



# Individuelle Optimierungslösungen für die Personaleinsatzplanung eines Verkehrsunternehmens

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

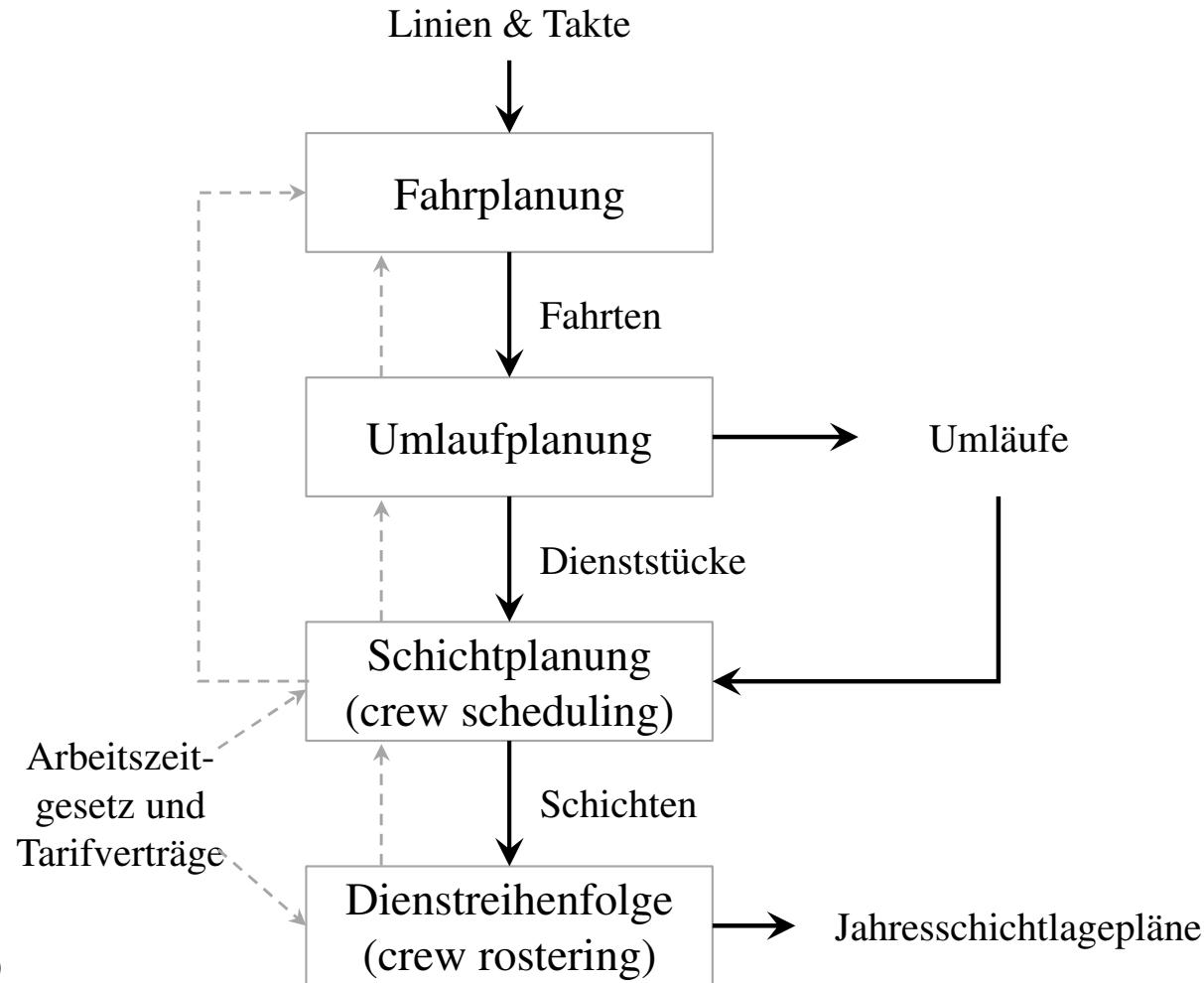
Verkehrswissenschaftliches Kolloquium der TH Wildau

## 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](http://www.tagesspiegel.de) (12.08.2025), [sbahn.berlin](http://sbahn.berlin) (12.08.2025) und [www.deviantart.com/david9122](http://www.deviantart.com/david9122) (09.08.2025)

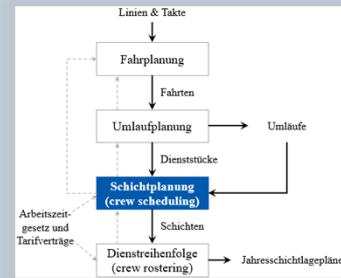
# Beispiel-schicht

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

Schichtbeginn	<b>04:59</b>	Schichtende	<b>01:45</b>	Schichtdauer	<b>20:46</b>
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	<b>04:59</b>		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	<b>05:51</b>	BMDF	<b>05:53</b>	3	FPLO: 223
6	B	Frw			BMDF	05:53		05:58		
7	Tf	S73-12	48.1	005001	BMDF	<b>05:58</b>	BSTN	<b>06:29</b>	1	FPLO: 223
8	B	Frw			BSTN	06:29		06:34		
9	Tf	S73-12	48.1	007002	BSTN	<b>06:34</b>	BPDH	<b>08:13</b>	896	FPLO: 223
10	B	Frw			BPDH	08:13		08:18		
11	Tf	S73-12	48.1	001003	BPDH	<b>08:18</b>	BORB	<b>09:49</b>	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	<b>10:25</b>	BNB	<b>11:05</b>	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	<b>11:35</b>	BBER	<b>12:08</b>	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	<b>12:21</b>	BBFD	<b>13:29</b>	3	FPLO: 223



# Im Eisenbahnwesen haben Gewerkschaften recht hohe persönliche Planungssicherheit erzielt

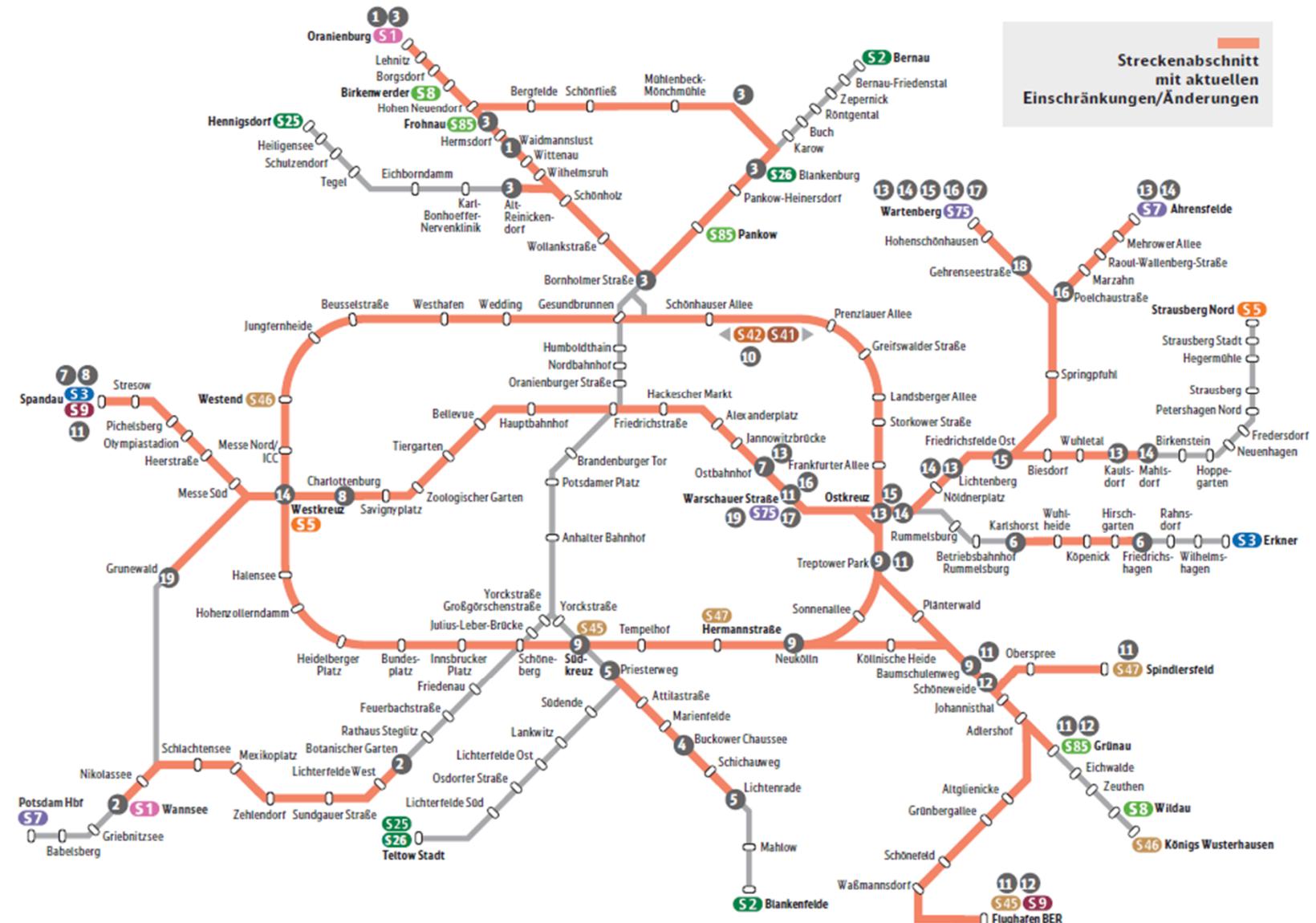


Persönliche Planungssicherheit im Geltungsbereich des BuRa-ZugTV (GDL)

- ▶ §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

Sehr langer zeitlicher  
Vorlauf der Planung

Präzision der  
Schichtplanung  
minutengenau

Sehr hohes Aufkommen  
an Änderungen am  
Netzfahrplan  
(insb. baubedingt)

- 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	Ruhe	Früh	Ruhezeit	Spät	Ruhe	Spät
Spez Schichten	F2	Ruhe	F1	Ruhezeit	S2	Ruhe	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

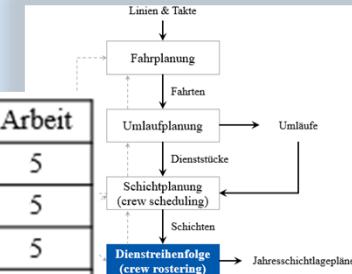
Merkmale	Zuordnung konkreter Schichten	Zuordnung von Schichtlagen
Möglichkeit der Planung „spitzer Abfolgen“ von Schichten & Ruhezeiten	Arbeitgeber:   Arbeitnehmer:  ?	Arbeitgeber:   Arbeitnehmer:  ?
Hohe persönliche Planungssicherheit		
Anpassungsfähigkeit an insb. baubedingte Änderungen des Verkehrsangebots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

## 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

Schichtlagenplanung  
auf Grundlage fester  
Basispläne

2021-2023

Individuelle  
Schichtlagen-  
planung

ab 2024

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*“)

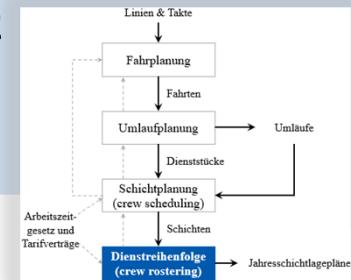
Zeitliche Verfügbarkeit aller Lokführer in **Ruhetagsplänen** bzw. **Roster** („*Angebot*“)

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

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

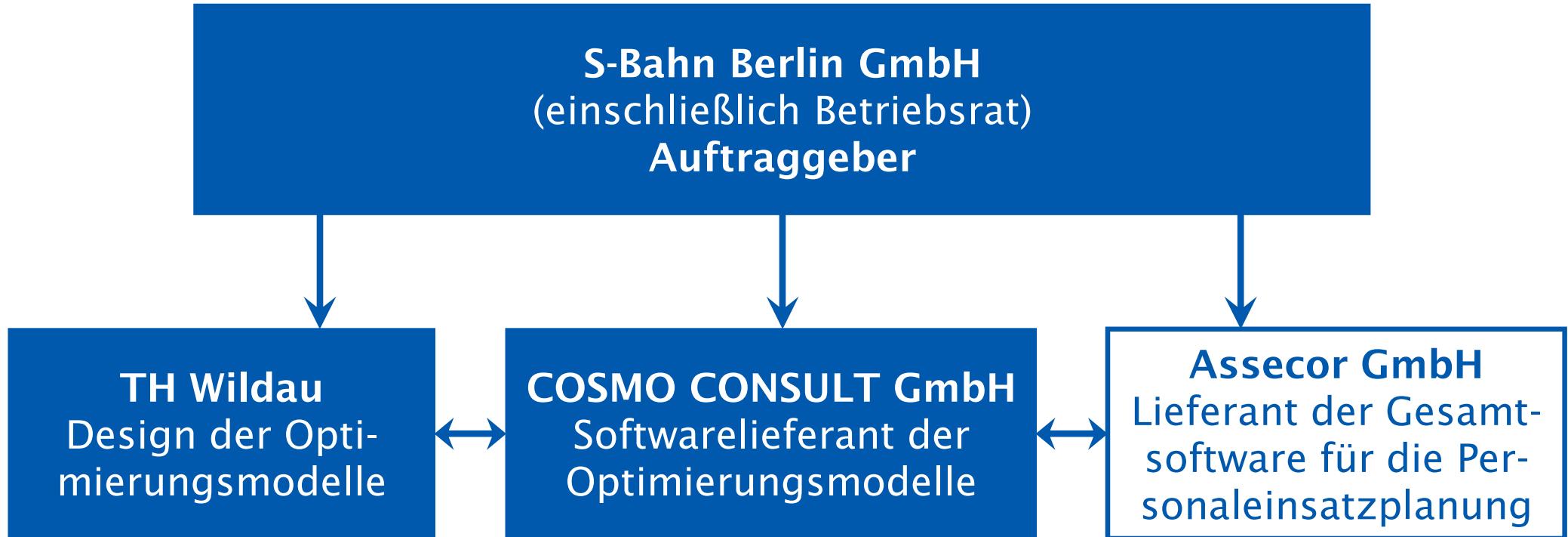
# Personaleinsatzplanung Crew Rostering besteht aus mehr als nur einer Teilaufgabe

## Überblick über die Teilaufgaben von Crew Rostering und Crew Assignment



<b>CCRP</b> (cyclic crew rostering problem)	Identifikation der Listenanzahl je Basisplan	Zuweisung von Tf zu Basisplänen	Urlaubsplanung	<b>C2CRRP</b> (Zuweisung von Tf zu Zeilen)	<b>ACCRP</b> (Schichtlagen)	<b>ACCRP</b> (Unterschichtlagen)	<b>CAP</b> (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 Ruhens)
- ▶ 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	Zusätzliche Flexibilitätsmerkmale im Prozess
<b>Variable Schichtlagen</b> Entscheide in Jahresschichtlagenplanung für in Basisplänen definierte Schichtantritte, ob sie zur Bedarfsdeckung als F/S/N genutzt werden sollen	<b>Entnahme Teilzeit</b> 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)
<b>Z-Schichten</b> 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	 A small icon of a stopwatch, indicating time or timing.

# 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 **nie** frühere folgen
- ... darf ein Nachtarbeitsblock **nie** unmittelbar von einem weiteren Nachtarbeitsblock gefolgt werden
- ... **müssen** auf eine Nachschicht 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

Modell-bestandteil	Lineares Gleichungs-system (LGS)	Lineares Optimierungsproblem (LP)	gemischt-ganzzahlig lineares Optimierungsproblem (MILP)
<b>Zielfunktion</b>	✗	$\min cx$	$\min cx$
<b>Restriktionen (Gleichungen)</b>	$Ax = b$	$Ax = b$	$Ax = b$
Restriktionen (Ungleichungen)	✗	$x \geq 0$	$x \geq 0$
<b>Variablen (kontinuierlich)</b>	$x \in \mathbb{R}^n$	$x \in \mathbb{R}^n$	$x \in \mathbb{R}^n$
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 Modellierungsmöglichkeiten!

löst viele LP's

löst viele LGS

# Ganzzahlige lineare Optimierung ist zur Lösung der Teilaufgaben geeignet

## Mathematische Optimierungsmodelle (allgemein)

- Allgemeine Form eines sog. gemischt-ganzzahligen linearen Optimierungsmodells

Zielfunktion
Restriktionen
Variablen

$$\begin{array}{ll} \min & c^T x \\ \text{s.t.} & Ax \leq b \\ & x \text{ gzz.} \end{array}$$

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 verbietende 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 Nachschicht (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) – .Ip-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

Schichtlage 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 <sup>1</sup>	...	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		Cuts/			
Node	Left	Objective	IInf	Best Integer	Best Bound	ItCnt	Gap
[...]							
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

## Große Übersicht verschiedener Ansätze für Vereinfachungen

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

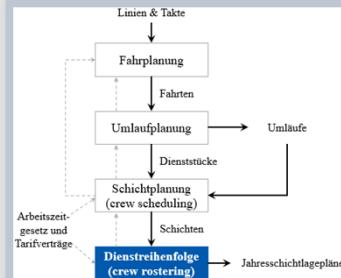
Ansatz	Kurzbeschreibung	Ausgewählte Eigenschaften
Limits	Breche MILP-Solver nach Zeit- oder Speicherlimit ab	Gibt <u>Gütegarantie</u> für bis zum Abbruch berechnete Lösungen
Dekomposition	Zeitliche, räumliche und/oder strukturelle Aufteilung der Planungsaufgabe	Funktioniert, wenn „Schnitte“ bei möglichst 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 „heilen“ zu können
Vertiefende Mathematik	„Ask your mathematician“	<i>kann</i> funktionieren...

Validiere Qualität der erzielten Lösungen auf kleinen Instanzen!

# Basis-plan

Bildquelle:  
L., Türk &  
Vornhusen  
(eingereicht)

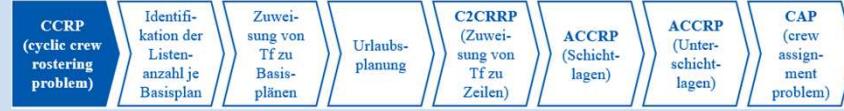
Zeile	Mo	Di	Mi	Do	Fr	Sa	So	Ruhe	Arbeit
1	L	L	L	L	L	R	R	2	5
2	N	N	N	R	R	L	L	2	5
3	L	R	R	E/L	E/L	E/L	E/L	2	5
4	R	L	L	L	L	R	R	3	4
5	N	N	N	R	R	D	D	2	5
6	L	L	R	N	N	N	N	1	6
7	R	R	E	E	E	R	R	4	3
8	E	E	E	R	N	N	N	1	6
9	N	R	R	L	L	L	L	2	5
10	R	L	L	L	N	N	N	1	6
11	R	R	E	E	E	R	R	4	3
12	E	E	E	E	R	E	E	1	6
13	E/L	E/L	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
<b>Early</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>3</b>		<b>27</b>
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



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

## Features<sup>1</sup> 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

<sup>1</sup> 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

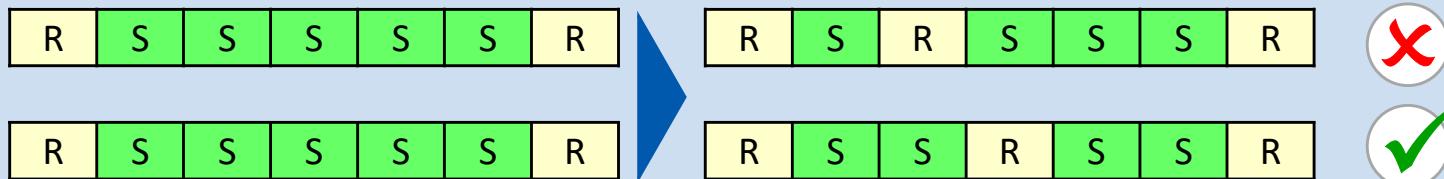
# Bei reiner Entnahme von Schichtanritten reduziert sich der Prüfaufwand – liegt aber *nicht* bei Null

## Prüfaufwand bei verschiedenen Planungsumfängen



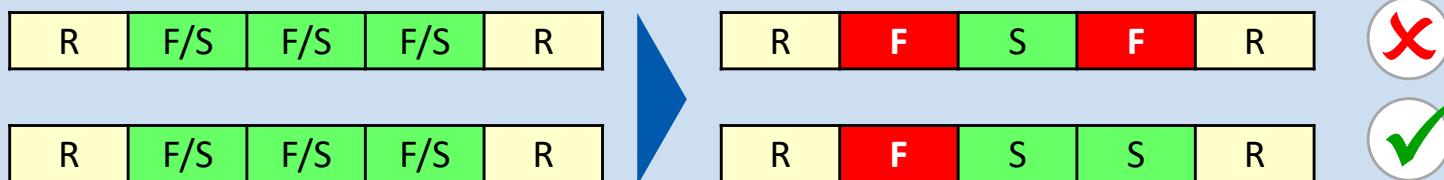
- Bei aktiver Einplanung von Schichtlagen müssen diverse Anforderungen originär sichergestellt werden (Ruhezeiten, maximale Arbeitsfolgen etc.)
- Bei *Entnahme* von Schichtanritten (bspw. Teilzeit) müssen v.a. Mindestarbeitsblocklängen beachten werden

Beispiel



- Nur bei Nutzung variabler Schichtlagen müssen zulässige Übergänge sichergestellt werden

Beispiel



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

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

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

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

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

# Gleichmäßige Bedarfsdeckung hat höchste Priorität – weitere Aspekte werden mit berücksichtigt

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

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

# 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

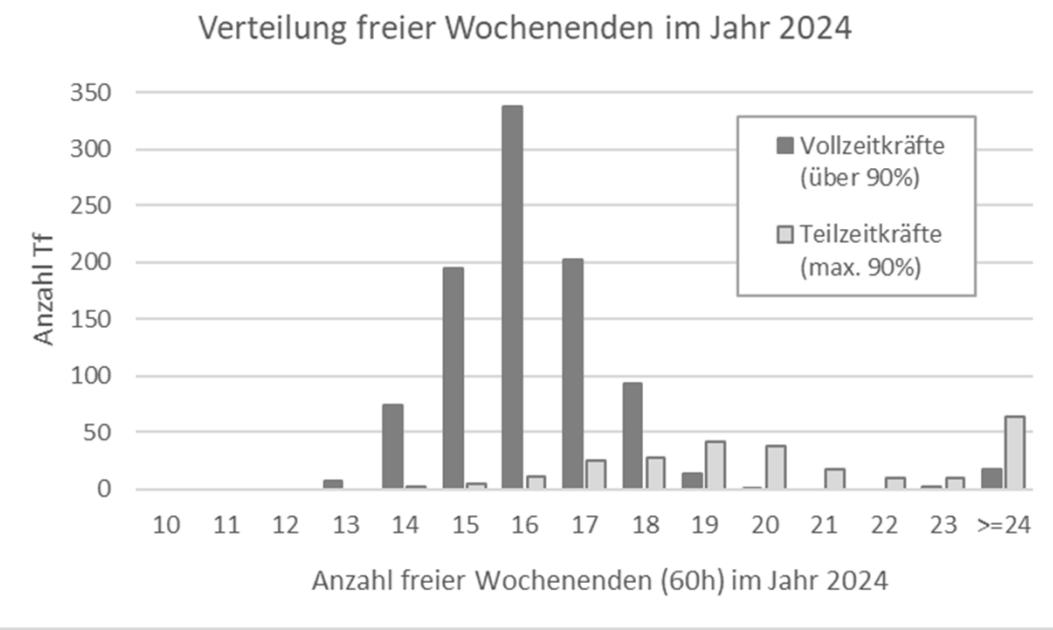
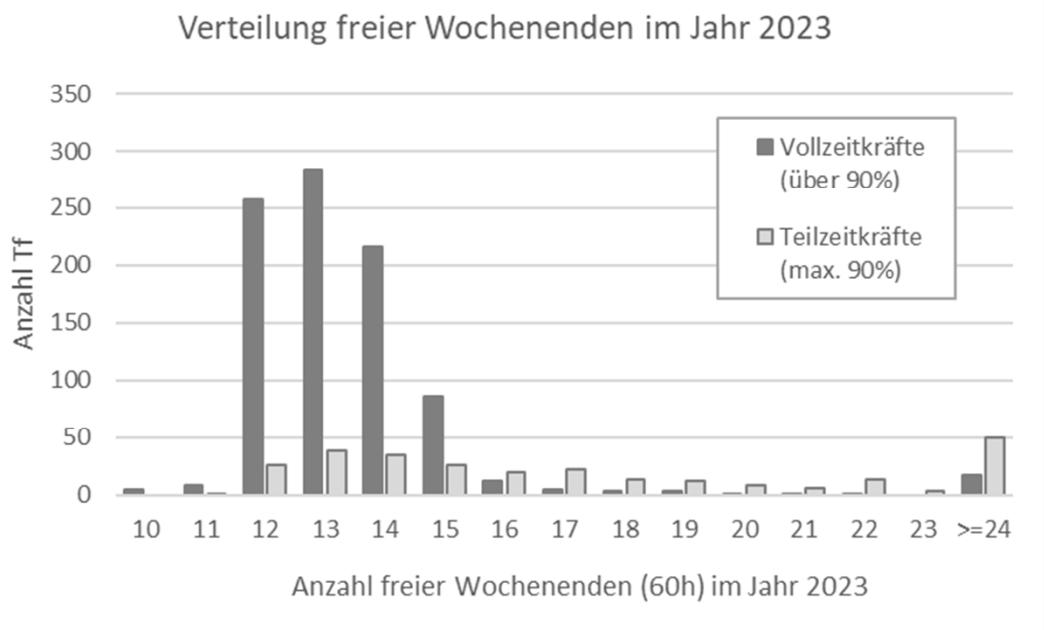
# Die günstigere Verteilung freier Wochenenden ist intrinsisches Ergebnis der Struktur der Basispläne

## 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



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)

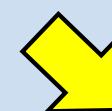


sog. „Unterschichtlagen“

	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:

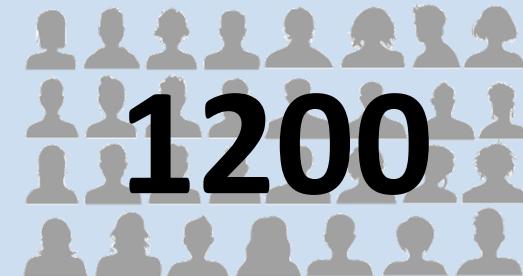


# Seit Mai 2025 erfolgt die tägliche Zuteilung von Schichten zu Tf mit mathematischer Optimierung

## 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!



Prof. Dr.  
**Christian Liebchen**  
Verkehrsbetriebsführung  
Fachbereich Ingenieur- und  
Naturwissenschaften (INW)  
*Faculty of Engineering and  
Natural Sciences*

Hochschulring 1  
15745 Wildau  
Germany  
T +49 3375 508-755  
M +49 160 97439834  
[christian.liebchen@th-wildau.de](mailto:christian.liebchen@th-wildau.de)  
[www.th-wildau.de](http://www.th-wildau.de)