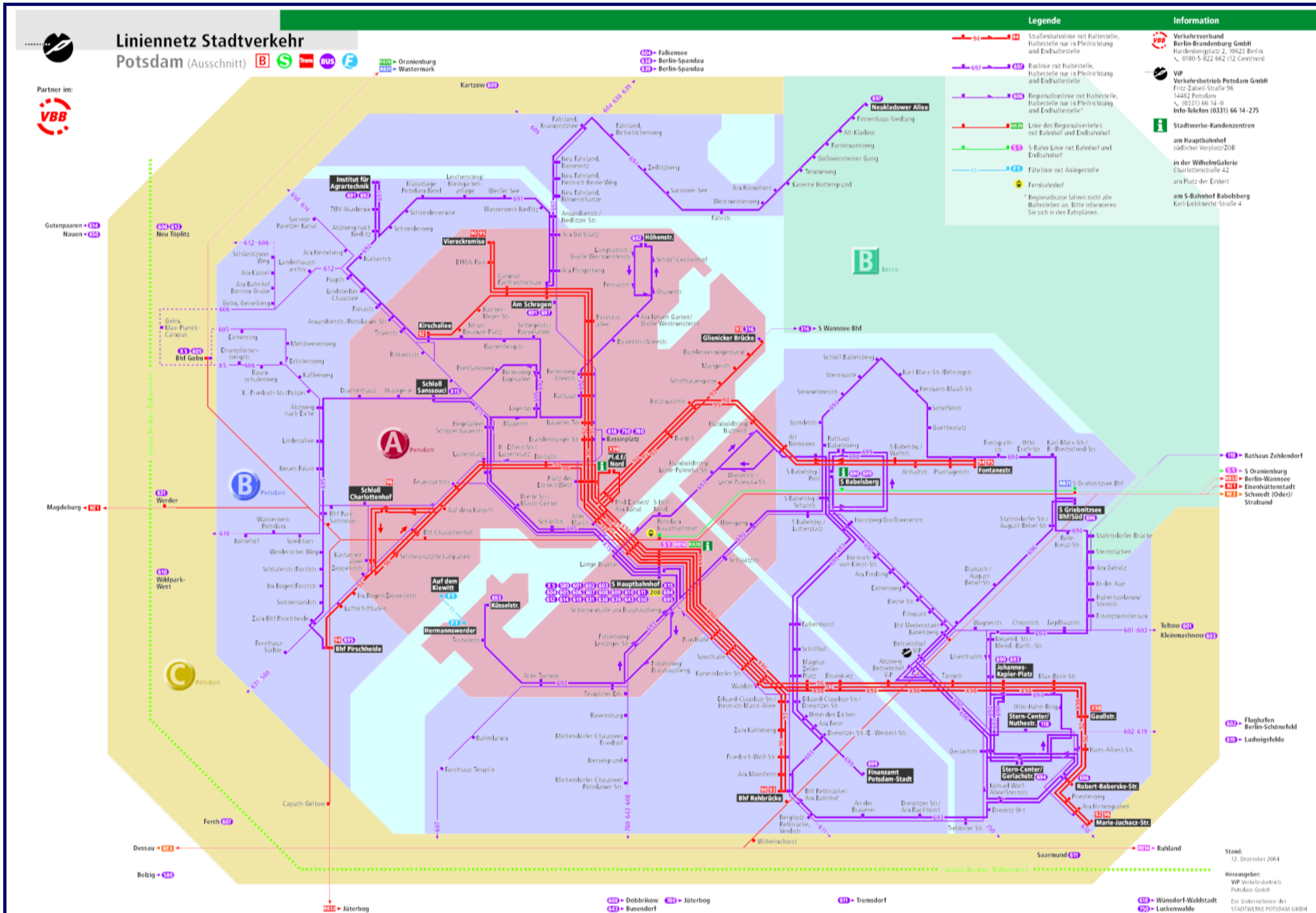
Energieverbrauch (Tag)

Gesamtstromverbrauch

statisches Netz:	977 kW	23.4 MWh
dynamisches Netz:	284–977 kW	17.0 MWh (Einsparung ca. 27.6%)

ZIB
DESI Durchgängig Energiesensible IKT-Produktion
IT2Green.de
Gefördert durch: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Wie prognostiziert man menschliches Verhalten?



Wie prognostiziert man menschliches Verhalten?

Weitere Fahrausweise erhalten Sie in unseren Bussen und Straßenbahnen an den Automaten im ersten Wagenzug.

Tarif ab 1.4.2004 für Potsdam und Umland (ohne Stadt Berlin)

Tarifbereich		AB BC EUR	EUR	ABC EUR
Bartarif				
Einzelfahrausweis				
Kurzstrecke Potsdam	Regeltarif		1,00	
(6 Haltestellen, Fähre)	Ermäßigungstarif*		0,80	
Einzelfahrt (60 Minuten)	Regeltarif	1,40		2,20
	Ermäßigungstarif*	1,10		1,70
Tageskarte				
Karte für 1 Person	Regeltarif	3,20		5,00
	Ermäßigungstarif*	2,40		3,80
Kleingruppenkarte	(bis max. 5 Personen)	8,10		13,00
Schülergruppenkarte	(ab 10 Pers./Preis p. P./ bis Klassenst. 8)	1,60		2,50
Anschlussfahrausweis (60 Minuten) (Ergänzung für fehlenden Tarifbereich)			1,10	

Tarif ab 1.4.2004 für Berlin und Umland (mit Stadt Potsdam)

Tarifbereich		AB EUR	BC EUR	ABC EUR
Bartarif				
Einzelfahrausweis				
Kurzstrecke Berlin	Regeltarif		1,20	
	Ermäßigungstarif*		1,00	
Einzelfahrt (120 Minuten)	Regeltarif	2,00	2,25	2,60
	Ermäßigungstarif*	1,40	1,55	1,90
Tageskarte				
Karte für 1 Person	Regeltarif	5,60	5,70	6,00
	Ermäßigungstarif*	4,20	4,30	4,50
Kleingruppenkarte	(bis max. 5 Personen)	14,00	14,30	15,00
Schülergruppenkarte	(ab 10 Pers./Preis p. P./bis Klassenst. 8)	2,20		3,30
Anschlussfahrausweis (120 Minuten)			1,30	

Für Potsdam und die anderen kreisfreien Städte sowie Berlin sind spezifische Tarifbereiche definiert, die sich in unterschiedliche Teilbereiche A, B und C gliedern.

Für Potsdam: A engeres Stadtgebiet — B übriges Stadtgebiet[1] — C Umland-Gebiet

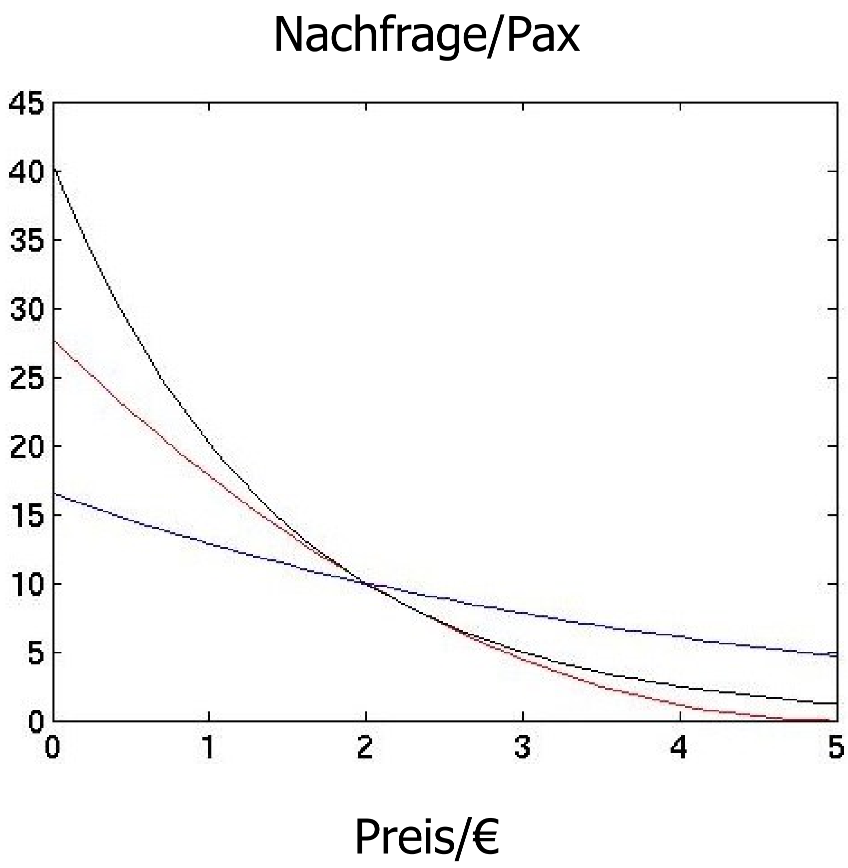
Für Berlin: A City-Bereich Berlin einschl. innerer S-Bahnring — B übriges Stadtgebiet — C Berlin Umland-Gebiet Berlin einschl. Stadt Potsdam bis ca. 15 km ab Stadtgrenze

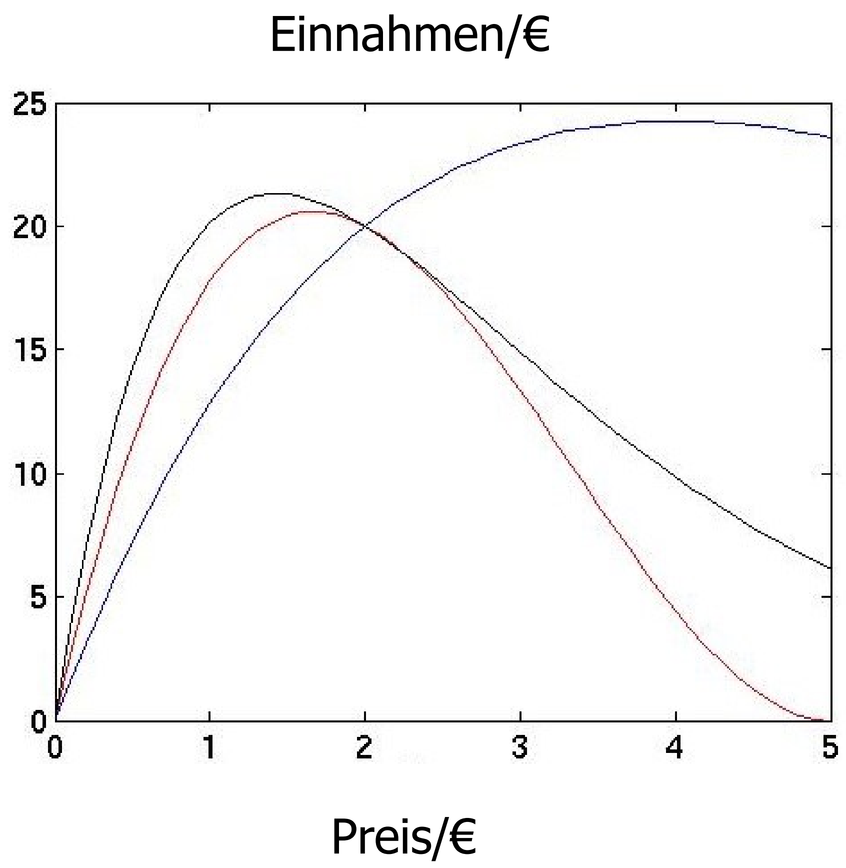
[1] außer Ortsteile Groß Glienicke, Marquardt, Satzkorn, Fahrland, Neu Fahrland, Paaren, Uetz und Golm

Preis – Nachfrage – Einnahmen

Nachfrage $d = d(x)$

Einnahmen $r(x) = d(x) \cdot x$





Beispiele für Preise und Ticketarten

Preise

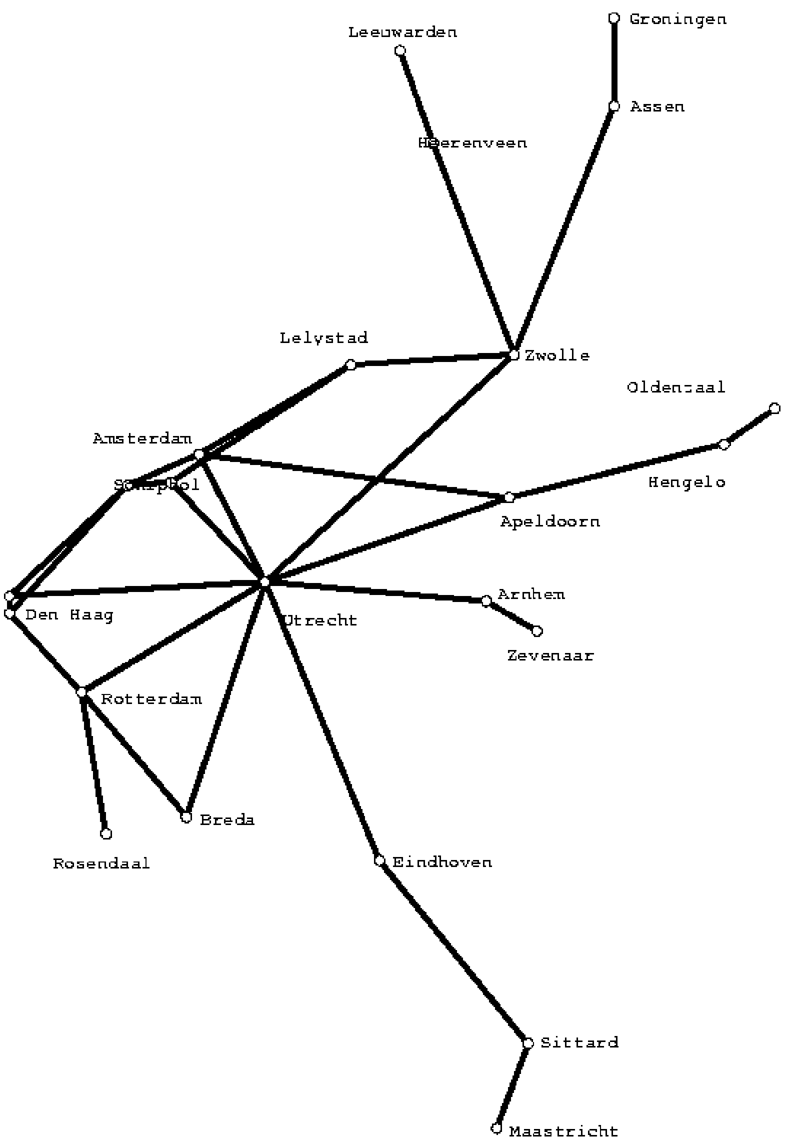
- $p^i_{st}(x) = \text{const}$ Einheitspreis
- $p^i_{st}(x) = z_{st} \cdot x^i$ Zonenpreis: z_{st} Zonenpreis x^i
- $p^i_{st}(x) = x^i_0 + x^i_k \cdot l_{st}$ Entfernungspreis: Grundpreis x^i_0 und km-Preis x^i_k

Bedingungen

- $p^i_{st}(x) = p^i_{uv}(x)$ Gleiche Preise
- $p^i_{st}(x) \geq p^i_{uv}(x)$ Monotonie $l_{st} \geq l_{uv}$
- $p^i_{st}(x) \leq u$ obere Schranken

Beispiel: Das holländische ICE-Netz

(Bussieck [1998], Bussieck, Kreuzer, Zimmermann [1996], Claessens, van Dijk, Zwaneveld [1998])



Die Nachfragematrix

(Bussieck [1998], Bussieck, Kreuzer, Zimmermann [1996], Claessens, van Dijk, Zwaneveld [1998])

	Hr	Asn	Zl	Hgl	Ah	Ut	Shl	Asdz	Asd	Gv	Gvc	Rtd	Bd	Ehv	Std	Mt	Lls	Rsdg	Zvg	Odzg
Lw	478		380		13	145	20	21	90	6	26	36	14	9	9	4	77	7	14	
Gn		1720	720			331	48	88	205	12	73	75	34	28	29	13	200	33	14	
Hr			511		11	209	20	16	115	10	48	58	16	11	8	4	77	10	19	
Asn			854		16	502	32	58	235	13	117	125	42	33	28	14	152	48	19	
Zl					56	1112	64	171	400	33	163	182	79	47	46	21	390	100	32	
Apd				468		1160	32	76	917	21	202	143	57	62	10	5		47	83	71
Hgl						422	11	24	287	20	81	52	39	28	20	12		24		75
Ah						4244	60	721	726	109	741	180	136	101			8	320	602	
Ut							278	5826	4919	225	3138	2260	1165	3109	720	359	89	325	996	21
Shl								1456	6469	1339	1503	509	7	99	44	29	103	164		
Asdz										461	207	369	138	542	203	149	819	6	155	
Asd										730	2540	1756	154	437	155	37	2783	2258	489	22
Gv											785	4586	531	35	22	8	29	890		
Gvc												2829	228	335	104	41	31	3	229	7
Rtd													1829	569	179	73	46	1077	157	11
Bd														950	157	79	6	329	14	5
Ehv															936	404	8	75	11	3
Std																863	2	19		
Mt																	1	22		
Lls																		15		

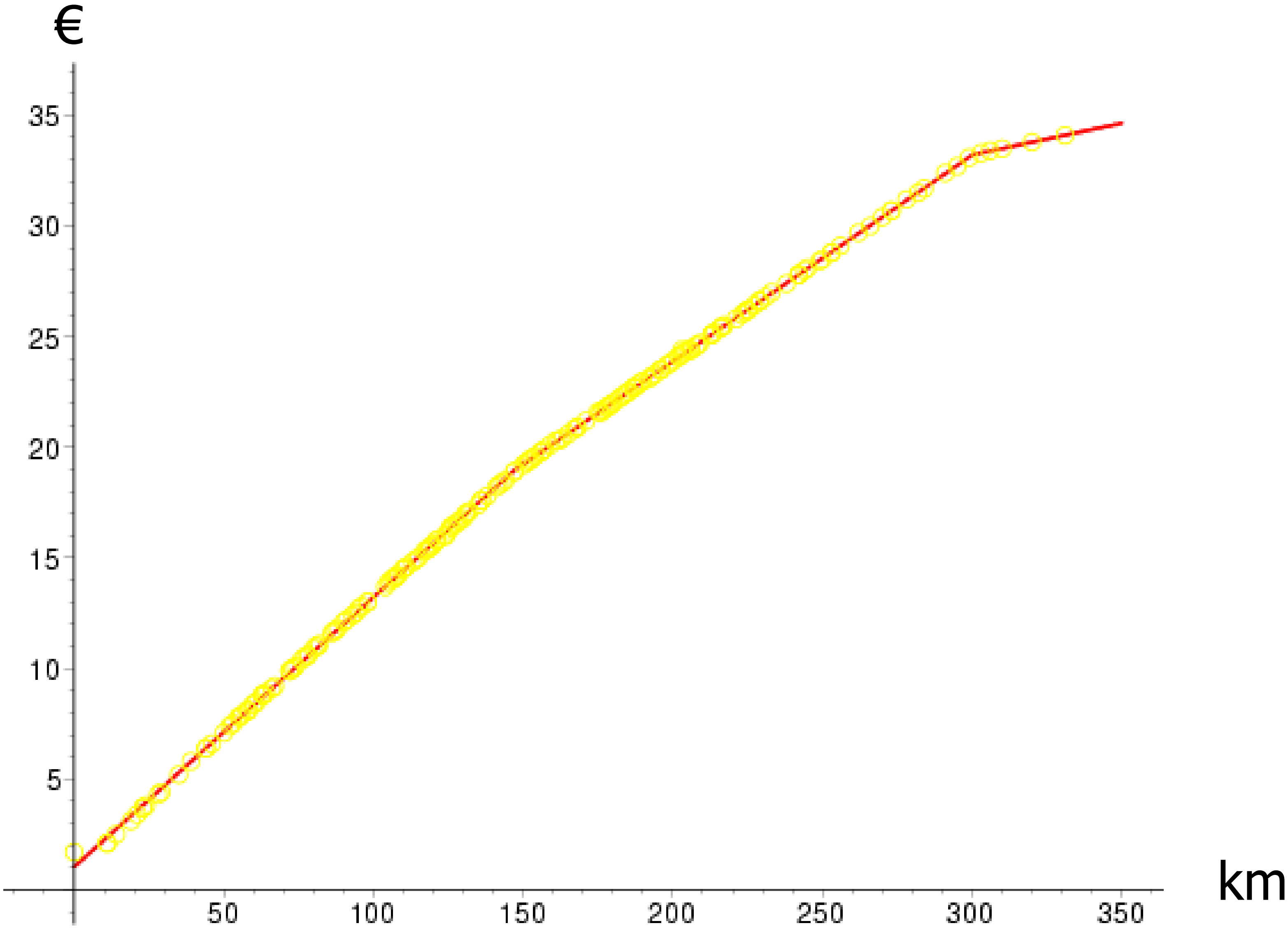
Die Reiseentfernungen

(Bussieck [1998], Bussieck, Kreuzer, Zimmermann [1996], Claessens, van Dijk, Zwaneveld [1998])

	Hr	Asn	Zl	Hgl	Ut	Shl	Asdz	Asd	Gv	Gvc	Rtd	Bd	Ehv	Std	Mt	Lls	Rsdg	Zvg	Odzg
Lw	29																		
Gn		28																	
Hr			66																
Asn			78																
Zl					85											50			
Apd				69	64			89											
Hgl																			18
Ah					58													19	
Ut							34	39		61	57	92	81						
Shl							9	19	43	43									
Asdz						9										56			
Asd																54			
Gv										1	23								
Rtd												49					18		
Ehv														78					
Std															21				

Die Preise

(www.ns.nl)



Wie schätzt man die Nachfrage?

Freie Universität Berlin

Discrete Choice Logit-Modell

A	Menge von Reisealternativen
T	Zeithorizont (hier: ein Monat)
$X_{st} \in \{1,...,n\}$	# Fahrten pro Monat (Zufallsvariable)
$C = A \times \{0,1,...,n\}$	Reisealternativen (hier: kein Mix)
$U^a_{st}(x,k) = V^a_{st}(x,k) + v^a_{st}$	Nutzen für Alt. a, Paar st, Preis x, k Fahrten
$V^a_{st}(x,k)$	Deterministischer Nutzen (beobachtbar)
v^a_{st}	Zufälliger Nutzen (Stör-Term)
$P^a_{st}(x,k)$	W'keit für Wahl von Alternative a

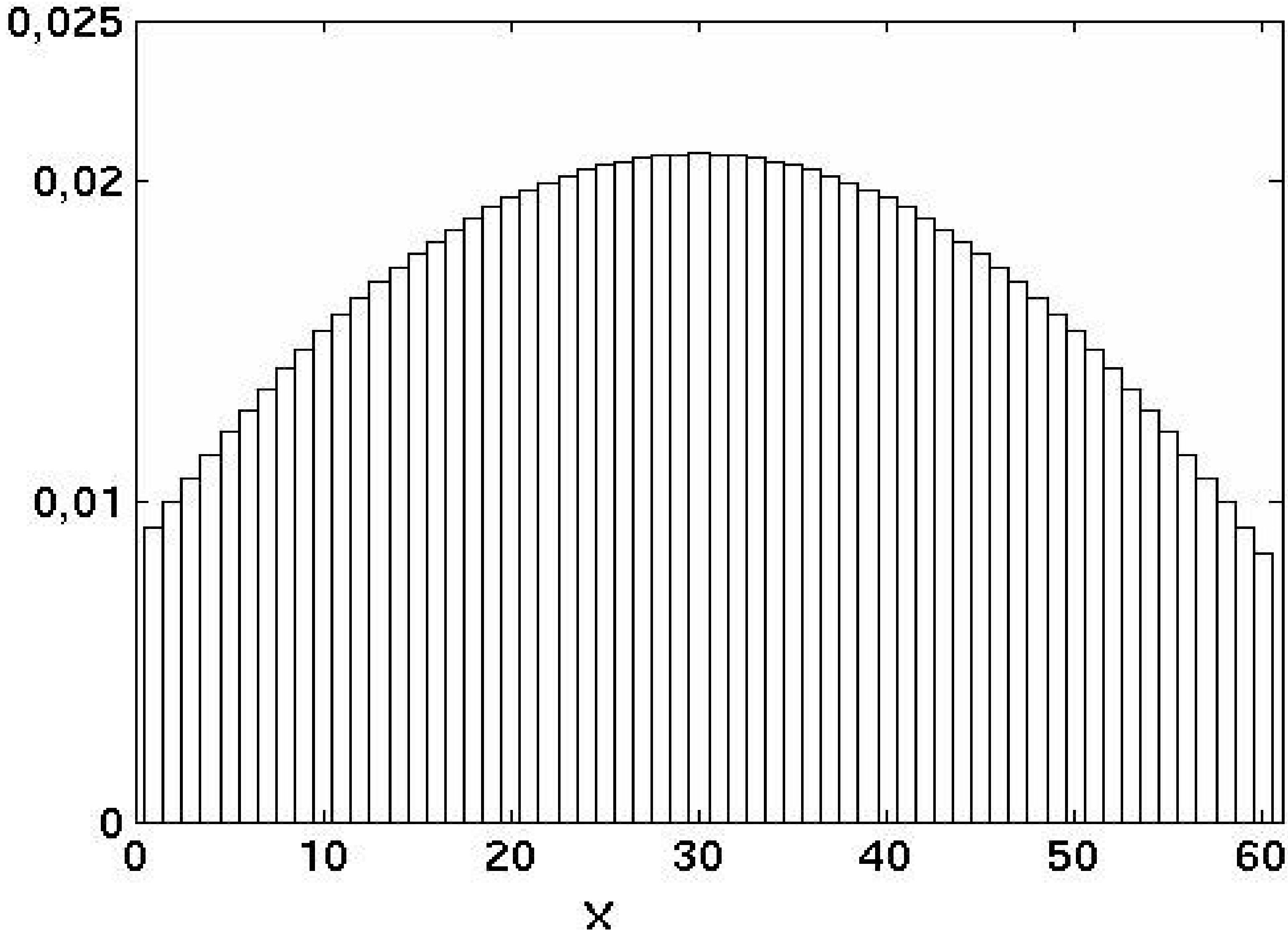
$$P^a_{st}(x,k) = P[V^a_{st}(x,k) + v^a_{st} = \max_{b\in A} V^b_{st}(x,k) + v^b_{st}]$$

$v^a_{st} \sim G(\eta,\mu)$ Gumbel-Verteilung (hier: $\eta = 0$, $\mu = 0.01$)

$$P^a_{st}(x,k) = e^{\mu V^a_{st}(x,k)} / (\Sigma_{b\in A}\, e^{\mu V^b_{st}(x,k)})$$

$$d^{a,k}_{st}(x) = P^a_{st}(x,k)\cdot d_{st}\cdot P[X_{st}=k] = e^{\mu V^a_{st}(x,k)} / (\Sigma_{b\in A}\, e^{\mu V^b_{st}(x,k)}) \cdot d_{st}\cdot P[X_{st}=k]$$

Wie oft wird gefahren?



Wie schätzt man die Nachfrage?

Freie Universität Berlin

Discrete Choice Logit-Modell

A	Menge von Reisealternativen
T	Zeithorizont (hier: ein Monat)
$X_{st} \in \{1,\ldots,n\}$	# Fahrten pro Monat (Zufallsvariable)
$C = A \times \{0,1,\ldots,n\}$	Reisealternativen (hier: kein Mix)
$U^a_{st}(x,k) = V^a_{st}(x,k) + v^a_{st}$	Nutzen für Alt. a, Paar st, Preis x, k Fahrten
$V^a_{st}(x,k)$	Deterministischer Nutzen (beobachtbar)
v^a_{st}	Zufälliger Nutzen (Stör-Term)
$P^a_{st}(x,k)$	W'keit für Wahl von Alternative a

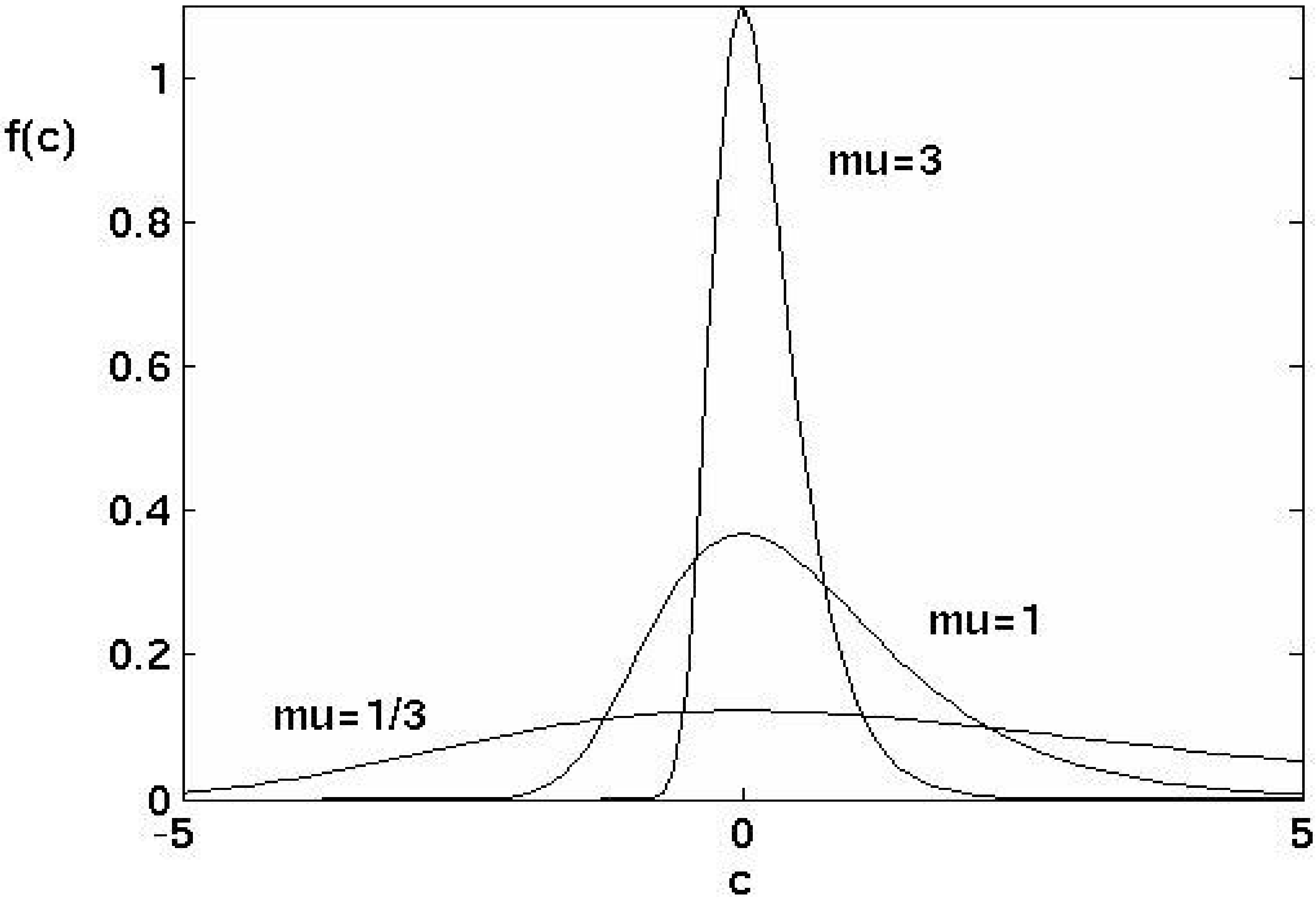
$P^a_{st}(x,k) = P[V^a_{st}(x,k) + v^a_{st} = \max_{b\in A} V^b_{st}(x,k) + v^b_{st}]$

$v^a_{st} \sim G(\eta,\mu)$ Gumbel-Verteilung (hier: $\eta = 0$, $\mu = 0.01$)

$P^a_{st}(x,k) = e^{\mu V^a_{st}(x,k)} / (\Sigma_{b\in A} e^{\mu V^b_{st}(x,k)})$

$d^{a,k}_{st}(x) = P^a_{st}(x,k) \cdot d_{st} \cdot P[X_{st}=k] = e^{\mu V^a_{st}(x,k)} / (\Sigma_{b\in A} e^{\mu V^b_{st}(x,k)}) \cdot d_{st} \cdot P[X_{st}=k]$

Die Gumbel-Verteilung des zufälligen Nutzens



Wie schätzt man die Nachfrage?

Freie Universität Berlin

Discrete Choice Logit-Modell

A	Menge von Reisealternativen
T	Zeithorizont (hier: ein Monat)
$X_{st} \in \{1,\ldots,n\}$	# Fahrten pro Monat (Zufallsvariable)
$C = A \times \{0,1,\ldots,n\}$	Reisealternativen (hier: kein Mix)
$U^a_{st}(x,k) = V^a_{st}(x,k) + v^a_{st}$	Nutzen für Alt. a, Paar st, Preis x, k Fahrten
$V^a_{st}(x,k)$	Deterministischer Nutzen (beobachtbar)
v^a_{st}	Zufälliger Nutzen (Stör-Term)
$P^a_{st}(x,k)$	W'keit für Wahl von Alternative a

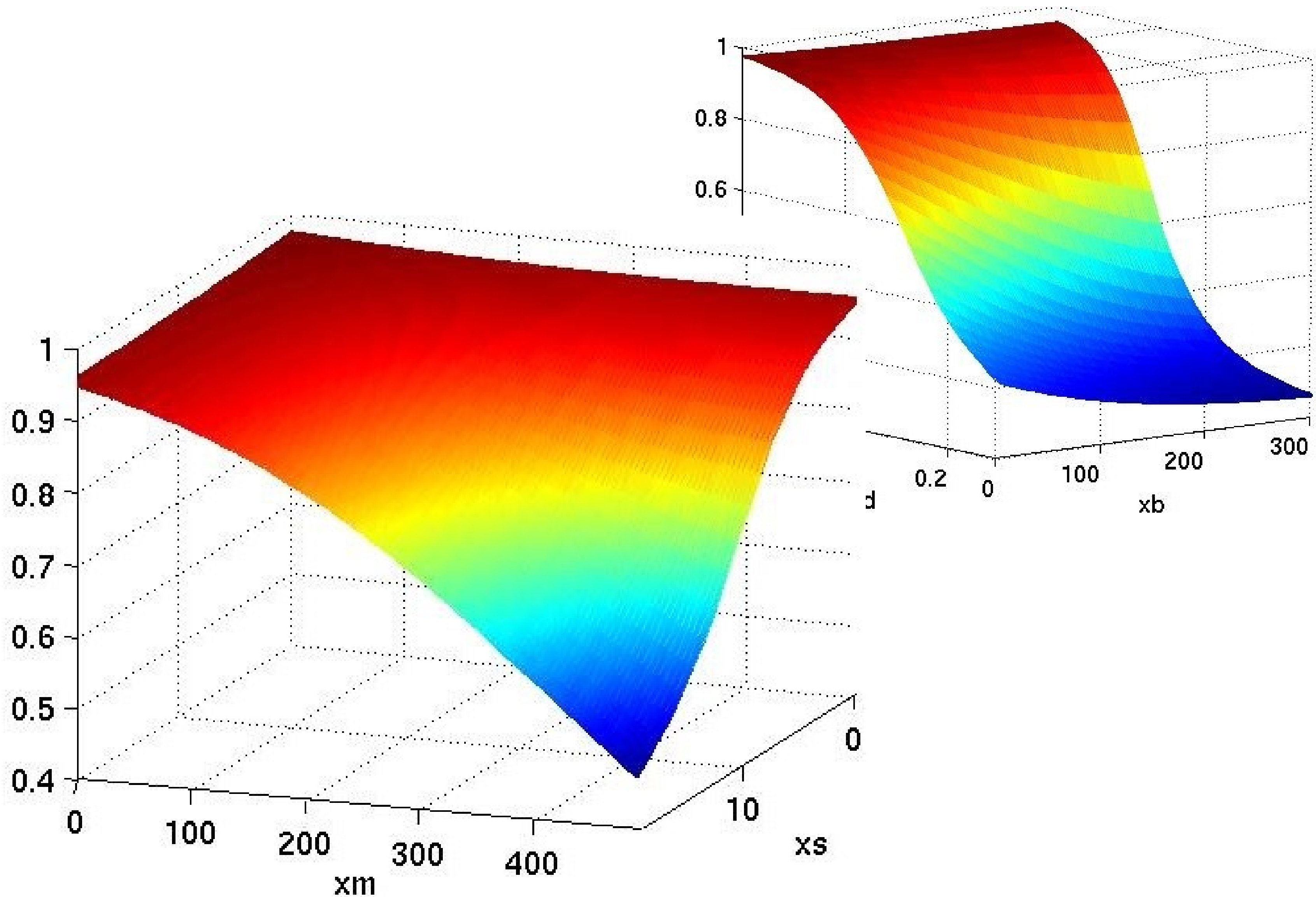
$P^a_{st}(x,k) = P[V^a_{st}(x,k) + v^a_{st} = \max_{b\in A} V^b_{st}(x,k) + v^b_{st}]$

$v^a_{st} \sim G(\eta,\mu)$ Gumbel-Verteilung (hier: $\eta = 0$, $\mu = 0.01$)

$P^a_{st}(x,k) = e^{\mu V^a_{st}(x,k)} / (\Sigma_{b\in A} e^{\mu V^b_{st}(x,k)})$

$d^{a,k}_{st}(x) = P^a_{st}(x,k)\cdot d_{st}\cdot P[X_{st}=k] = e^{\mu V^a_{st}(x,k)} / (\Sigma_{b\in A} e^{\mu V^b_{st}(x,k)}) \cdot d_{st}\cdot P[X_{st}=k]$

Welche Nachfrage kann man schätzen?



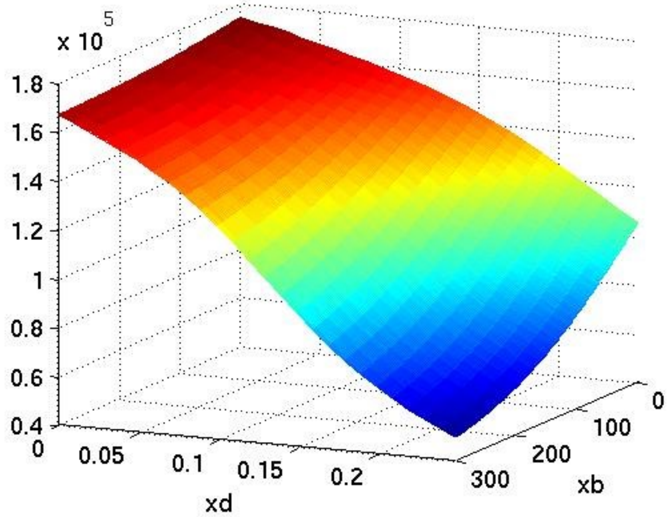
Beispiel 1: Standard- und rabattiertes Ticket

$A = \{S, R, C\}$	Alternativen: standard, rabattiert, Auto
$C = A \times \{1,2,\ldots,60\}$	Reisemöglichkeiten
$x = (x_b, x_d)$	Rabattierung, distanzabhängiger Preis
$p^{S,k}_{st}(x) = x_d \cdot l_{st} \cdot k$	Standard-Ticket
$p^{R,k}_{st}(x) = x_b + ½ \cdot x_d \cdot l_{st} \cdot k$	Reduziertes Ticket
$p^{C,k}_{st}(x) = q_F + q_V \cdot l^C_{st} \cdot k$	Auto (hier: $q_F = 100$ €, $q_V = 0.1$ €/km)
$V^{S,k}_{st}(x) = -\, p^{S,k}_{st}(x) - 0.1\ (t_{st} \cdot k)$	Nutzen für das Standard-Ticket
$V^{R,k}_{st}(x) = -\, p^{R,k}_{st}(x) - 0.1\ (t_{st} \cdot k)$	Nutzen für das rabattierte Ticket
$V^{C,k}_{st}(x) = -\, p^{C,k}_{st}(x) - 0.1\ (t^C_{st} \cdot k)$	Nutzen für das Auto

$$
\text{(FPP)} \quad \max \quad \sum_{st \in \mathrm{D}} \sum_{(a,k) \in C'} p^{a,k}_{\mathrm{st}}(x) \cdot \frac{e^{\mu V^{a,k}_{\mathrm{st}}(x)}}{\sum_{b \in A} e^{\mu V^{b,k}_{\mathrm{st}}(x)}} \cdot d_{\mathrm{st}} \cdot \mathrm{P}[X_{\mathrm{st}} = k]
$$

$$
\text{s.t.} \qquad x_b, x_d \geq 0
$$

Beispiel 1: Standard- und rabattiertes Ticket



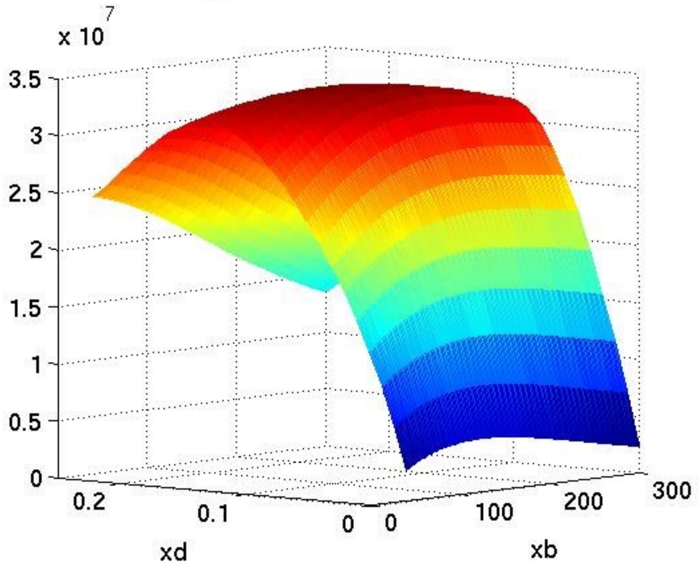
x_b = 153.31 €

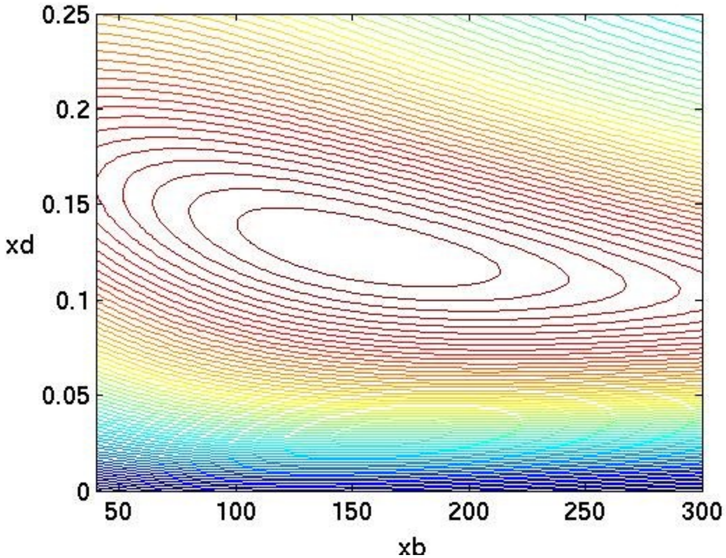
x_d = 0.13 €/km

r(x) = 34,201,767.8€(+32.4%)

d(x) = 126,768 (+38.1%)

Modal Split 68.9% (+18.8%)





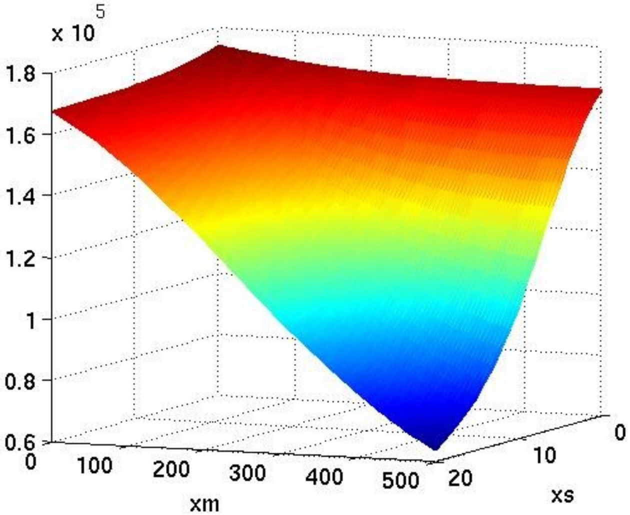
Beispiel 2: Einzel- und Monatsfahrkarte

$A = \{S, M, C\}$	Alternativen: standard, Monat, Auto
$C = A \times \{1,2,\ldots,60\}$	Reisemöglichkeiten
$x = (x_m, x_s)$	Monatskarte, Einzelfahrkarte
$p^{S,k}_{st}(x) = x_s \cdot k$	Einzelfahrkarte
$p^{M,k}_{st}(x) = x_m$	Monatsfahrkarte
$p^{C,k}_{st}(x) = q_F + q_V \cdot l^C_{st} \cdot k$	Auto (hier: $q_F = 100$ €, $q_V = 0.1$ €/km)
$V^{S,k}_{st}(x) = -\, p^{S,k}_{st}(x) - 0.1\ (t_{st} \cdot k)$	Nutzen für die Einzelfahrkarte
$V^{M,k}_{st}(x) = -\, p^{M,k}_{st}(x) - 0.1\ (t_{st} \cdot k)$	Nutzen für die Monatsfahrkarte
$V^{C,k}_{st}(x) = -\, p^{C,k}_{st}(x) - 0.1\ (t^C_{st} \cdot k)$	Nutzen für das Auto

$$\text{(FPP)} \quad \max \quad \sum_{st \in D} \sum_{(a,k) \in C'} p^{a,k}_{st}(x) \cdot \frac{e^{\mu V^{a,k}_{st}(x)}}{\sum_{b \in A} e^{\mu V^{b,k}_{st}(x)}} \cdot d_{st} \cdot \mathrm{P}[X_{st} = k]$$

$$\text{s.t.} \qquad x_m, x_s \geq 0$$

Beispiel 2: Einzel- und Monatsfahrkarte



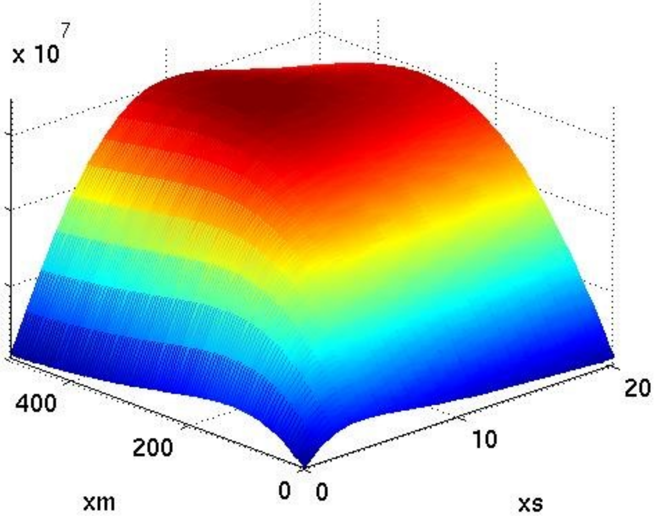
x_m = 372.08 €

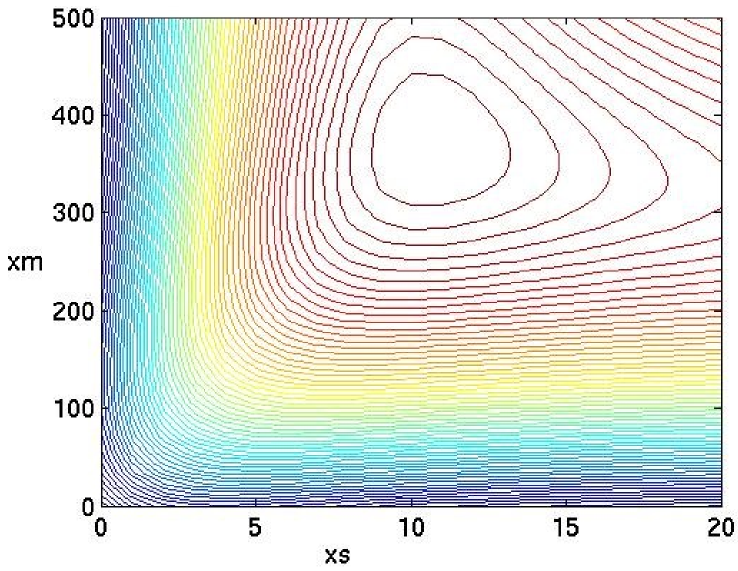
x_d = 10.99 €/km

r(x) = 31,813,156,4€(+23.1%)

d(x) = 110,999 (+20.9%)

Modal Split 60.3% (+10.2%)



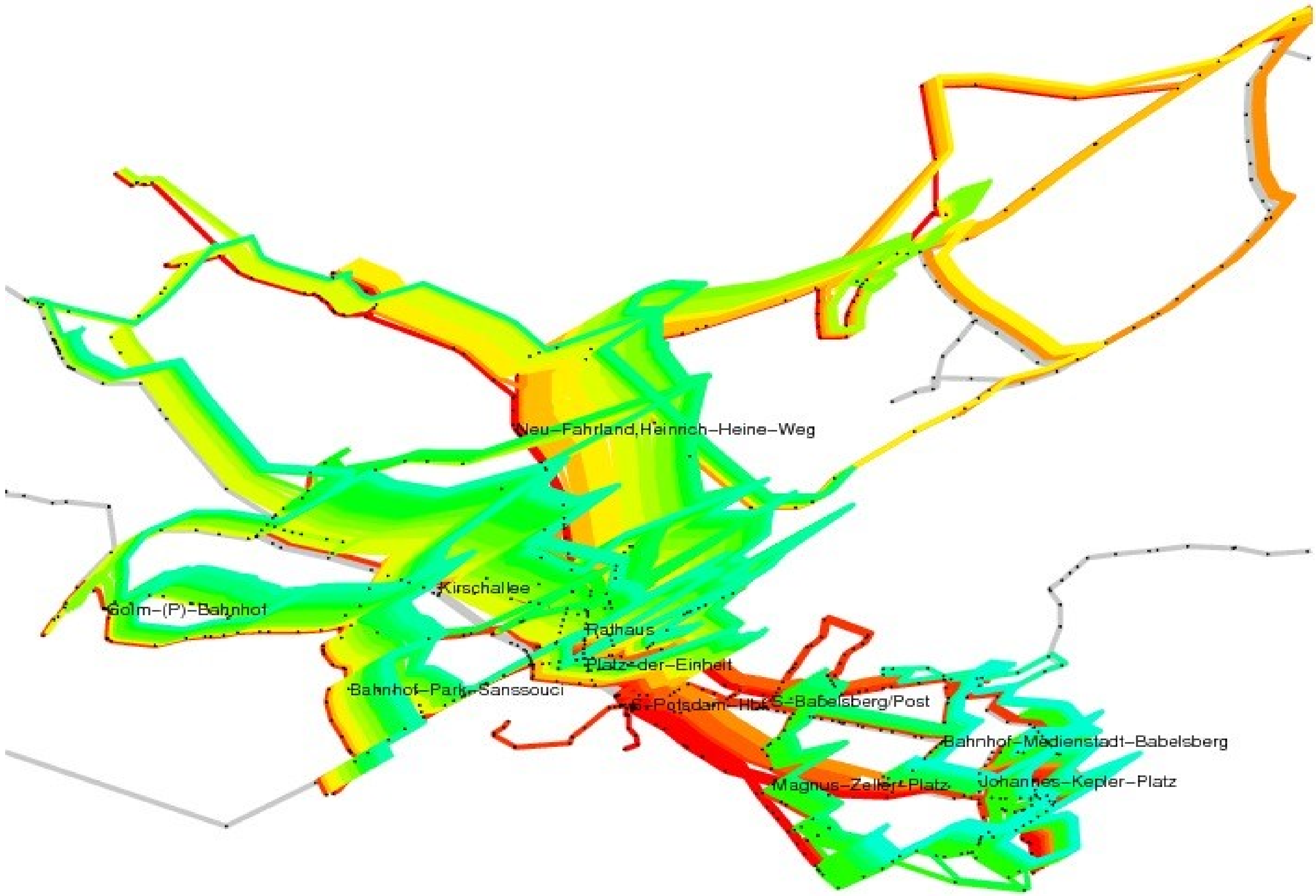


Wie prognostiziert man menschliches Verhalten?

	Einnahme	*Nachfrage*	*Modal Split*
Status Quo	25,928,730	91,791	50.1%
standard / rabattiert	34,201,767	126,786	68.9%
Einzel / Monat	31,813,156	110,999	60.3%

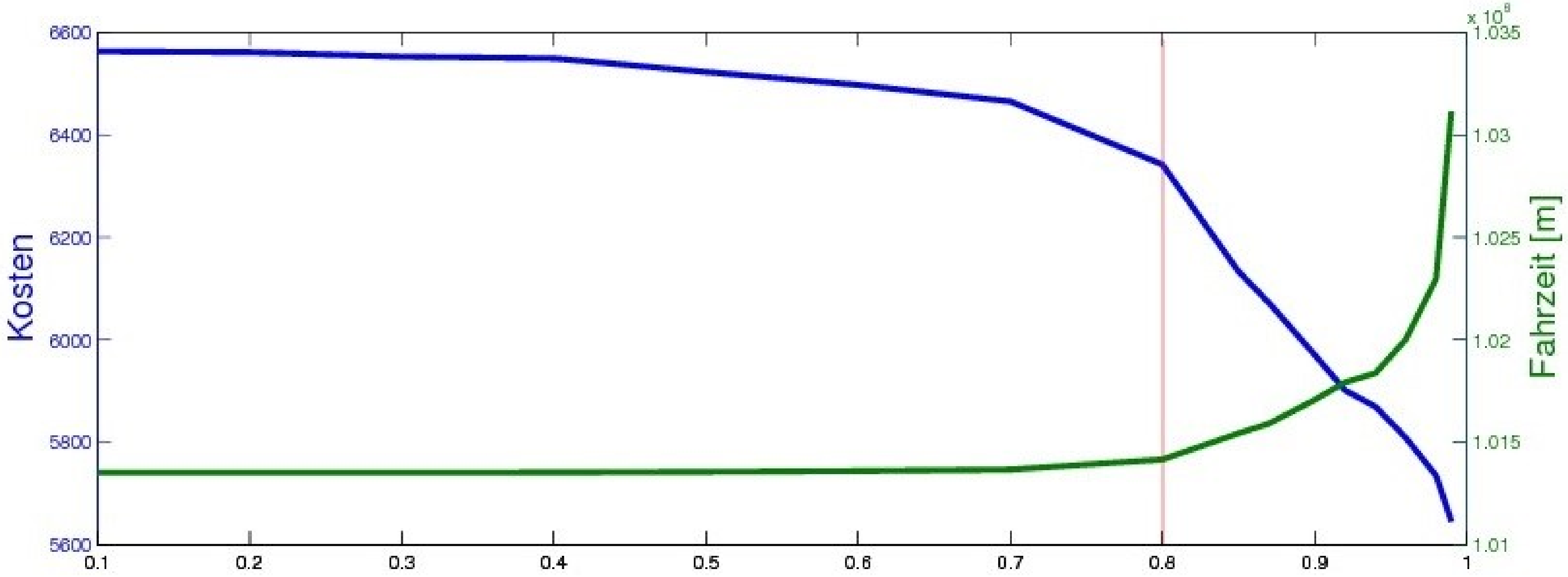
Wenn man kein Geld hat …

Wenn jeder direkt fahren will …



Was ist der "beste Kompromiss"?

Freie Universität Berlin



- Fahrzeit bleibt anfangs fast konstant, Kosten sinken
- 80% Gewichtung auf den Kosten
  - "Knick", d.h. Fahrzeit pro zusätzlich eingespartem € steigt
  - Kosten etwa in Höhe der Referenzlösung
  - Gleiche Gewichtung für optimierte Lösung

Manchmal geht doch (fast) alles.

	Opt	Ref	Änderung
durchschnittl. Gesamtreisezeit	36 min 3 s	36 min 39 s	-1,6%
durchschnittl. Zeit im Fahrzeug	13 min 8 s	14 min 36 s	**-10,0%**
durchschnittl. Umsteigewartezeit	1 in 30 s	1 min 29 s	+1,1%
durchschnittl. Laufzeit	1 min 38 s	1 min 37 s	+1,0%
durchschnittl. gefühlte Reisezeit	26 min	27 min 37 s	-5,9%
Gesamtanzahl Umstiege	10595	11141	**-4,9%**
0 Umstiege	37338	36851	+1,3%
1 Umstiege	10088	10503	-4,0%
2 Umstiege	243	306	-20,6%
>2 Umstiege	7	9	-22,2%
Kosten (6:00-9:00)	7717 €	8057€	**-4,2%**

Mathematik im Verkehr

- Verkehr = Infrastruktur + Fahrzeuge
  + Information + Mathematik
- Mathematik kann einen echten Beitrag leisten
- Mathematik hat einen immensen Hebel
- Je größer die Entscheidung, desto weniger Mathematik wird eingesetzt
- Mit relativ wenig Aufwand ist mehr möglich!


Konrad Zuse vor einer Z1

"Ingenieur also. Berlin, meine Geburtsstadt, war nicht weit. Dort gab es genug Technik und genug zu verbessern. Freilich, was sollte ich mich mit einer völlig verbauten Stadt aufhalten? Nein, ich wollte die Stadt der Zukunft entwerfen. Es gab damals in den illustrierten Zeitungen manchen Entwurf solcher Phantasie-städte, und der Film Metropolis wurde als große Sensation empfunden. Als Jahresarbeit für die Oberprima entwarf ich mein Metropolis: Eine 35-Millionen-Stadt nach verkehrs-technischen Gesichtspunkten."

Danke für die Aufmerksamkeit

Ralf Borndörfer

Freie Universität Berlin
Zuse-Institute Berlin
Takustr. 7
14195 Berlin-Dahlem

Fon (+49 30) 84185-243
Fax (+49 30) 84185-269

borndoerfer@zib.de

www.zib.de/borndoerfer