

Individuelle Optimierungslösungen für die Personaleinsatzplanung eines Verkehrsunternehmens

(mit C. Türk, B. Vornhusen, J. Brose, T. Göb, F. Schaar)

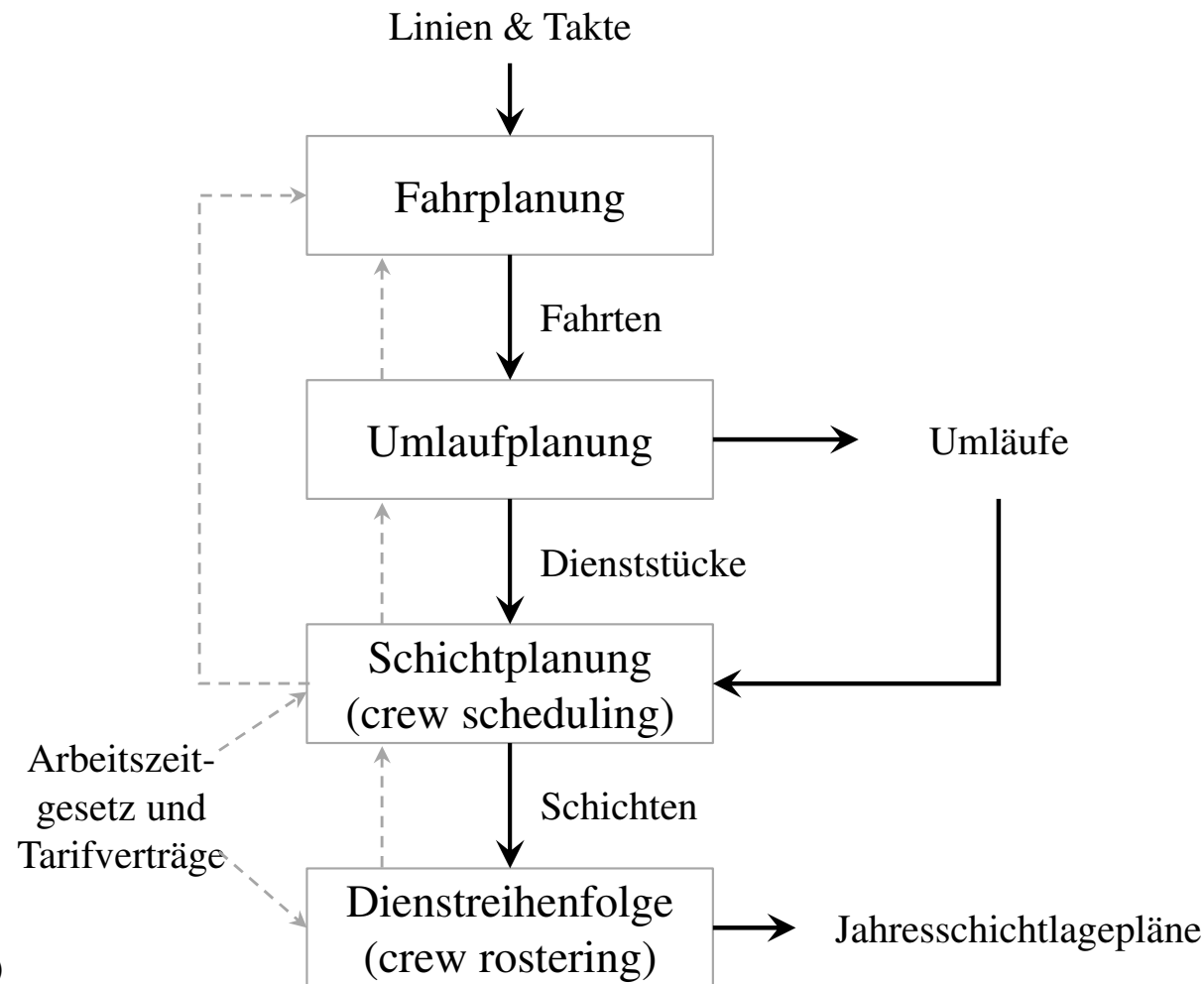
Verkehrswissenschaftliches Kolloquium der TH Wildau

Agenda

- ▶ Allgemeiner Prozess der Personaleinsatzplanung
- ▶ Vorbereitende Gegenüberstellungen
 - ▶ Jahresruhetagsplanung und Jahresschichtlagenplanung
 - ▶ Individuelle Planung oder feste Basispläne (Turnusse)
- ▶ Überblick über das Gesamtprojekt
- ▶ Vorstellung ausgewählter Optimierungsmodelle
(Basisplänen, Einsprungwochen, Jahresschichtlagenplanung)
- ▶ Einschub: LGS, LP & MILP
- ▶ Zusammenfassung

Personaleinsatzplanung besteht aus mehr als nur einer Teilaufgabe

Planungsprozess im öffentlichen Verkehr



Quelle: Freling et al. (1999)

Schichtplanung definiert Schichten (Nachfrage) Dienstreihenfolge definiert Verfügbarkeit (Angebot)

Zusammenspiel von Schichtplanung und Dienstreihenfolge




Abdeckung aller Zugbewegungen mit einem Lokführer in **Schichten** bzw. **Duties** („Nachfrage“)

Zeitliche Verfügbarkeit aller Lokführer in **Ruhetagsplänen** bzw. **Roster** („Angebot“)

► Effiziente Überdeckung der Nachfrage mit verfügbaren Tf

Quellen: www.tagesspiegel.de (12.08.2025), sbahn.berlin (12.08.2025) und www.deviantart.com/david9122 (09.08.2025)

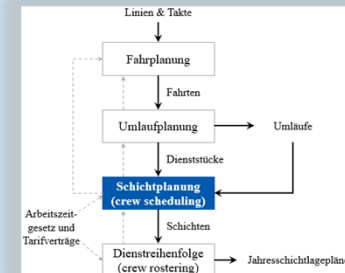
Beispiel- schicht

Arbeitsauftrag	43934/1	TCLi	
Bezeichnung	Schichtidentifikation	Team Leiter Projekte Bereich Produktion	
29.02.2016	29.02.2016	BBDF	
gültig am	Antritt am	Meldestelle	
Liebchen, Christian Prof. Dr.	1 von 2	25.02.2016 17:00 CLIEBCHEN	
Tf	Seite x von y	ausgegeben am / um / von	

Schichtbeginn **04:59** Schichtende **01:45** Schichtdauer **20:46**
 Ruhepausen 00:45 Arbeitszeit 20:01
 Fz S-Bahn Verkehr 17:35 Fahrzeit Ring 02:00 Schutzrechtl. Az 20:01

Liebchen, Christian Prof. Dr. BR-Kenntnisse ZBS, 480, 481, 485, 478/5, 488/0, MK3, Werk BSW,
 System 1/2/3
BR-Schicht ZBS, 481, 480, 485

Nr.	Art	Beschreibg.	Zgg	Zug-Nr.	von/in	Beginn	bis	Ende	Gleis	Kommentar
1	B	MSA			BBDF	04:59		05:		
2	B	Weg			BBDF	05:		05:		
3	Fgst	S5-4			BBDF	05:	BMDf	05:	9	
4	B	Weg			BMDf	05:		05:		
5	V	V1			BMDf	05:		05:		
6	B	BP			BMDf	05:		05:		
5	Tf	S73-12	0.2		BMDf	05:51	BMDf	05:53	3	FPLO: 223
6	B	Frw			BMDf	05:53		05:58		
7	Tf	S73-12	48.1	005001	BMDf	05:58	BSTN	06:29	1	FPLO: 223
8	B	Frw			BSTN	06:29		06:34		
9	Tf	S73-12	48.1	007002	BSTN	06:34	BPDH	08:13	896	FPLO: 223
10	B	Frw			BPDH	08:13		08:18		
11	Tf	S73-12	48.1	001003	BPDH	08:18	BORB	09:49	30	FPLO: 223
12	B	Frw			BORB	09:49		10:10		
13	A	A0			BORB	10:10		10:10		
14	B	-			BORB	10:10		10:10		
15	P	Ruhe			BORB	10:10		10:25		
16	V	V0			BORB	10:25		10:25		
17	Tf	S73-12	48.1	025004	BORB	10:25	BNB	11:05	412	FPLO: 223
18	B	Frw			BNB	11:05		11:10		
19	A	A0			BNB	11:10		11:10		
20	B	-			BNB	11:10		11:20		
21	P	Ruhe			BNB	11:20		11:35		
22	V	V0			BNB	11:35		11:35		
23	Tf	S73-12	48.1	085005	BNB	11:35	BBER	12:08	2	FPLO: 223
24	B	Frw			BBER	12:08		12:13		
25	B	S			BBER	12:13		12:21		
26	Tf	S73-12	48.1	002006	BBER	12:21	BBFD	13:29	3	FPLO: 223



Im Eisenbahnwesen haben Gewerkschaften recht hohe persönliche Planungssicherheit erzielt

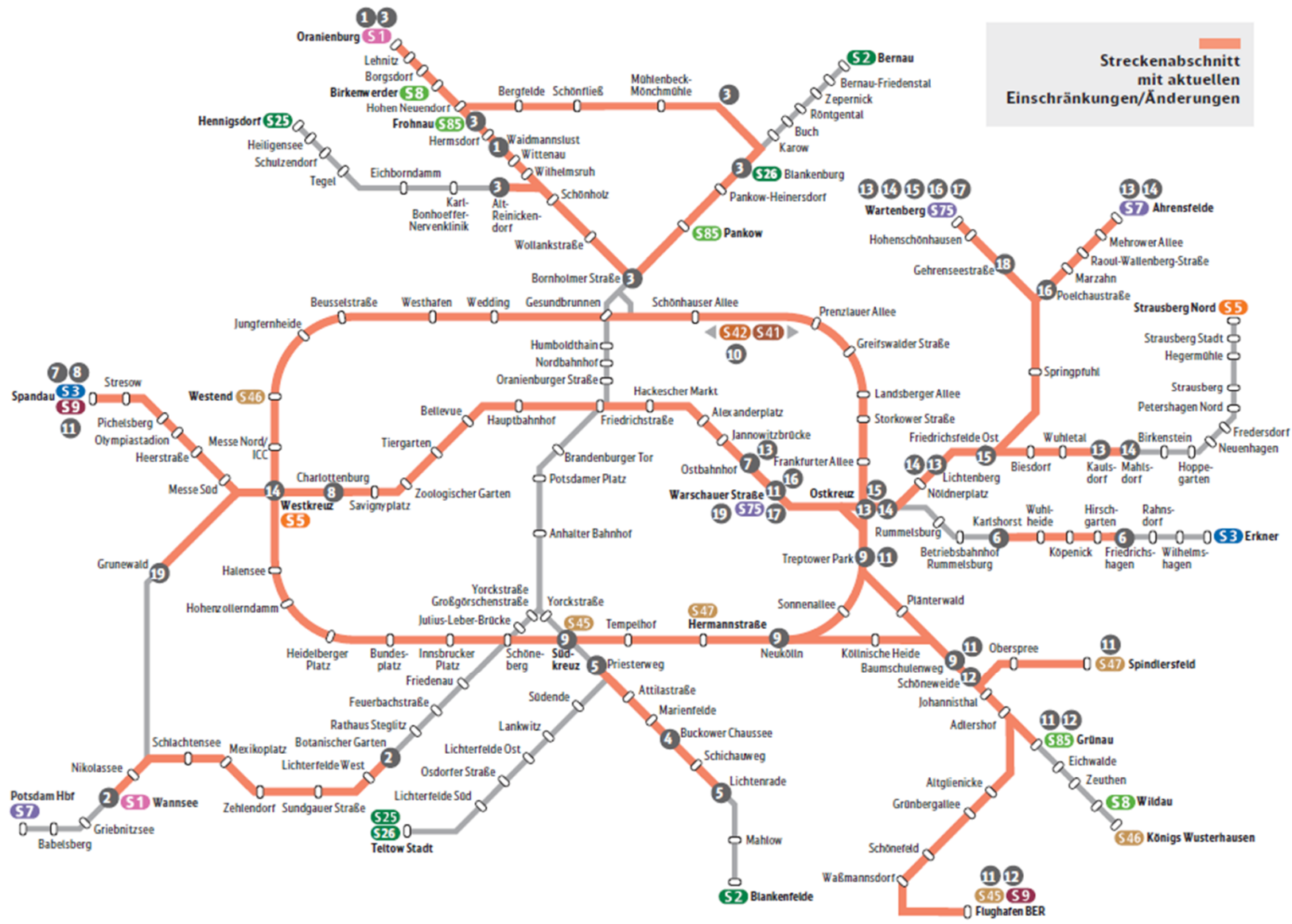


Persönliche Planungssicherheit im Geltungsbereich des BuRa-ZugTV (GDL)

- ▶ §3 Abschnitt III (1) BuRa-ZugTV 2024 – “Jahresplanung”
 - ▶ “für den Zeitraum eines Kalenderjahres ein verbindlicher Jahresruhetags- und Urlaubsplan zu erstellen [...] spätestens bis zum 30. November des Vorjahres bekannt zu geben”
 - ▶ “Jahresruhetagsplan enthält [...] arbeitsfreie Tage von Teilzeitarbeitnehmern [...] außerhalb des Urlaubs mindestens zwölf freie Wochenenden [...] sechs weitere freie Samstage, Sonn- oder Feiertage (48 Stunden) [...] fünf weitere freie Kalendertage (48 Stunden)

Übersicht Fahrplanänderungen im S-Bahn-Liniennetz

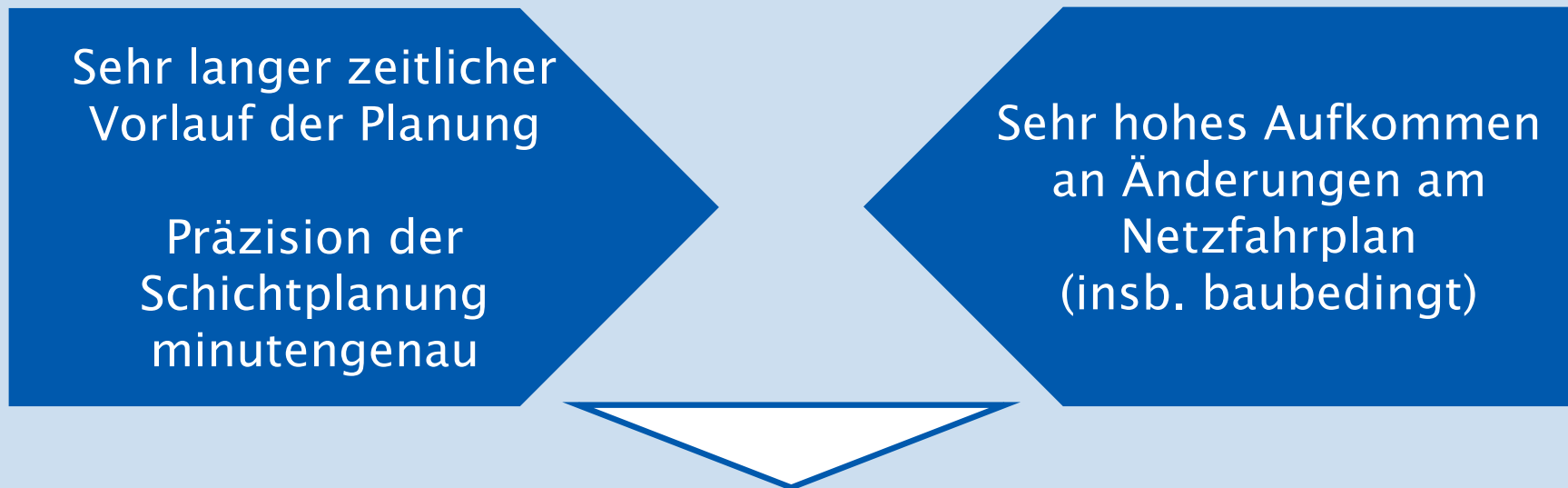
Zeitraum: Donnerstag, 12.09.2024, bis Sonntag, 29.09.2024



Bildquelle:
punkt3,
17/2024

Schichtlagen erhöhen persönliche Planungssicherheit – und wahren unternehmerische Flexibilität

Motivation für die Arbeit mit so genannten Schichtlagen



- Es ist bei der S-Bahn Berlin GmbH nicht sinnvoll, per 30.11. des Vorjahres die exakten Schichten des gesamten Jahres abschließend zugeteilt zu haben
- Auf der Ebene sog. **Schichtlagen** (z.B. früh / spät / Nacht) ist dies jedoch noch vertretbar

Das Fahrpersonal der S-Bahn Berlin GmbH genießt eine noch höhere persönliche Planungssicherheit



Persönliche Planungssicherheit im Geltungsbereich der S-Bahn Berlin GmbH

► §2 (1) BV Az Tf III

- **“Schichtlagen sind Rahmen, in denen sich die tägliche Arbeitszeit [...] einbetten lässt.”**

► Beispiele: Früh, Spät, Nacht

- Übliches Merkmal: Dauer meist 13 Stunden



► §6 (3) 9. Planungsschritt BV Az Tf III

- **“Bekanntgabe des individuellen Jahresschichtlageplans des Triebfahrzeugführers”**
- **“Die Bekanntgabe hat bis spätestens 30.11. zu erfolgen.”**

vgl. §5 (1) ArbZG:
„ununterbrochene
Ruhezeit von
mindestens elf
Stunden“

Crew Roster können ausschließlich Ruhetage oder Schichtlagen oder spezifische Schichten enthalten

Einplanung von Schichtlagen oder spezifischen Schichten












- Je spezieller die Inhalte von Rostern...
 - ... desto größer die verlässlichen Ruhezeiten der Tf 
 - ... desto geringer die Flexibilität für Anpassungen 

	Tag 1	Tag 2	Tag 3	Tag 4	Tag 5	Tag 6
Ruhetagsplan	Arbeit	Arbeit	Ruhezeit		Arbeit	Arbeit
Schichtlagen	Früh	Früh	Ruhezeit		Spät	Spät
Spez Schichten	F2	F1	Ruhezeit		S2	S1
Schichtlagen mit Schichten	F2	F1			S2	S1

- Wenn ein Roster noch *keine* spezifischen Schichten enthält, werden diese in *zusätzlichem* Planungsschritt zugewiesen

Zuordnung von Schichten bietet bei Schichtfolgen mehr Freiheiten, kann aber nur weniger lang gelten

Gegenüberstellung der Zuordnung konkreter Schichten vs Zuordnung von Schichtlagen

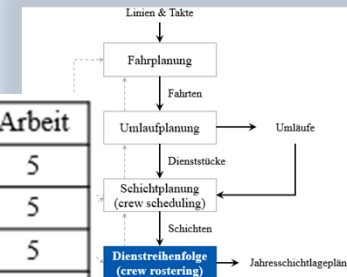
Merkmale	Zuordnung konkreter Schichten	Zuordnung von Schichtlagen
Möglichkeit der Planung „spitzer Abfolgen“ von Schichten & Ruhezeiten	Arbeitgeber:   ? Arbeitnehmer:  ?	Arbeitgeber:  ? Arbeitnehmer:  ?
Hohe persönliche Planungssicherheit		
Anpassungsfähigkeit an insb. baubedingte Änderungen des Verkehrsangebots		
Häufigere Notwendigkeit von Anpassungen		
weitere		

Basispläne (Turnusse) sind klassisches Instrument, um Fahrern zyklische Arbeitsfolgen zuzuweisen

Beispiel eines Basisplans ("Turnus")

- Ein Basisplan ist eine feste zyklische Abfolge von Schichtlagen
- Wenn jeder Startwoche ein Fahrer zugeordnet ist, dann bietet dieser die in den Summenzeilen genannten Verfügbarkeiten (Ausnahme Krankheit, Urlaub, Fortbildung etc.)

Zeile	Mo	Di	Mi	Do	Fr	Sa	So	Ruhe	Arbeit
1	L	L	L	L	L	R	R	2	5
2	N	N	N	R	R	L	L	2	5
3	L	R	R	E/L	E/L	E/L	E/L	2	5
4	R	L	L	L	L	R	R	3	4
5	N	N	N	R	R	D	D	2	5
6	L	L	R	N	N	N	N	1	6
7	R	R	E	E	E	R	R	4	3
8	E	E	E	R	N	N	N	1	6
9	N	R	R	L	L	L	L	2	5
10	R	L	L	L	N	N	N	1	6
11	R	R	E	E	E	R	R	4	3
12	E	E	E	E	R	E	E	1	6
13	E/L	E/L	E/L	R	R	L	L	2	5
14	L	N	N	N	R	R	R	3	4
15	E	E	E	R	E	E	E	1	6
16	E	E	R	N	N	N	N	1	6
17	R	R	L	L	L	R	R	4	3
Ruhe	5	5	4	5	5	6	6	36	83
Early	4	4	5	4	4	3	3		27
Day	0	0	0	0	0	1	1		2
Late	5	5	5	5	4	3	3		30
Night	3	3	3	3	4	4	4		24



Bildquelle: L., Türk & Vornhusen (eingereicht)

Individuelle Planung ist flexibler als Basispläne – aber viel komplexer und potenziell weniger fair

Gegenüberstellung individueller Jahresschichtlagenplanung vs. Grundlage Basispläne

Merkmale	Rein individuelle Jahresschichtlagenpläne	Basispläne als Grundlage für JSLP
Flexibilität aufgrund von kleinen Planungseinheiten	✓	✗
Möglichkeit punktgenauer Bedarfsdeckung	✓	✗
Manuelle Beherrschbarkeit	✗	✓
Umsetzbarkeit konkreter individueller Wünsche	✓	✓
Einfache Einhaltung Regeln aus ArbZG, LfTV, BV & weitere	✓	✓
Einfache Sicherstellung von Regelmäßigkeit & Fairness	✗	✓
weitere		

z.B. „hoher Anteil früh“

Agenda

- ▶ Allgemeiner Prozess der Personaleinsatzplanung
- ▶ Vorbereitende Gegenüberstellungen
 - ▶ Jahresruhetagsplanung und Jahresschichtlagenplanung
 - ▶ Individuelle Planung oder feste Basispläne (Turnusse)
- ▶ **Überblick über das Gesamtprojekt**
- ▶ Vorstellung ausgewählter Optimierungsmodelle
(Basisplänen, Einsprungwochen, Jahresschichtlagenplanung)
- ▶ Einschub: LGS, LP & MILP
- ▶ Zusammenfassung

Die S-Bahn Berlin GmbH hat Erfahrungen mit Basisplänen und individueller Schichtlagenplanung



Rückblick

► bis 2020

2021-2023

ab 2024

Schichtlagenplanung
auf Grundlage fester
Basispläne

Individuelle
Schichtlagen-
planung

Schichtlagen-
planung auf
Grundlage
flexibler
Basispläne

Schichtplanung definiert Schichten (Nachfrage) Dienstreihenfolge definiert Verfügbarkeit (Angebot)

Zusammenspiel von Schichtplanung und Dienstreihenfolge



Abdeckung aller Zugbewegungen mit einem Lokführer in **Schichten** bzw. **Duties** („Nachfrage“)

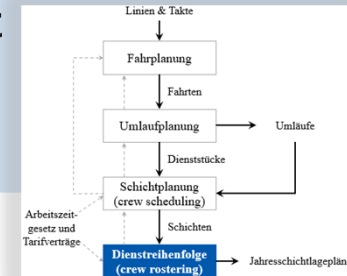
Zeitliche Verfügbarkeit aller Lokführer in **Ruhetagsplänen** bzw. **Roster** („Angebot“)

- Effiziente Überdeckung der Nachfrage mit verfügbaren Tf
- Tägliche Zuteilung von Schichten zu Lokführer*innen (“Crew Assignment Problem”, CAP)

Quellen: www.tagesspiegel.de (12.08.2025), sbahn.berlin (12.08.2025) und www.deviantart.com/david9122 (09.08.2025)

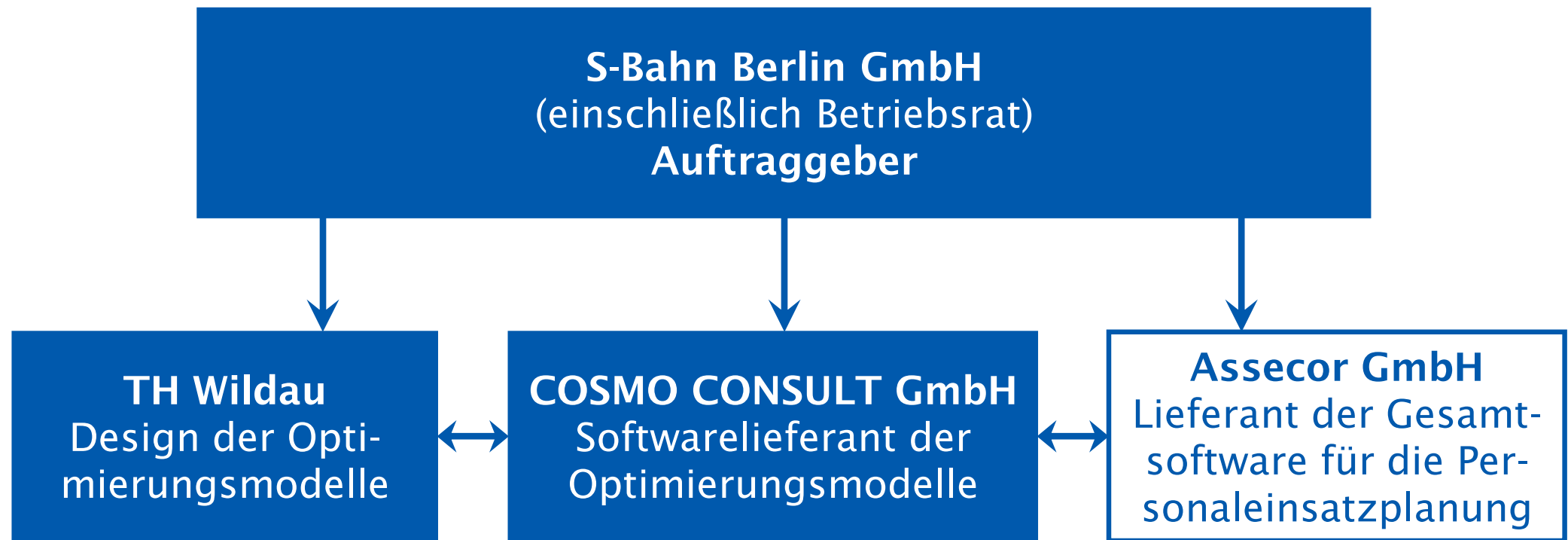
~~Personaleinsatzplanung~~ Crew Rostering besteht aus mehr als nur einer Teilaufgabe

Überblick über die Teilaufgaben von Crew Rostering und Crew Assignment



CCRP (cyclic crew rostering problem)	Identifikation der Listenanzahl je Basisplan	Zuweisung von Tf zu Basisplänen	Urlaubsplanung	C2CRRP (Zuweisung von Tf zu Zeilen)	ACCRP (Schichtlagen)	ACCRP (Unterschichtlagen)	CAP (crew assignment problem)
selten	jährlich (Juli)	einmalig	jährlich (Aug/Sep)	einmalig	jährlich (Okt/Nov)	jährlich (Okt/Nov)	täglich
2026	2024	(manuell)	(manuell)	2024	2024	2024	Mai 2025

Organisation des Projekts zur Jahresschichtlagenplanung



Aus Mitarbeiterperspektive bieten Basispläne klare Strukturen, hohe Fairness und tlw Wahlmöglichkeit



Merkmale des ab 2024 gültigen Systems von Basisplänen (1/2) – Fairness

- ▶ Allgemeine feste Merkmale (Fairness, Regelmäßigkeit)
 - ▶ Dauer 17 Wochen
 - ▶ meist 82-83 Schichtantritte
→ d.h. 251-254 p.a.
 - ▶ feste Abfolge freier Wochenenden in *allen* Basisplänen:
6 Wochenenden in den Wochen 1, 4, 7, 11, 14, 17
→ d.h. 18 p.a.
- ▶ Angebot mehrerer Basispläne mit verschiedenen Schwerpunkten (Anteile früh / spät; kürzere / längere Ruhen)
- ▶ Möglichkeit der Wahl von Basisplänen

vgl. 261 abzgl.
Wochenfeiertage



Klassische Turnusse sind starr – in Basispläne und in den Prozess wurden flexible Elemente integriert

Merkmale des ab 2024 gültigen Systems von Basisplänen (2/2) – Flexibilität

Flexibilitätsmerkmale direkt in Basisplänen

Variable Schichtlagen

Entscheide in Jahresschichtlagenplanung für in Basisplänen definierte Schichtantritte, ob sie zur Bedarfsdeckung als F/S/N genutzt werden sollen

Z-Schichten

Möglichkeit der Einplanung eines zusätzlichen Schichtantritts, wenn ein Mitarbeiter infolge ungünstiger Urlaubskonstellation den Zielwert für Anzahl Schichtantritte pro Jahr ansonsten nicht erreichen können würde



außerhalb der Jahresschichtlagenplanung:
Einzelne im Zuge der Schichtzuteilung kurzfristig beispielsweise als F *oder* S nutzbare Antritte

Zusätzliche Flexibilitätsmerkmale im Prozess

Entnahme Teilzeit

Wenn Mitarbeiter/innen mit Beschäftigungsgrad unter 100% einem Vollzeit-Basisplan zugeordnet sind, dann werden ihre überzähligen Schichtantritte primär bedarfsgerecht entnommen (beachte dabei jedoch auch Anforderungen zur Gleichmäßigkeit der Entnahme)

Für die Berechnung von Basisplänen müssen einige Abfolgen von Schichtlagen verboten werden

Ausgewählte verbotene Folgen von Schichtlagen



► In einem zulässigen Basisplan...

- ... dürfen auf spätere Schichtlagen *nicht* frühere folgen
- ... darf ein Nachtarbeitsblock *nicht* unmittelbar von einem weiteren Nachtarbeitsblock gefolgt werden
- ... *müssen* auf eine Nachtschicht zwei Ruhetage folgen





Ungleichung	i	i+1	i+2	i+3	Bemerkung
(21)	N	L			Wechsel in frühere Lage
(21) und (22)	N	E			Wechsel in frühere Lage
(22)	L	E			Wechsel in frühere Lage
(23)	L	R	E		Spät-(Ruhe)-Früh
(23)	L	E	E		Spät-(Ruhe)-Früh
(24)	N	R	R	N	Zwei Nachtblöcke in Folge
(25)	N	R	L		Nur eine Ruhe nach Nacht

Agenda

- ▶ Allgemeiner Prozess der Personaleinsatzplanung
- ▶ Vorbereitende Gegenüberstellungen
 - ▶ Jahresruhetagsplanung und Jahresschichtlagenplanung
 - ▶ Individuelle Planung oder feste Basispläne (Turnusse)
- ▶ Überblick über das Gesamtprojekt
- ▶ Vorstellung ausgewählter Optimierungsmodelle
(Basisplänen, Einsprungwochen, Jahresschichtlagenplanung)
- ▶ **Einschub: LGS, LP & MILP**
- ▶ Zusammenfassung

Zur Lösung ganzzahlig linearer Optimierungsprobleme bilden Lineare Gleichungssysteme den Kern

Übersicht der Modellbestandteile von LGS, LP & MILP

Modellbestandteil	Lineares Gleichungssystem (LGS)	Lineares Optimierungsproblem (LP)	gemischt-ganzzahlig lineares Optimierungsproblem (MILP)
Zielfunktion		$\min cx$	$\min cx$
Restriktionen (Gleichungen)	$Ax = b$	$Ax = b$	$Ax = b$
Restriktionen (Ungleichungen)		$x \geq 0$	$x \geq 0$
Variablen (kontinuierlich)	$x \in \mathbb{R}^n$	$x \in \mathbb{R}^n$	$x \in \mathbb{R}^n$
Variablen (ganzzahlig)			x ganzzahlig
Komplexität	$O(n^{2.4})$	polynomiell	NP-schwer
Algorithmen	Gauß'sches Eliminationsverfahren	z.B. Simplex-Algorithmus	Branch-and-Bound und weitere

WESENTLICH
breitere
Modellierungs-
möglichkeiten!

löst vie-
le LGS

löst vie-
le LP's

Ganzzahlige lineare Optimierung ist zur Lösung der Teilaufgaben geeignet

Mathematische Optimierungsmodelle (allgemein)

- Allgemeine Form eines sog. gemischt-ganzzahligen linearen Optimierungsmodells

Zielfunktion

min $c^T x$

Restriktionen

s.t. $Ax \leq b$

Variablen

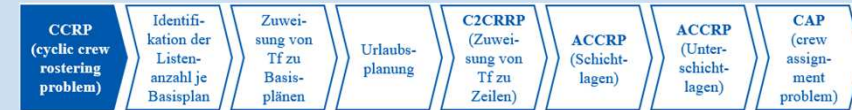
x gzz.

Einzelne Variablen ggf.
auch kontinuierlich

- Zur Lösung dieser Standardaufgabe gibt es mehrere professionelle hoch leistungsfähige Softwarelösungen
- In Abhängigkeit von der Struktur der Restriktionen ($Ax \leq b$) können mehrere zehntausend Variablen verarbeitet werden

Unter Nutzung binärer Entscheidungsvariablen lassen sich zu verbotende Folgen klar formulieren

Beispiel von Nebenbedingungen (1/2) – Modell CCRP



► Variablen

binäre Entscheidungsvariable: $z_{i,s}$

Wert 1 \Leftrightarrow An Tag i wird die Schichtlage s zugeordnet

► Restriktionsmenge “(21)”

“Plane nach einer Nachtschicht (N) an Tag i am Folgetag $i+1$ weder eine Früh- (F) noch Spät- (S) oder Tagschicht (T) ein.”

$$z_{i,N} + z_{i+1,F} + z_{i+1,T} + z_{i+1,S} \leq 1$$

► Restriktionsmenge “(23)”

“Plane nach einer Spätschicht an Tag i am Tag $i+2$ weder eine Früh- noch eine Tagschicht ein.”

$$z_{i,S} + z_{i+2,F} + z_{i+2,T} \leq 1$$

Die Eingabedateien für Optimierungssoftware sind “lesbar”

Beispiel von Nebenbedingungen (2/2) – .lp-Datei



Ungleichung (21)

```
+1 zuord(1_N) +1 zuord(2_F)
+1 zuord(2_S) +1 zuord(2_T)
<= 1
```

```
+1 zuord(2_N) +1 zuord(3_F)
+1 zuord(3_S) +1 zuord(3_T)
<= 1
```

[...]

```
+1 zuord(119_N) +1 zuord(120_F)
+1 zuord(120_S) +1 zuord(120_T)
<= 1
```

Ungleichung (23)

```
+1 zuord(1_S) +1 zuord(3_F)
+1 zuord(3_T)
<= 1
```

```
+1 zuord(2_S) +1 zuord(4_F)
+1 zuord(4_T)
<= 1
```

[...]

```
+1 zuord(119_S) +1 zuord(121_F)
+1 zuord(121_T)
<= 1
```

Tag i+2

Schicht-
lage früh

Modelle mit mehreren zehntausend Variablen können “gutartig” sein – andere weniger handlich...

Kennzahlen zu Optimierungsmodellen (1/2)

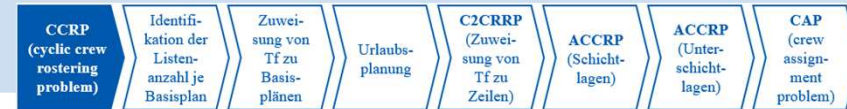
► CPLEX 22.1.0.0, Microsoft Azure Dasv5 size series VM

	CCRP (cyclic crew rostering problem)	...	ACCRP (Schicht- lagen)	ACCRP (Unter- schicht- lagen)	CAP (crew assign- ment problem)
Zeilen	3.613	...	111.418	178.824	906
Spalten	1.014	...	95.761	283.851	20.488
gzz. Var.	1.014	...	95.010	268.003	20.486
CPU Zeit [s]	652 ¹	...	25.933	14.349	1
Optim.lücke	optimal	...	0,25%	1,5%	optimal

1 Bei identischer Modellstruktur aber anderen Parameterwerten verblieb nach 10 Stunden CPU tlw. eine Lücke von 5%.

Aus den Protokollausgaben geht stets das beweisbare „optimality gap“ hervor - hier im Ergebnis 0,0%

Kennzahlen zu Optimierungsmodellen (2/2)



Reduced MIP has 3383 rows, 955 columns, and 31241 nonzeros; 955 binaries, 0 generals, 0 SOSs, and 0 indicators.
 Presolve time = 0.13 sec. (64.07 ticks); Probing time = 0.03 sec. (3.90 ticks)
 MIP emphasis: hidden feasible solutions; MIP search method: dynamic search
 Parallel mode: deterministic, using up to 16 threads.
 Root relaxation solution time = 0.30 sec. (180.30 ticks)

Nodes		Objective	IInf	Best Integer	Cuts/		Gap
Node	Left				Best Bound	ItCnt	
[...]							
987	729	8262.9583	220	-2450.0000	8350.0000	177924	440.82%
Elapsed time = 23.89 sec. (6521.68 ticks, tree = 9.69 MB, solutions = 8)							
1457	1073	8307.5314	213	-2450.0000	8350.0000	247594	440.82%
1979	1491	8312.2125	290	-2450.0000	8350.0000	308676	440.82%
* 2156+	1332			7630.0000	8350.0000		9.44%
2527	1857	8345.0099	303	7630.0000	8350.0000	360463	9.44%
[...]							
42743	26217	7995.6295	280	7820.0000	8090.3864	7263279	3.46%
* 42842+25893				8000.0000	8090.3864		1.13%
44176	14502	8086.3155	303	8000.0000	8090.2356	7492140	1.13%
Elapsed time = 408.47 sec. (106059.29 ticks, tree = 156.19 MB, solutions = 16)							
45953	14987	8060.3049	328	8000.0000	8089.2571	7656128	1.12%
[...]							
61995	3523	8010.8656	193	8000.0000	8052.9338	10134376	0.66%
Elapsed time = 595.69 sec. (148523.91 ticks, tree = 40.69 MB, solutions = 16)							
64531	3027	cutoff		8000.0000	8047.4521	10446051	0.59%
67616	1981	8010.8632	198	8000.0000	8036.7894	10744929	0.46%
[...]							
MIP - Integer optimal solution: Objective = 8.0000000000e+03							
Solution time = 651.98 sec. Iterations = 10939606 Nodes = 70223							

Bei der berechneten Lösung handelt es sich **beweisbar** um die **bestmögliche**!

Ist eine Planungsaufgabe für gesamthafte Lösung zu groß, gibt es Ansätze für Vereinfachungen

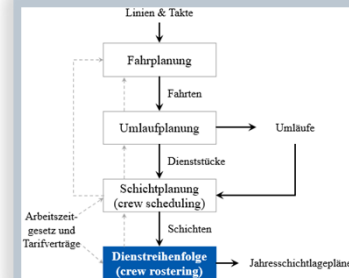
Grobe Übersicht verschiedener Ansätze für Vereinfachungen

- Setting: Planungsaufgabe ist per MILP modellierbar und konzeptionell exakt lösbar – aber praktisch zu schwer

Ansatz	Kurzbeschreibung	Ausgewählte Eigenschaften
Limits	Breche MILP-Solver nach Zeit- oder Speicherlimit ab	Gibt Gütegarantie für bis zum Abbruch berechnete Lösungen
Dekomposition	Zeitliche, räumliche und/oder strukturelle Aufteilung der Planungsaufgabe	Funktioniert, wenn „Schnitte“ bei möglichst geringer Interaktion
Heuristiken	z.B. naturanaloge Verfahren wie Genetische Algorithmen & co.	Viel Tuning von Parametern nötig, gute Performance möglich
Vereinfachende Annahmen	Verzichte gezielt auf einzelne Anforderungen, in der...	... in der „ <i>Hoffnung</i> “, etwaige Verletzungen „ <i>heilen</i> “ zu können
Vertiefende Mathematik	„Ask your mathematician“	<i>kann</i> funktionieren...

Validiere Qualität der erzielten Lösungen auf kleinen Instanzen!

Basisplan



Zeile	Mo	Di	Mi	Do	Fr	Sa	So	Ruhe	Arbeit
1	L	L	L	L	L	R	R	2	5
2	N	N	N	R	R	L	L	2	5
3	L	R	R	E/L	E/L	E/L	E/L	2	5
4	R	L	L	L	L	R	R	3	4
5	N	N	N	R	R	D	D	2	5
6	L	L	R	N	N	N	N	1	6
7	R	R	E	E	E	R	R	4	3
8	E	E	E	R	N	N	N	1	6
9	N	R	R	L	L	L	L	2	5
10	R	L	L	L	N	N	N	1	6
11	R	R	E	E	E	R	R	4	3
12	E	E	E	E	R	E	E	1	6
13	E/L	E/L	E/L	R	R	L	L	2	5
14	L	N	N	N	R	R	R	3	4
15	E	E	E	R	E	E	E	1	6
16	E	E	R	N	N	N	N	1	6
17	R	R	L	L	L	R	R	4	3
Ruhe	5	5	4	5	5	6	6	36	83
Early	4	4	5	4	4	3	3		27
Day	0	0	0	0	0	1	1		2
Late	5	5	5	5	4	3	3		30
Night	3	3	3	3	4	4	4		24

Bildquelle:
L., Türk &
Vornhusen
(eingereicht)

Der vorgestellte Basisplan verbindet homogene Verfügbarkeit Mo-Do mit vorteilhaften Strukturen



Features¹ des neuen Basisplans



- ▶ Arbeitsblöcke haben **mindestens drei Schichtantritte**
- ▶ Arbeitsblöcke haben **höchstens sechs Schichtantritte**
- ▶ Bei **Nachtschichten** werden **mind. drei in Folge** geplant
- ▶ Nach jedem **Nachtblock** gibt es **mind. zwei Ruhetage**
- ▶ In 17 Wochen gibt es nur **vier Wechsel von Schichtlagen** an aufeinander folgenden Tagen
- ▶ Auf jeden **Arbeitsblock** mit **mind. fünf Arbeitstagen** folgt eine **Ruhezeit** von **mind. 48 Stunden**
- ▶ In 17 Wochen gibt es **nur sieben isolierte Ruhetage**

Dennoch hat große Mehrheit von Tf Verbleib in ihren Basisplänen vorgezogen

¹ u.a. im Vergleich zu Turnussen, wie sie von Sodhi and Norris (2004) und Hartog et al. (2009) veröffentlicht wurden

Nachdem Tf zu Basisplänen zugeteilt wurden, müssen sie dort noch “Zeilen” zugeordnet werden

Crew to cyclic roster row problem (C2CRRP)



- ▶ Allgemeine Rahmenbedingung: Für eine **komplette Urlaubswoche werden fünf Urlaubstage angerechnet**
- ▶ WENN der Basisplan in einer Urlaubswoche 6 Schichtantritte besitzt, DANN wird ein Tag zu wenig gearbeitet!
- ▶ Aufgabenstellung: Nimm die initiale Zuteilung von Tf zu “Zeilen” ihrer Basispläne derart vor, dass...
 - ▶ ... nur so wenige Schichtantritte wie möglich durch ungünstig gelegene Urlaubswochen verloren gehen
 - ▶ ... an jedem Wochenende nur eine begrenzte Zahl an Tf, die keinen Urlaub haben, ein freies Wochenende hat

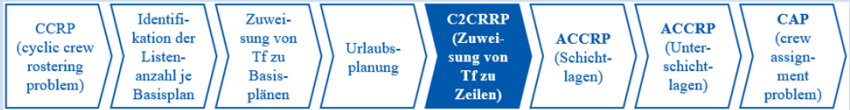
Tf 1 ist Zeile 5 zugeordnet

Zeile	Tag	Mo	Di	Mi	Do	Fr	Sa	So	Loss
5	01/01	N	N	N	R	R	D	D	5
6	01/08	L	L	R	N	N	N	N	6
7	01/15	R	R	E	E	E	R	R	3
8	01/22	E	E	E	R	N	N	N	
9	01/29	N	R	R	L	L	L	L	
10	02/05	R	L	L	L	N	N	N	
Sum									14

Tf 2 ist Zeile 8 zugeordnet

Zeile	Tag	Mo	Di	Mi	Do	Fr	Sa	So	Loss
8	01/01	E	E	E	R	N	N	N	
9	01/08	N	R	R	L	L	L	L	
10	01/15	R	L	L	L	N	N	N	
11	01/22	R	R	E	E	E	R	R	3
12	01/29	E	E	E	E	R	E	E	6
13	02/05	L	L	L	R	R	L	L	5
Sum									14

Individueller Urlaub an einem Arbeitstag gem. Basisplan



- C2CRRP Beispiel (1/2)
- Beide Tf verlieren während ihrer drei Urlaubswochen nur je 14 Schichtantritte (haben also einen Ruhetag “übrig”)

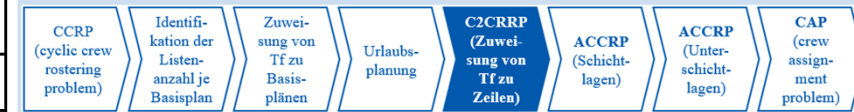
Tf 1 ist Zeile 8 zugeordnet

Zeile	Tag	Mo	Di	Mi	Do	Fr	Sa	So	Loss
8	01/01	E	E	E	R	N	N	N	6
9	01/08	N	R	R	L	L	L	L	5
10	01/15	R	L	L	L	N	N	N	6
11	01/22	R	R	E	E	E	R	R	
12	01/29	E	E	E	E	R	E	E	
13	02/05	L	L	L	R	R	L	L	
Sum									17

Tf 2 ist Zeile 5 zugeordnet

Zeile	Tag	Mo	Di	Mi	Do	Fr	Sa	So	Loss
5	01/01	N	N	N	R	R	D	D	
6	01/08	L	L	R	N	N	N	N	
7	01/15	R	R	E	E	E	R	R	
8	01/22	E	E	E	R	N	N	N	6
9	01/29	N	R	R	L	L	L	L	5
10	02/05	R	L	L	L	N	N	N	6
Sum									17

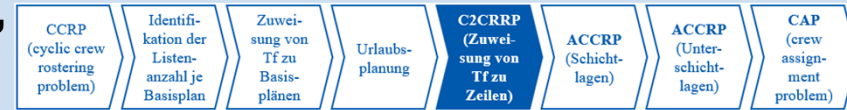
Individueller Urlaub an einem Arbeitstag gem. Basisplan



- C2CRRP
Beispiel (1/2)
- Bei *unverändertem* Basisplan und Urlaubswochen verlieren beide Tf in ihren drei Urlaubswochen je 17 Schichtantritte (müssen also zwei Tage “nacharbeiten”)

Über die Zuordnung der Einsprungwochen lassen sich gemeinsame freie Wochenenden gut steuern

Ermögliche mit Zuordnung von Zeilen sog. “Paarläufe”



► Zielstellung

Mitarbeiter*innen wünschen sich, gemeinsam mit anderen Kolleg*innen freie Wochenenden haben zu werden

► Beobachtung

Aufgrund identischer Abfolgen freier Wochenenden (1, 4, 7, 11, 14, 17) haben zwei Mitarbeiter*innen an *denselben* Wochenenden frei, wenn sie dieselbe Einsprungwoche haben – selbst wenn sie zwischen den freien Wochenenden nach grundverschiedenen Basisplänen arbeiten!

Von 263 Paarwünschen wurde die nachweislich größtmögliche Zahl realisiert

Ohne flexible Elemente ergäbe sich Jahresschichtlagenplan durch “Ausrollen” der Basispläne

Vom Basisplan zum Jahresschichtlagenplan



► Im Prinzip ergibt sich der Jahresschichtlagenplan eines Tf einfach durch “Ausrollen” seines Basisplans

► **Nutze flexible Elemente**, um tägliche Bedarfe gut zu decken

► **Beispiel**

Row	Mo	Tu	We	Th	Fr	Sa	Su	Rest	Work
1	L	L	L	L	L	R	R	2	5
2	N	N	N	R	R	L	L	2	5
3	L	R	R	E	E	E	E	2	5
4	R	L	L	L	L	R	R	3	4
5	N	N	N	R	R	D	D	2	5

Zeile	%	Jan 01	Jan 02	Jan 03	Jan 04	Jan 05	Jan 06	Jan 07	Jan 08	Jan 09	Jan 10	Jan 11	Jan 12	Jan 13	Jan 14
1	50%														
2	80%														
3	100%														
4	80%														
Sum	EDLN														

Color code

R	Zusätzlicher Ruhetag für Tf in Teilzeit
----------	---

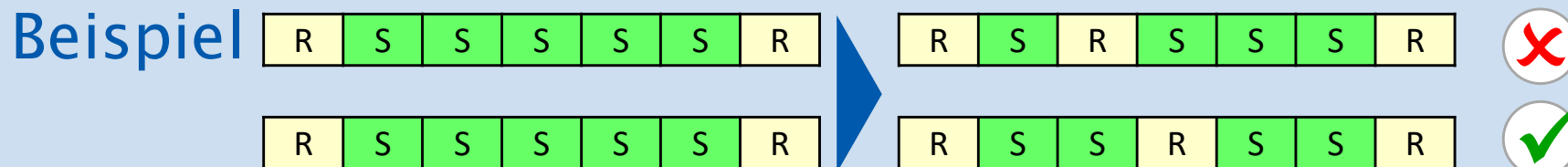
Frühschicht
in Tagschicht
geändert

Bei reiner Entnahme von Schichtantritten reduziert sich der Prüfaufwand – liegt aber *nicht* bei Null

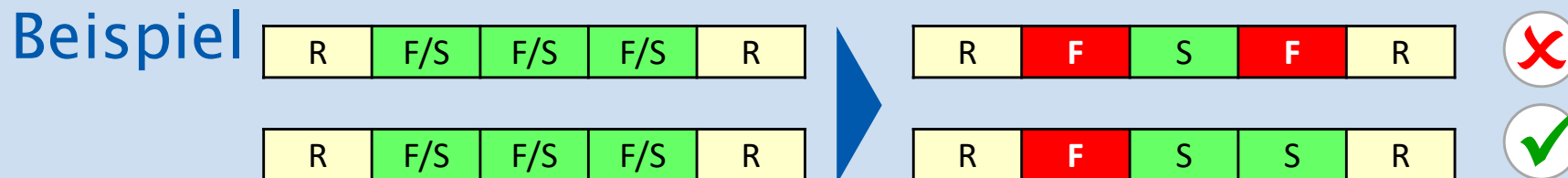
Prüfaufwand bei verschiedenen Planungsumfängen



- ▶ Bei aktiver Einplanung von Schichtlagen müssen diverse Anforderungen originär sichergestellt werden (Ruhezeiten, maximale Arbeitsfolgen etc.)
- ▶ Bei *Entnahme* von Schichtantritten (bspw. Teilzeit) müssen v.a. Mindestarbeitsblocklängen beachtet werden



- ▶ *Nur* bei Nutzung variabler Schichtlagen müssen zulässige Übergänge sichergestellt werden



In Jahresschichtlagenplanung sind insb. Bedarfe und Ergebnisse von Urlaubsplanung und EP Input

Übersicht der Modellbestandteile für JSLP (1/3) – Parameter & Variablen

Modellbestandteil	Optimierungsmodell zur Jahresschichtlagenplanung (JSLP)
Eingangsparameter	<ul style="list-style-type: none">▪ Basisplan jedes Mitarbeiters incl. variabler Schichten mit Einsprungswoche (Ergebnis EP)▪ Urlaubsplan jedes Mitarbeiters incl. freier Wochenenden vor Haupturlaub▪ Zielwert Anzahl Schichtantritte 2024 jedes Mitarbeiters (unter Berücksichtigung des Beschäftigungsgrads)▪ Bedarf an Schichtantritten je Kalendertag und Schichtlage
Variablen	<ul style="list-style-type: none">▪ Zuordnung einer Schichtlage oder einer Ruhe für jeden Mitarbeiter an jedem Kalendertag

Mengengerüst:
Rund 1200 Tf in
3 Einsatzbereichen,
365 Tage, 4 Schichtlagen

In Jahresschichtlagenplanung sind bei Nutzung flexibler Bestandteile Restriktionen zu beachten

Übersicht der Modellbestandteile für JSLP (2/3) – Restriktionen

Modellbestandteil	Optimierungsmodell zur Jahresschichtlagenplanung (JSLP)
Restriktionen	<ul style="list-style-type: none">▪ Einhaltung von minimaler und maximaler Anzahl von Schichtantritten in Folge (analog maximale Ruhetage, Schichten mit Nachtarbeitsanteil)▪ Einplanung von maximal zwei verschiedenen Schichtlagen zwischen zwei Ruhezeiten▪ Verbot von für Teilzeitkräfte anteilig zu großen Anzahlen an Schichtantritten z.B. in Quartalen (innerhalb von Toleranzen)▪ Verbot von Nachtschichten vor Urlaub▪ Verbot von unzulässig kurzen Übergängen (z.B. Spät-Früh), insb. bei variablen Schichtantritten▪ Verbot der Einplanung einzelner Nachtschichten

Gleichmäßige Bedarfsdeckung hat höchste Priorität – weitere Aspekte werden mit berücksichtigt

Übersicht der Modellbestandteile für JSLP (3/3) – Zielfunktion

Modellbestandteil	Optimierungsmodell zur Jahresschichtlagenplanung (JSLP)
Zielfunktion	<ul style="list-style-type: none">▪ minimiere verschiedene Kombinationen aus größter, mittlerer, absoluter bzw. relativer Unterschreitung des Bedarfs pro Tag und/oder pro Schichtlage▪ minimiere jede Unterschreitung des Zielwerts für Anzahl Schichtantritte 2024 eines Mitarbeiters▪ maximiere die Einplanung der bei variablen Schichten gem. Basisplan bevorzugten Schichtlage▪ minimiere die Anzahl einzelner Ruhetage▪ minimiere die Anzahl der Wechsel der Schichtlage bei zwei aufeinander folgenden Schichtantritten

Sowohl bei Bedarfsdeckung als auch bei günstigen Schichtfolgen wurden Verbesserungen realisiert

Ausgewählte Ergebnisse (1/2) – Schichtfolgen



► Bedarfsdeckung

- Signifikant geringere Bandbreiten bei der Bedarfsdeckung sowohl tageweise als auch je Schichtlage
→ Flexibilitätsbestandteile als ausreichend erwiesen
- **Hinweis:** *Insbesondere aufgrund der auch aktuell noch bestehenden Wettbewerbssituation muss leider auf die Angabe konkreter Werte verzichtet werden*

► Schichtfolgen

- Anteil der Tf, für die im Jahr mindestens 13 Schichtlagenwechsel (z.B. F-F-S-S) eingeplant wurden:
Vorher über 50% – nachher unter 10%

Ergebnis bereits durch Struktur der Basispläne begünstigt

Die günstigere Verteilung freier Wochenenden ist intrinsisches Ergebnis der Struktur der Basispläne

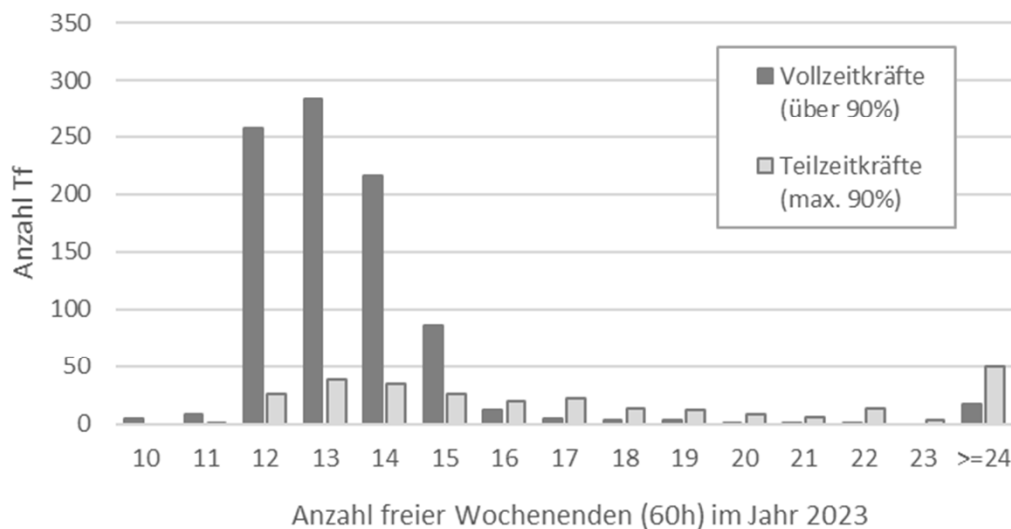
Ausgewählte Ergebnisse (2/2) – Freie Wochenenden



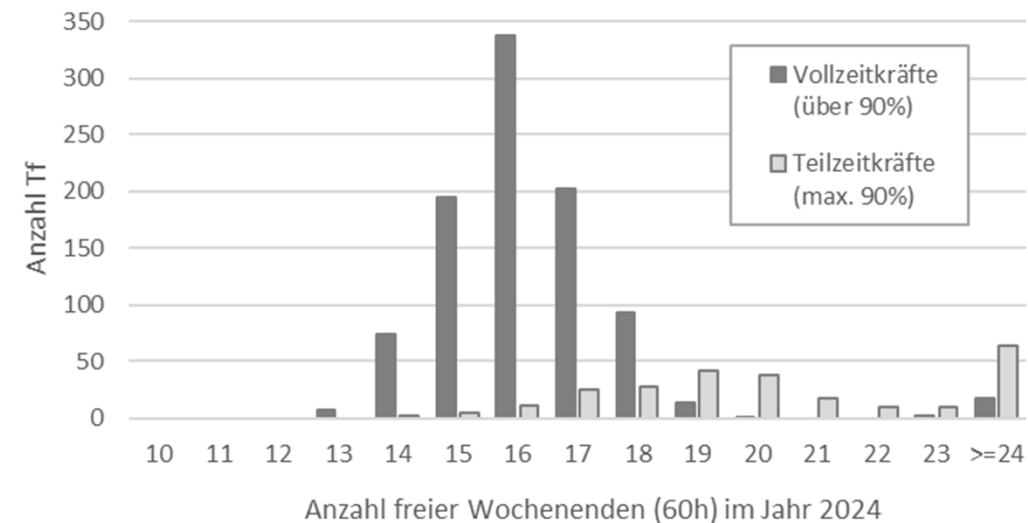
- Freie Wochenenden haben mind. 60h & umfassen Samstag & Sonntag vollständig (0-24)
- Tarifvertrag: “Mindestens eines pro Monat”

KEIN geringerer Bedarf an Sa/So – Ergebnis durch Struktur der Basispläne begünstigt

Verteilung freier Wochenenden im Jahr 2023



Verteilung freier Wochenenden im Jahr 2024



Bildquelle: L. et al., “Individuelle Optimierungslösungen für die Personaleinsatzplanung eines...”, Der Nahverkehr (3/2024)

Durch rückwärts rollierende Schichtfolgen lassen sich Ruhezeiten um mehrere Stunden verlängern

Ruhezeitverlängerung durch rückwärts Rollieren



► Beispiel (*fiktive* Zeitwerte)

sog. „Unterschichtlagen“

	Schichtlage gesamt	frühe Schicht („1“)	späte Schicht („2“)
Früh (F)	3:30 – 16:30	3:30 – 14:30	5:30 – 16:30
Spät (S)	11:30 – 0:30	11:30 – 22:30	13:30 – 0:30
Nacht (N)	19:30 – 8:30	19:30 – 6:30	21:30 – 8:30

► Gegenüberstellung

► vorw. rollierend:



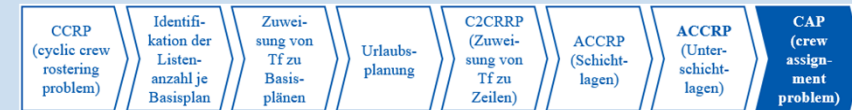
stets Einhaltung der
täglichen Ruhezeit (11h)

► rückw. rollierend:



Seit Mai 2025 erfolgt die tägliche Zuteilung von Schichten zu Tf mit mathematischer Optimierung

Crew Assignment Problem (CAP) – Ausgewählte Ziele



- ▶ Etwa 10 Tage im voraus werden typischerweise 450-600 verfügbaren Tf **spezifische Schichten zugeordnet**
- ▶ Zuordnungsproblem hat einfache mathematische Struktur
- ▶ Herausforderung besteht in Abwägung diverser Teilziele:
 - ▶ **ausgeglichene Arbeitszeitkonten**
(insb. zur Vermeidung von Überstunden)
 - ▶ **Erhalt von Streckenkenntnis**
 - ▶ **Qualifikationserhalt für Baureihen**
 - ▶ **Zuordnung individuell bevorzugter Einsatzstellen**
 - ▶ **Sicherstellung von Abwechslung über letzte 5 Tage**



Zusammenfassung

- ▶ Nach drei Jahren individueller Jahresschichtlagenpläne nutzt die S-Bahn Berlin **seit 2024** wieder Basispläne
- ▶ Die neuen **Basispläne** enthalten **flexible Elemente** – deren Nutzung führt nach “Ausrollen” der Basispläne auf **ausgewogene, faire, und effiziente Jahresschichtlagepläne**
- ▶ Bereits im ersten Einsatzjahr wurden **drei weitere Optimierungsmodelle** im Kontext von Crew Rostering gelöst
- ▶ **Seit Mai 2025** wird **Crew Assignment** täglich mit Optimierungsmodellen mit maßgeschneiderter Zielfunktion gelöst
- ▶ **Seit 2026** ist **ein neuer optimierter Basisplan** im Einsatz

► Herzlichen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

