

Vorlesung 12: Modellierung B

Grundlagen Operations Research

Prof. Dr. Knut Haase

Modellierung B

OR in der Praxis



Von der Theorie zur Praxis

Echte OR-Projekte und wie sie die Bausteine dieses Kurses nutzen:

Von der Theorie zur Praxis

Echte OR-Projekte und wie sie die Bausteine dieses Kurses nutzen:

- **Brauerei:** Losgrößen- und Kapazitätsplanung (→ V11).

Von der Theorie zur Praxis

Echte OR-Projekte und wie sie die Bausteine dieses Kurses nutzen:

- **Brauerei:** Losgrößen- und Kapazitätsplanung (→ V11).
- **Verkaufsgebiete:** Sales Force Deployment (→ V10).

Von der Theorie zur Praxis

Echte OR-Projekte und wie sie die Bausteine dieses Kurses nutzen:

- **Brauerei:** Losgrößen- und Kapazitätsplanung (→ V11).
- **Verkaufsgebiete:** Sales Force Deployment (→ V10).
- **Distriktoptimierung:** Zuordnung von Gebieten (→ V08).

Von der Theorie zur Praxis

Echte OR-Projekte und wie sie die Bausteine dieses Kurses nutzen:

- **Brauerei:** Losgrößen- und Kapazitätsplanung (→ V11).
- **Verkaufsgebiete:** Sales Force Deployment (→ V10).
- **Distriktoptimierung:** Zuordnung von Gebieten (→ V08).
- **Discrete Choice:** Nachfrageprognose mit Nutzenfunktionen.

Von der Theorie zur Praxis

Echte OR-Projekte und wie sie die Bausteine dieses Kurses nutzen:

- **Brauerei:** Losgrößen- und Kapazitätsplanung (→ V11).
- **Verkaufsgebiete:** Sales Force Deployment (→ V10).
- **Distriktoptimierung:** Zuordnung von Gebieten (→ V08).
- **Discrete Choice:** Nachfrageprognose mit Nutzenfunktionen.
- **Crowd-Management:** Ablaufplanung von Pilgerströmen (→ V06/V09).

Von der Theorie zur Praxis

Echte OR-Projekte und wie sie die Bausteine dieses Kurses nutzen:

- **Brauerei:** Losgrößen- und Kapazitätsplanung (→ V11).
- **Verkaufsgebiete:** Sales Force Deployment (→ V10).
- **Distriktoptimierung:** Zuordnung von Gebieten (→ V08).
- **Discrete Choice:** Nachfrageprognose mit Nutzenfunktionen.
- **Crowd-Management:** Ablaufplanung von Pilgerströmen (→ V06/V09).
- **Weitere:** Onlinehandel, Bibliotheken, Stadion, Metro.

Brauerei

Feldschlösschen

A large, polished wooden barrel, likely a Feldschlösschen barrel, is the central focus. It features a prominent metal band with a handle. The barrel is set against a blurred background of a wooden structure, possibly a chair or part of a building.

Das Projekt

Entwickelt für die Schweizer Brauerei **Feldschlösschen**, seit 2010 im Carlsberg-Konzern:

Das Projekt

Entwickelt für die Schweizer Brauerei **Feldschlösschen**, seit 2010 im Carlsberg-Konzern:

- **41** eigene Biermarken, **1,8 Mio. hl/Jahr**, 42 % Marktanteil (Schweiz).

Das Projekt

Entwickelt für die Schweizer Brauerei **Feldschlösschen**, seit 2010 im Carlsberg-Konzern:

- **41** eigene Biermarken, **1,8 Mio. hl/Jahr**, 42 % Marktanteil (Schweiz).
- Für **strategische** Fragen (Sortiment, Investitionen) und **operative** (Losgrößen, Kapazitätseinsatz).

Das Projekt

Entwickelt für die Schweizer Brauerei **Feldschlösschen**, seit 2010 im Carlsberg-Konzern:

- **41** eigene Biermarken, **1,8 Mio. hl/Jahr**, 42 % Marktanteil (Schweiz).
- Für **strategische** Fragen (Sortiment, Investitionen) und **operative** (Losgrößen, Kapazitätseinsatz).
- **13** Produktions- und **8** Lagerressourcen.

Das Projekt

Entwickelt für die Schweizer Brauerei **Feldschlösschen**, seit 2010 im Carlsberg-Konzern:

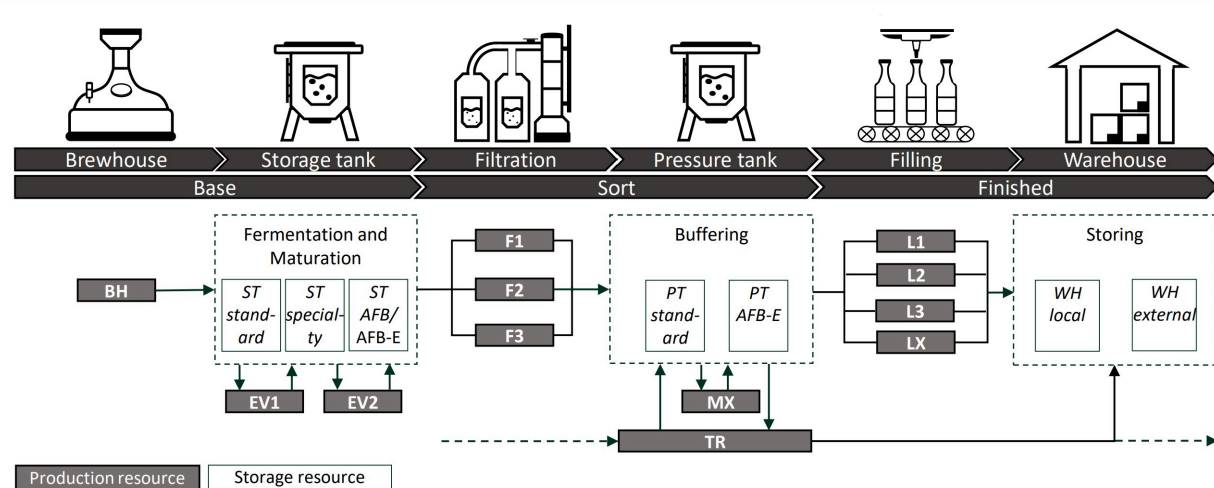
- **41** eigene Biermarken, **1,8 Mio. hl/Jahr**, 42 % Marktanteil (Schweiz).
- Für **strategische** Fragen (Sortiment, Investitionen) und **operative** (Losgrößen, Kapazitätseinsatz).
- **13** Produktions- und **8** Lagerressourcen.
- **220** Fertig- und **100** Halbfertigprodukte.

Das Projekt

Entwickelt für die Schweizer Brauerei **Feldschlösschen**, seit 2010 im Carlsberg-Konzern:

- **41** eigene Biermarken, **1,8 Mio. hl/Jahr**, 42 % Marktanteil (Schweiz).
- Für **strategische** Fragen (Sortiment, Investitionen) und **operative** (Losgrößen, Kapazitätseinsatz).
- **13** Produktions- und **8** Lagerressourcen.
- **220** Fertig- und **100** Halbfertigprodukte.
- Jahresplanung auf **Wochenebene**.

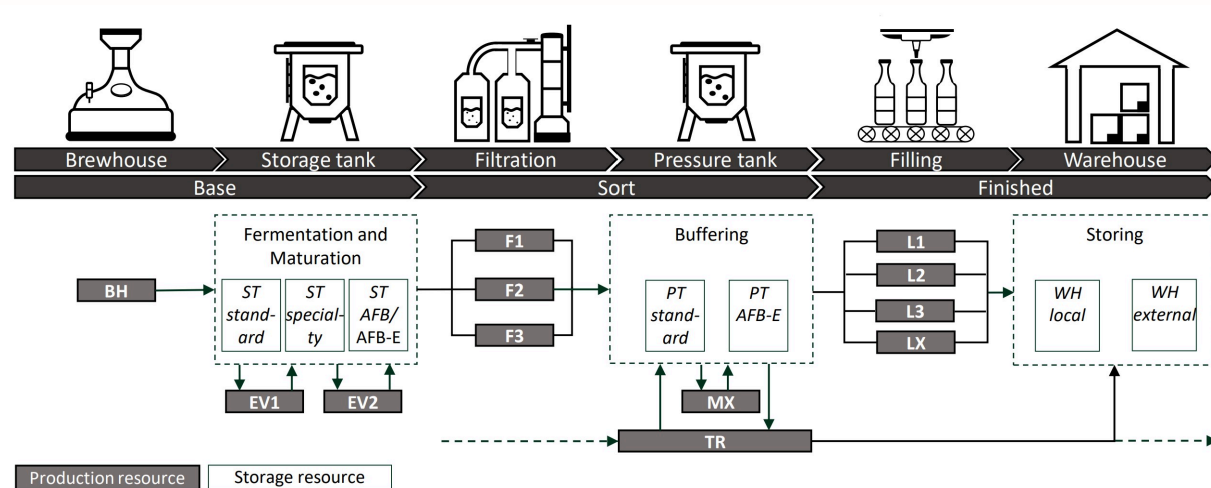
Der Brauprozess



Storage resource types: storage tank (ST), pressure tank (PT), and warehouse (WH)

Production resource types: brewhouse (BH), filtration line (F), filling line/station (L), evaporation station (EV), mixing station (MX), and transfer station (TR)

Der Brauprozess

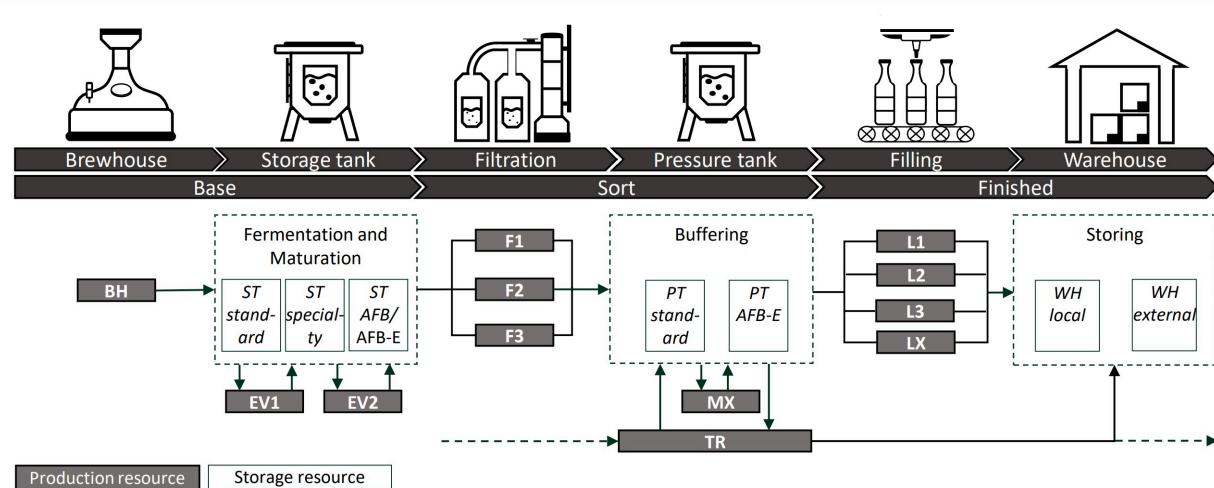


Storage resource types: storage tank (ST), pressure tank (PT), and warehouse (WH)

Production resource types: brewhouse (BH), filtration line (F), filling line/station (L), evaporation station (EV), mixing station (MX), and transfer station (TR)

- Brauen, Gären und Reifen, Filtrieren, Abfüllen.

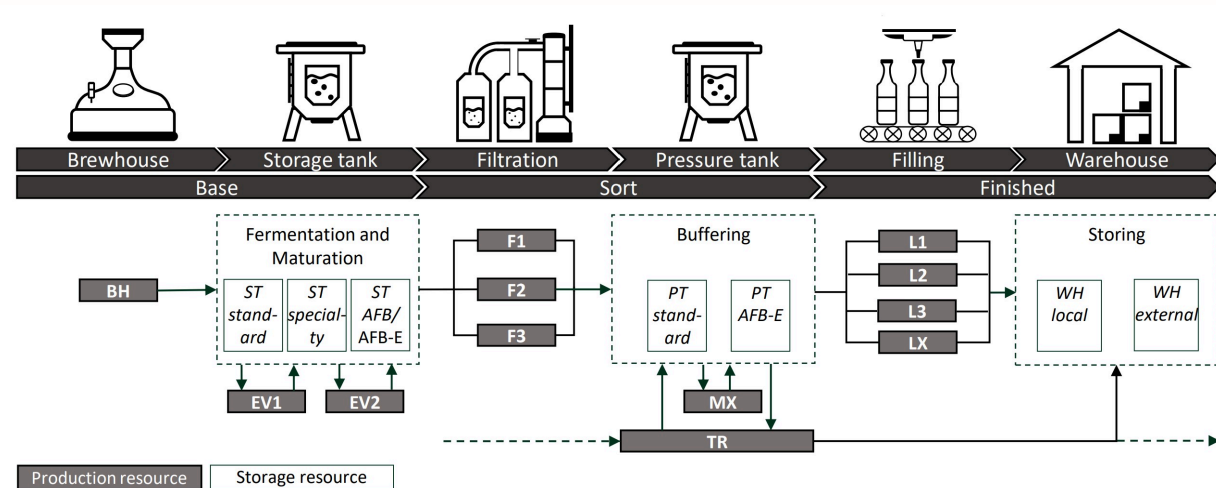
Der Brauprozess



Storage resource types: storage tank (ST), pressure tank (PT), and warehouse (WH)
 Production resource types: brewhouse (BH), filtration line (F), filling line/station (L), evaporation station (EV), mixing station (MX), and transfer station (TR)

- Brauen, Gären und Reifen, Filtrieren, Abfüllen.
- Alkoholfreies Bier und Mischbier: zusätzlich Verdampfen und Mischen.

Der Brauprozess



Storage resource types: storage tank (ST), pressure tank (PT), and warehouse (WH)
Production resource types: brewhouse (BH), filtration line (F), filling line/station (L), evaporation station (EV), mixing station (MX), and transfer station (TR)

- Brauen, Gären und Reifen, Filtrieren, Abfüllen.
- Alkoholfreies Bier und Mischbier: zusätzlich Verdampfen und Mischen.
- Tanks puffern zwischen den Stufen.

Das Modell

Strategische **und** operative Fragen in einem Modell:

Das Modell

Strategische **und** operative Fragen in einem Modell:

- **Losgrößen- und Kapazitätsplanung**, wie die dynamische Losgrößenplanung (Vorlesung 11), nur **mehrstufig** und **kapazitiert**.

Das Modell

Strategische **und** operative Fragen in einem Modell:

- **Losgrößen- und Kapazitätsplanung**, wie die dynamische Losgrößenplanung (Vorlesung 11), nur **mehrstufig** und **kapazitiert**.
- Binäre **Rüstentscheidungen**, kontinuierliche **Mengen** und **Lagerbestände**.

Das Modell

Strategische **und** operative Fragen in einem Modell:

- **Losgrößen- und Kapazitätsplanung**, wie die dynamische Losgrößenplanung (Vorlesung 11), nur **mehrstufig** und **kapazitiert**.
- Binäre **Rüstentscheidungen**, kontinuierliche **Mengen** und **Lagerbestände**.
- Ziel: **Rüst-, Lager- und Kapazitätskosten** minimieren.

Das Modell

Strategische **und** operative Fragen in einem Modell:

- **Losgrößen- und Kapazitätsplanung**, wie die dynamische Losgrößenplanung (Vorlesung 11), nur **mehrstufig** und **kapazitiert**.
- Binäre **Rüstentscheidungen**, kontinuierliche **Mengen** und **Lagerbestände**.
- Ziel: **Rüst-, Lager- und Kapazitätskosten** minimieren.

Ein **MIP**, in GAMS implementiert und mit CPLEX gelöst; für die volle Größe in der Heuristik **Fix-and-Optimize** (Vorlesung 11).

Die Idee im Kleinen

Zwei Produkte, gemeinsame Kapazität; das V11-Modell wächst mit:

```
1 using JuMP, HiGHS
2 d = [40 50 60 40 50 60; 20 30 20 30 20 30]      # d[p, t]
3 f, h, cap = 100, 1, 120
4 P, T = 1:2, 1:6
5 modell = Model(HiGHS.Optimizer); set_silent(modell)
6 @variable(modell, Q[P, T] >= 0); @variable(modell, I[P, T] >= 0)
7 @variable(modell, X[P, T], Bin)
8 @objective(modell, Min, sum(f*X[p,t] + h*I[p,t] for p in P, t in T))
9 @constraint(modell, [p in P, t in T],
10      (t == 1 ? 0 : I[p,t-1]) + Q[p,t] - I[p,t] == d[p,t])    # Lagerbilanz
11 @constraint(modell, [p in P, t in T], Q[p,t] <= sum(d[p,:]) * X[p,t])
12 @constraint(modell, [t in T], sum(Q[p,t] for p in P) <= cap) # Kapazität!
13 optimize!(modell)
14 println("F* = ", round{Int, objective_value(modell)},
15      " mit ", round{Int, sum(value.(X))}, " Rüstvorgängen")
```

Die Idee im Kleinen

Zwei Produkte, gemeinsame Kapazität; das V11-Modell wächst mit:

```
1 using JuMP, HiGHS
2 d = [40 50 60 40 50 60; 20 30 20 30 20 30]      # d[p, t]
3 f, h, cap = 100, 1, 120
4 P, T = 1:2, 1:6
5 modell = Model(HiGHS.Optimizer); set_silent(modell)
6 @variable(modell, Q[P, T] >= 0); @variable(modell, I[P, T] >= 0)
7 @variable(modell, X[P, T], Bin)
8 @objective(modell, Min, sum(f*X[p,t] + h*I[p,t] for p in P, t in T))
9 @constraint(modell, [p in P, t in T],
10      (t == 1 ? 0 : I[p,t-1]) + Q[p,t] - I[p,t] == d[p,t])    # Lagerbilanz
11 @constraint(modell, [p in P, t in T], Q[p,t] <= sum(d[p,:]) * X[p,t])
12 @constraint(modell, [t in T], sum(Q[p,t] for p in P) <= cap) # Kapazität!
13 optimize!(modell)
14 println("F* = ", round{Int, objective_value(modell)},
15      " mit ", round{Int, sum(value.(X))}, " Rüstvorgängen")
```

F* = 850 mit 6 Rüstvorgängen

Das Planungswerkzeug

Ein **Entscheidungsunterstützungssystem** in der Cloud:

Das Planungswerkzeug

Ein **Entscheidungsunterstützungssystem** in der Cloud:

- **Eingabe:** Produkte, Ressourcen und Nachfrage, mit Prüfbericht zu Fehlern und Warnungen.

Das Planungswerkzeug

Ein **Entscheidungsunterstützungssystem** in der Cloud:

- **Eingabe:** Produkte, Ressourcen und Nachfrage, mit Prüfbericht zu Fehlern und Warnungen.
- **Optimierung:** zentral auf einem Hochleistungsrechner, nahezu optimal in vertretbarer Rechenzeit.

Das Planungswerkzeug

Ein **Entscheidungsunterstützungssystem** in der Cloud:

- **Eingabe:** Produkte, Ressourcen und Nachfrage, mit Prüfbericht zu Fehlern und Warnungen.
- **Optimierung:** zentral auf einem Hochleistungsrechner, nahezu optimal in vertretbarer Rechenzeit.
- **Ausgabe:** Losgrößen, Bestände und Kapazitäten, mit Kennzahlen wie Auslastung, Kosten, Rüstvorgängen und Lagerdauer.

Das Planungswerkzeug

Ein **Entscheidungsunterstützungssystem** in der Cloud:

- **Eingabe:** Produkte, Ressourcen und Nachfrage, mit Prüfbericht zu Fehlern und Warnungen.
- **Optimierung:** zentral auf einem Hochleistungsrechner, nahezu optimal in vertretbarer Rechenzeit.
- **Ausgabe:** Losgrößen, Bestände und Kapazitäten, mit Kennzahlen wie Auslastung, Kosten, Rüstvorgängen und Lagerdauer.

! Ergebnis

5 % weniger Betriebskosten und 40 % weniger Planungsaufwand.

Verkaufsgebiete

Sales Force Deployment

Für die dänische Brauerei **FAXE**: Wie setzt man den Außendienst optimal ein?

Vier Entscheidungen **in einem Modell**:

Sales Force Deployment

Für die dänische Brauerei **FAXE**: Wie setzt man den Außendienst optimal ein?

Vier Entscheidungen **in einem Modell**:

- **Wie viele** Außendienstmitarbeiter (ADM)?

Sales Force Deployment

Für die dänische Brauerei **FAXE**: Wie setzt man den Außendienst optimal ein?

Vier Entscheidungen **in einem Modell**:

- **Wie viele** Außendienstmitarbeiter (ADM)?
- **Wo** haben sie ihren Standort?

Sales Force Deployment

Für die dänische Brauerei **FAXE**: Wie setzt man den Außendienst optimal ein?

Vier Entscheidungen **in einem Modell**:

- **Wie viele** Außendienstmitarbeiter (ADM)?
- **Wo** haben sie ihren Standort?
- **Welche** Kunden bilden ihr Verkaufsgebiet?

Sales Force Deployment

Für die dänische Brauerei **FAXE**: Wie setzt man den Außendienst optimal ein?

Vier Entscheidungen **in einem Modell**:

- **Wie viele** Außendienstmitarbeiter (ADM)?
- **Wo** haben sie ihren Standort?
- **Welche** Kunden bilden ihr Verkaufsgebiet?
- **Wie viel Verkaufszeit** erhält jeder Kunde?

Sales Force Deployment

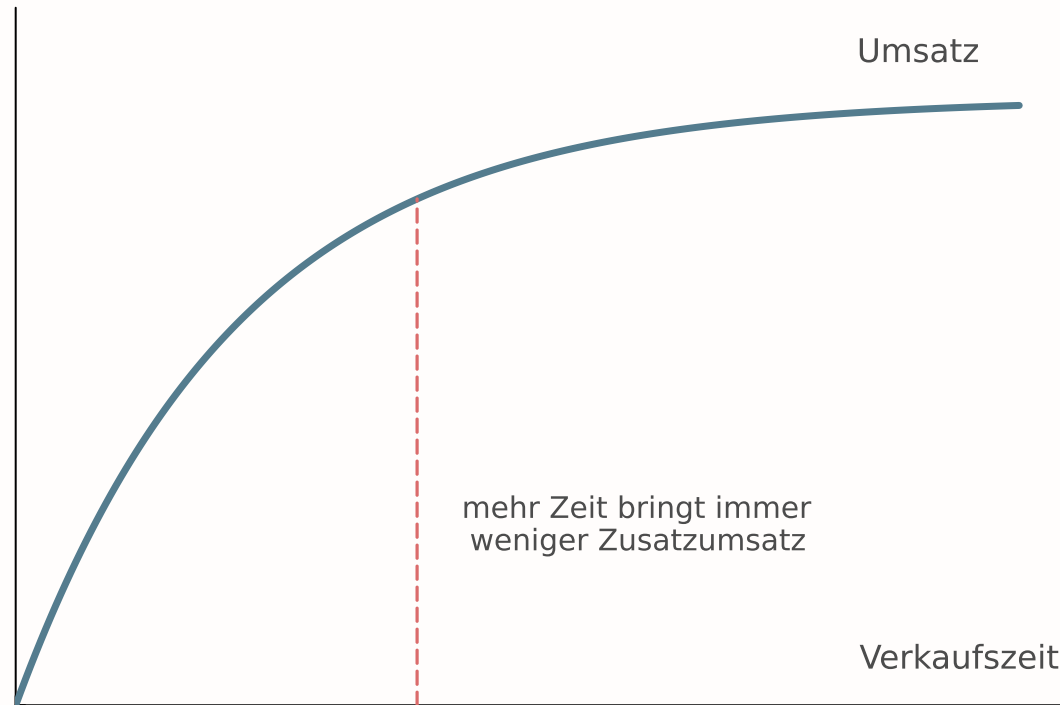
Für die dänische Brauerei **FAXE**: Wie setzt man den Außendienst optimal ein?

Vier Entscheidungen **in einem Modell**:

- **Wie viele** Außendienstmitarbeiter (ADM)?
- **Wo** haben sie ihren Standort?
- **Welche** Kunden bilden ihr Verkaufsgebiet?
- **Wie viel Verkaufszeit** erhält jeder Kunde?

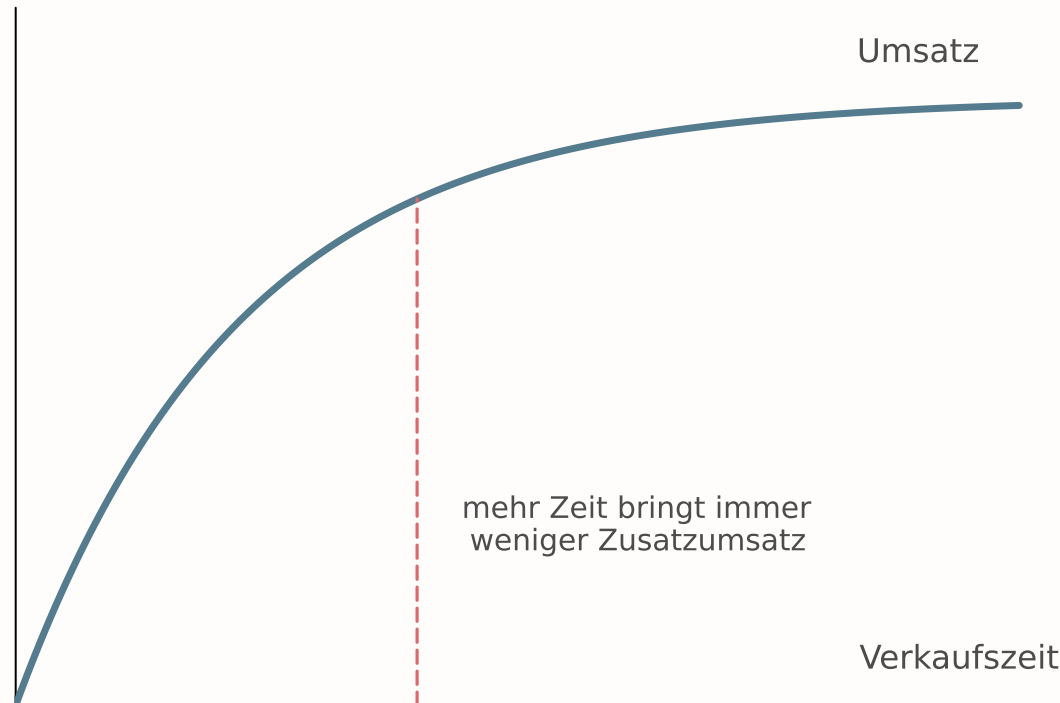
Ziel: **Gewinnmaximierung**, nicht Umsatz!

Die Umsatzreaktionsfunktion



Der Umsatz eines Kunden **wächst** mit der Verkaufszeit, aber **konkav**.

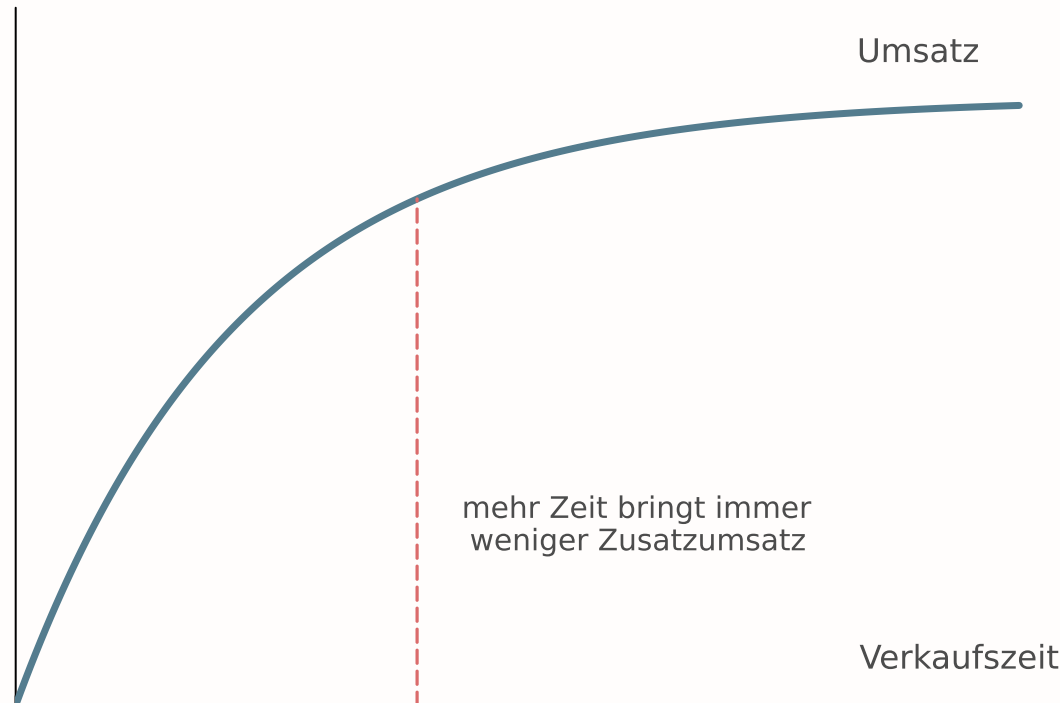
Die Umsatzreaktionsfunktion



Der Umsatz eines Kunden **wächst** mit der Verkaufszeit, aber **konkav**.

Frage: Warum lohnt der zehnte Besuch weniger als der erste?

Die Umsatzreaktionsfunktion



Der Umsatz eines Kunden **wächst** mit der Verkaufszeit, aber **konkav**.

Frage: Warum lohnt der zehnte Besuch weniger als der erste?

Sättigung: Ab einem Punkt kostet mehr Verkaufszeit mehr, als der Zusatzumsatz einbringt.

Die Managementvorlage

Das Modell liefert dem Management drei Karten:

Die Managementvorlage

Das Modell liefert dem Management drei Karten:

- **Gebiete und Gewinn:** welcher ADM betreut welche Region.

Die Managementvorlage

Das Modell liefert dem Management drei Karten:

- **Gebiete und Gewinn:** welcher ADM betreut welche Region.
- **Verkaufszeiten:** wie viel Zeit jeder Kunde erhält.

Die Managementvorlage

Das Modell liefert dem Management drei Karten:

- **Gebiete und Gewinn:** welcher ADM betreut welche Region.
- **Verkaufszeiten:** wie viel Zeit jeder Kunde erhält.
- **Erwartete Umsätze:** was jede Region einbringt.

Die Managementvorlage

Das Modell liefert dem Management drei Karten:

- **Gebiete und Gewinn:** welcher ADM betreut welche Region.
- **Verkaufszeiten:** wie viel Zeit jeder Kunde erhält.
- **Erwartete Umsätze:** was jede Region einbringt.

! Ergebnis

Standorte, Gebiete und Zeiteinsatz kommen aus **einer** Optimierung, statt aus drei getrennten Bauchentscheidungen.

Distriktoptimierung

Polizeibezirke neu zuschneiden



Das Problem

Das Problem

- Viele Bezirkspläne reichen **Jahrzehnte** zurück und wurden manuell entlang von Autobahnen und Grenzen gezogen (Bruce 2009).

Das Problem

- Viele Bezirkspläne reichen **Jahrzehnte** zurück und wurden manuell entlang von Autobahnen und Grenzen gezogen (Bruce 2009).
- Notdienste besitzen **viele Daten**, nutzen sie aber selten zur Verbesserung.

Das Problem

- Viele Bezirkspläne reichen **Jahrzehnte** zurück und wurden manuell entlang von Autobahnen und Grenzen gezogen (Bruce 2009).
- Notdienste besitzen **viele Daten**, nutzen sie aber selten zur Verbesserung.

Frage: Wie schneidet man Bezirke so zu, dass die **Reaktionszeit** minimal und die **Auslastung** ausgeglichen ist?

Das Problem

- Viele Bezirkspläne reichen **Jahrzehnte** zurück und wurden manuell entlang von Autobahnen und Grenzen gezogen (Bruce 2009).
- Notdienste besitzen **viele Daten**, nutzen sie aber selten zur Verbesserung.

Frage: Wie schneidet man Bezirke so zu, dass die **Reaktionszeit** minimal und die **Auslastung** ausgeglichen ist?

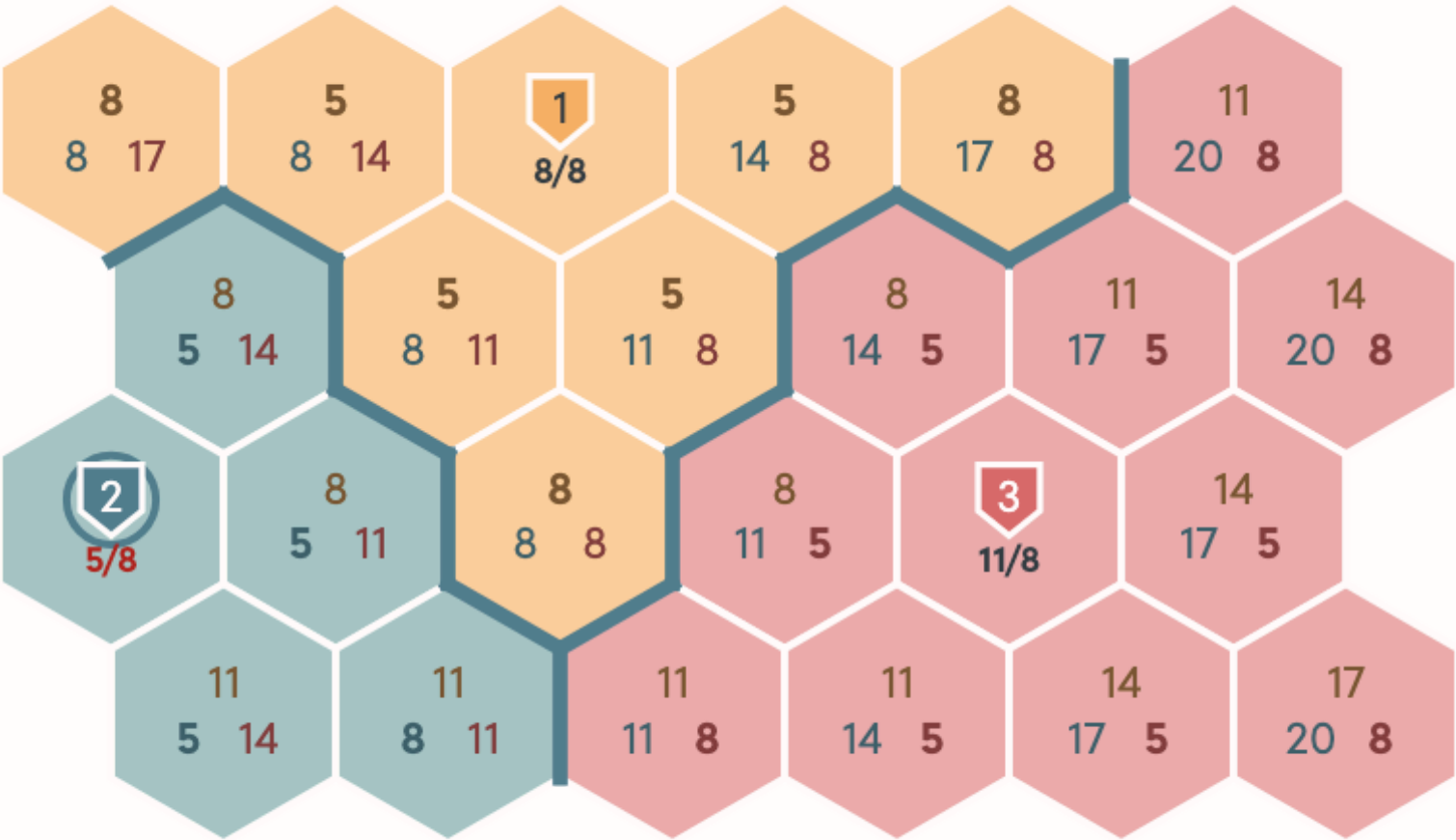


Gleich ausprobieren

Auf der nächsten Folie schneiden Sie selbst Bezirke zu: 24 Zellen, drei Wachen, jede mit mindestens 8 Zellen. Genügt es, jede Zelle der nächstgelegenen Wache zu geben?

Sie sind dran

Jede Zelle zeigt ihre Fahrzeit zu jeder Wache in Minuten, fett die zur eigenen. Jede Wache braucht mindestens 8 Zellen. Wählen Sie eine Wache und tippen Sie die Zellen an, die sie übernehmen soll.



- 1 46 min
8 Zellen ≥ 8
- 2 25 min
5 Zellen < 8
- 3 64 min
11 Zellen ≥ 8

In jeder Zelle: oben die Fahrzeit zu Wache 1, links zu 2, rechts zu 3.



Eigener Plan
135 min
Zu wenige Zellen:
Wache 2 (5), je
mindestens 8

Optimieren

Reset

Neu

Der OR-Ansatz

Das Spiel als **Zuordnungsproblem**: $X_{zs} = 1$, wenn Zelle z zur Wache s gehört.

$$\min \sum_z \sum_s \text{dist}_{zs} X_{zs}$$

$$\sum_s X_{zs} = 1 \quad \forall z \quad (\text{jede Zelle einer Wache})$$

$$\sum_z X_{zs} \geq \underline{n} \quad \forall s \quad (\text{Auslastung ausgleichen})$$

$$X_{zs} \in \{0, 1\}$$

Kontrolle mit Julia

Die Karte aus dem Spiel: 24 Zellen, 3 Wachen, je mindestens 8 Zellen, Fahrzeit 2 min plus 3 min je durchquerte Zelle:

```
1 using JuMP, HiGHS
2 Z = [(c - (r - r % 2) ÷ 2, r) for r in 0:3 for c in 0:5] # 24 Zellen
3 W = [3, 13, 17] # die Zellen der drei Wachen
4 schritte(a, b) = (abs(a[1] - b[1]) + abs(a[2] - b[2]) +
5                 abs(sum(a) - sum(b))) ÷ 2
6 dist = [2 + 3schritte(Z[z], Z[w]) for z in eachindex(Z), w in W]
7 modell = Model(HiGHS.Optimizer); set_silent(modell)
8 @variable(modell, X[eachindex(Z), 1:3], Bin)
9 @objective(modell, Min, sum(dist .* X))
10 @constraint(modell, [z in eachindex(Z)], sum(X[z, :]) == 1) # Zuordnung
11 @constraint(modell, [s in 1:3], sum(X[:, s]) >= 8) # Auslastung
12 optimize!(modell)
13 println("Fahrzeit = ", round{Int, objective_value(modell)}, " min, ",
14         "Zellen je Wache: ", round{Int, vec(sum(value.(X), dims = 1))})
```

Kontrolle mit Julia

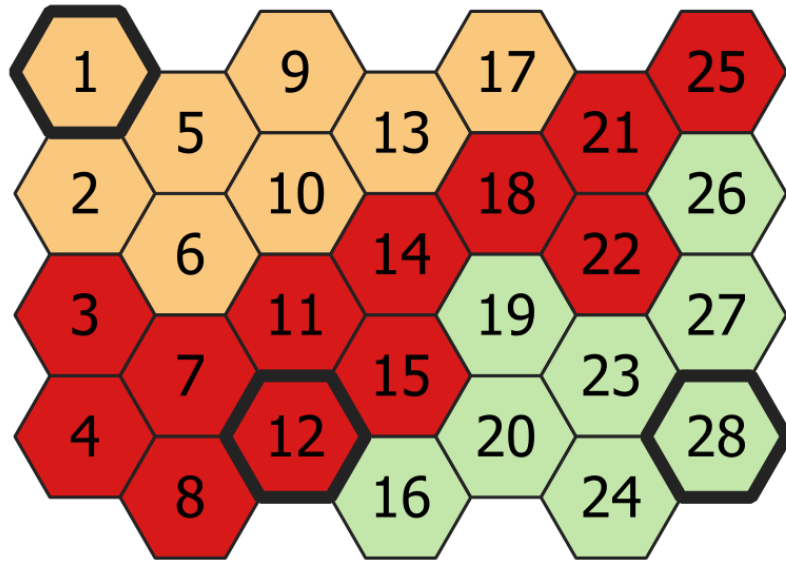
Die Karte aus dem Spiel: 24 Zellen, 3 Wachen, je mindestens 8 Zellen, Fahrzeit 2 min plus 3 min je durchquerte Zelle:

```
1 using JuMP, HiGHS
2 Z = [(c - (r - r % 2) ÷ 2, r) for r in 0:3 for c in 0:5] # 24 Zellen
3 W = [3, 13, 17] # die Zellen der drei Wachen
4 schritte(a, b) = (abs(a[1] - b[1]) + abs(a[2] - b[2]) +
5                  abs(sum(a) - sum(b))) ÷ 2
6 dist = [2 + 3schritte(Z[z], Z[w]) for z in eachindex(Z), w in W]
7 modell = Model(HiGHS.Optimizer); set_silent(modell)
8 @variable(modell, X[eachindex(Z), 1:3], Bin)
9 @objective(modell, Min, sum(dist .* X))
10 @constraint(modell, [z in eachindex(Z)], sum(X[z, :]) == 1) # Zuordnung
11 @constraint(modell, [s in 1:3], sum(X[:, s]) >= 8) # Auslastung
12 optimize!(modell)
13 println("Fahrzeit = ", round{Int, objective_value(modell)}, " min, ",
14         "Zellen je Wache: ", round{Int, vec(sum(value.(X), dims = 1))})
```

Fahrzeit = 144 min, Zellen je Wache: [8, 8, 8]

Zusammenhängend und kompakt

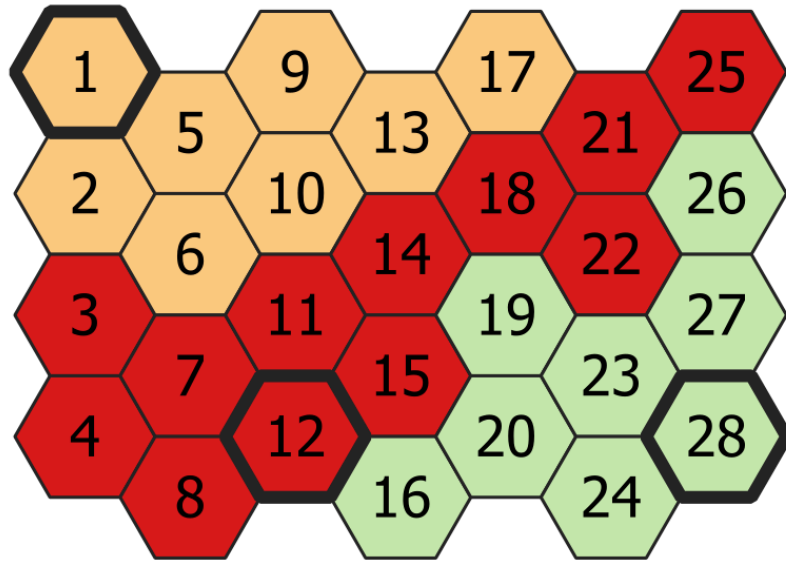
In der Praxis braucht ein Bezirk mehr als die Zuordnung:



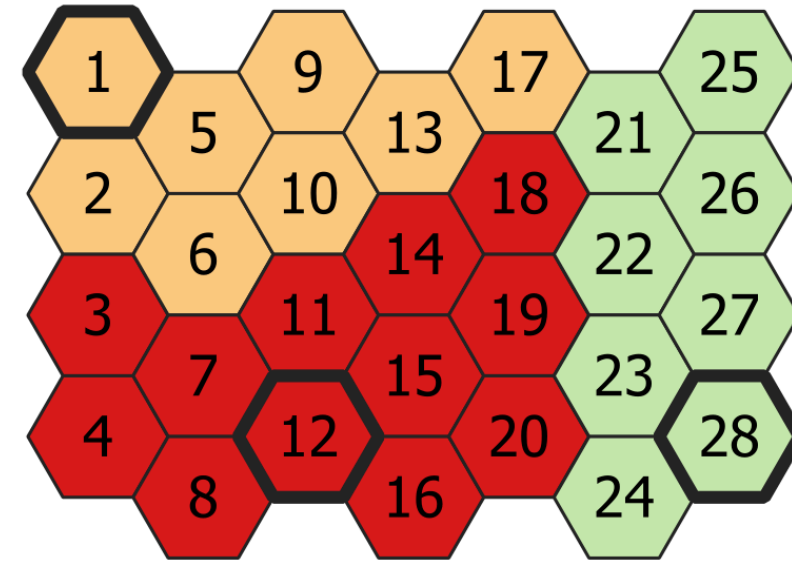
Zusammenhängend, aber nicht kompakt

Zusammenhängend und kompakt

In der Praxis braucht ein Bezirk mehr als die Zuordnung:



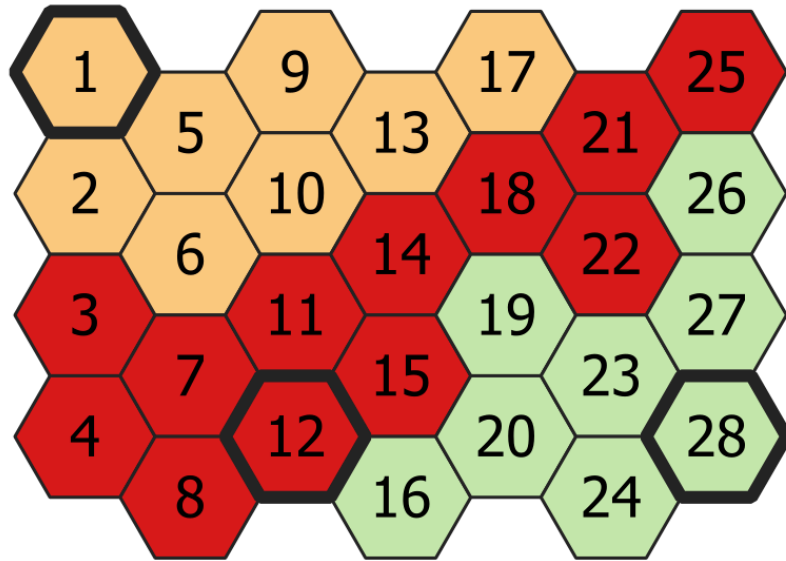
Zusammenhängend, aber nicht kompakt



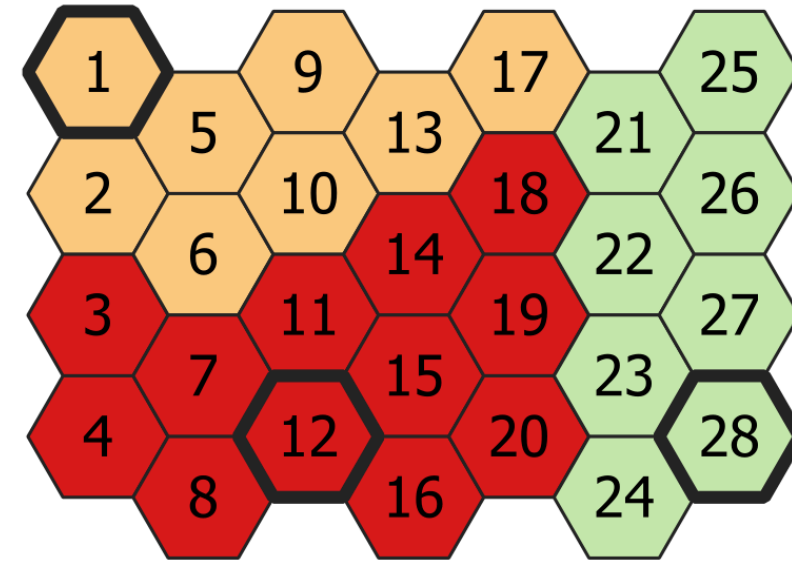
Kompakt um die Wache

Zusammenhängend und kompakt

In der Praxis braucht ein Bezirk mehr als die Zuordnung:



Zusammenhängend, aber nicht kompakt



Kompakt um die Wache

Die Fallstudien ergänzen das Zuordnungsmodell um **Zusammenhang** und **Kompaktheit** ([Vlček u. a. 2024](#)).

Was OR hier leistet

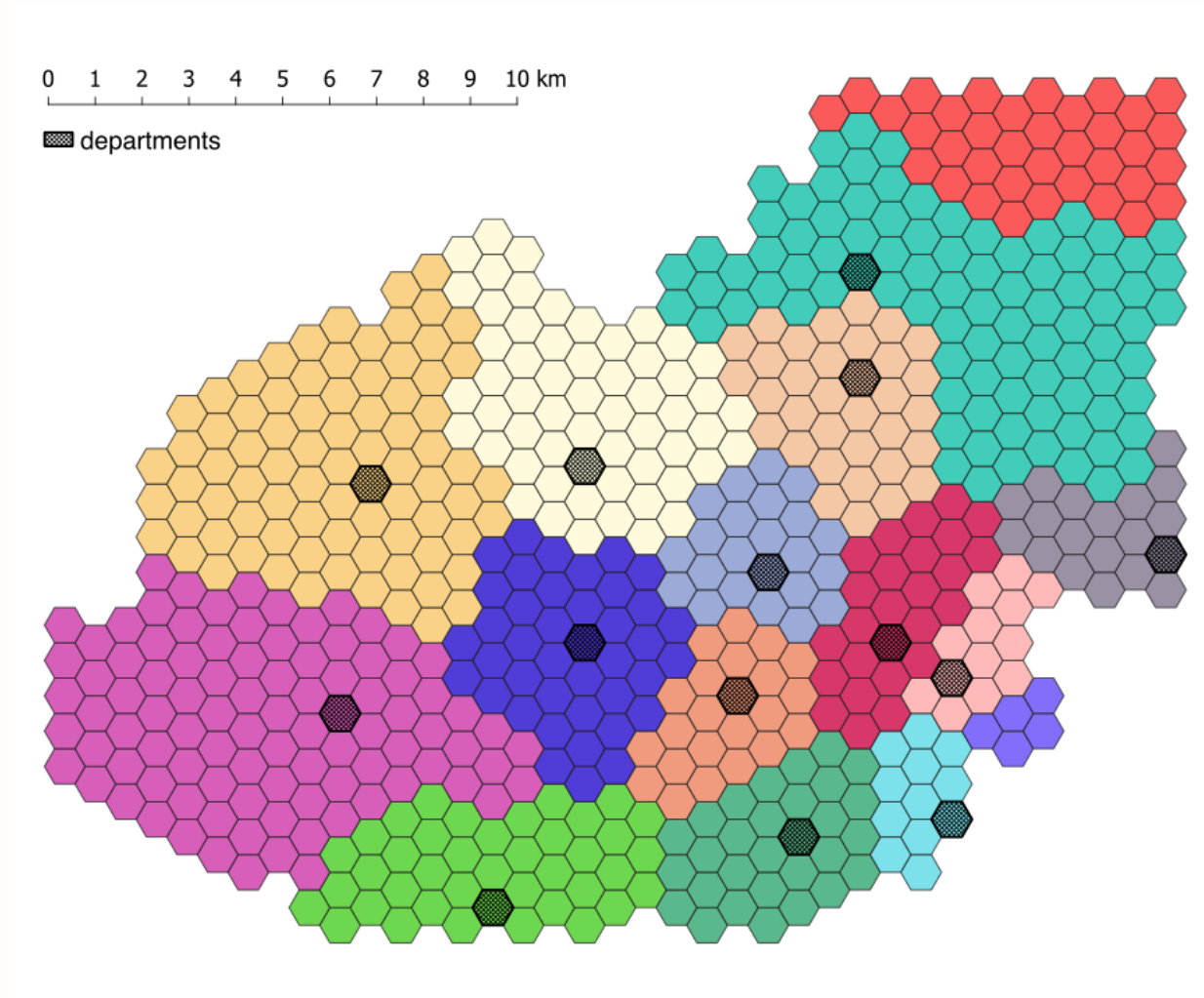
Was OR hier leistet

- OR-Modelle verbinden **Einsatzdaten** und **Geodaten** und verbessern so die Reaktion der Rettungsdienste.

Was OR hier leistet

- OR-Modelle verbinden **Einsatzdaten** und **Geodaten** und verbessern so die Reaktion der Rettungsdienste.
- Sie stützen auch **strategische** Entscheidungen: neue Wachen eröffnen oder bestehende schließen ([Liberatore u. a. 2020](#)).

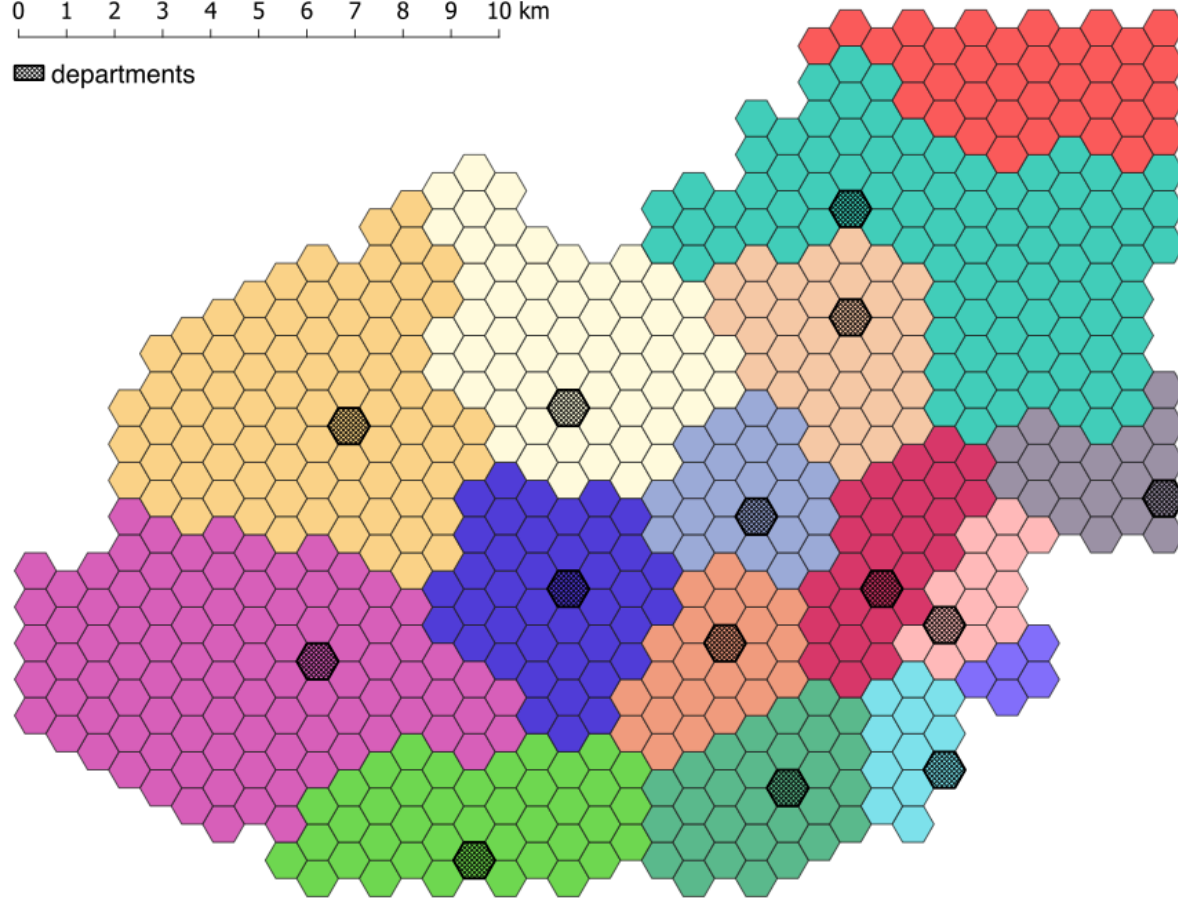
Fallstudie Deutschland



Fallstudie Deutschland

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 km

departments

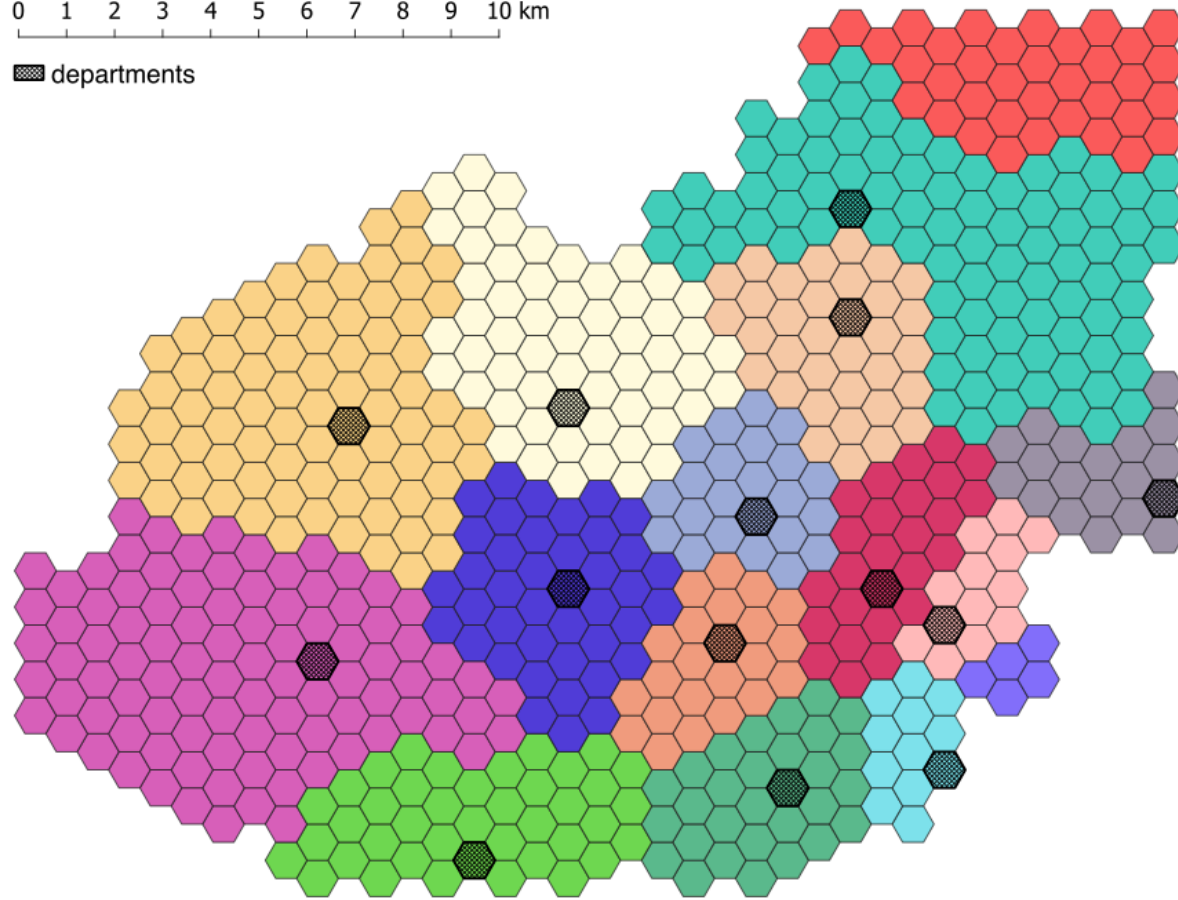


- Großstadt: **1,8 Mio.** Einsätze (2015–2019).

Fallstudie Deutschland

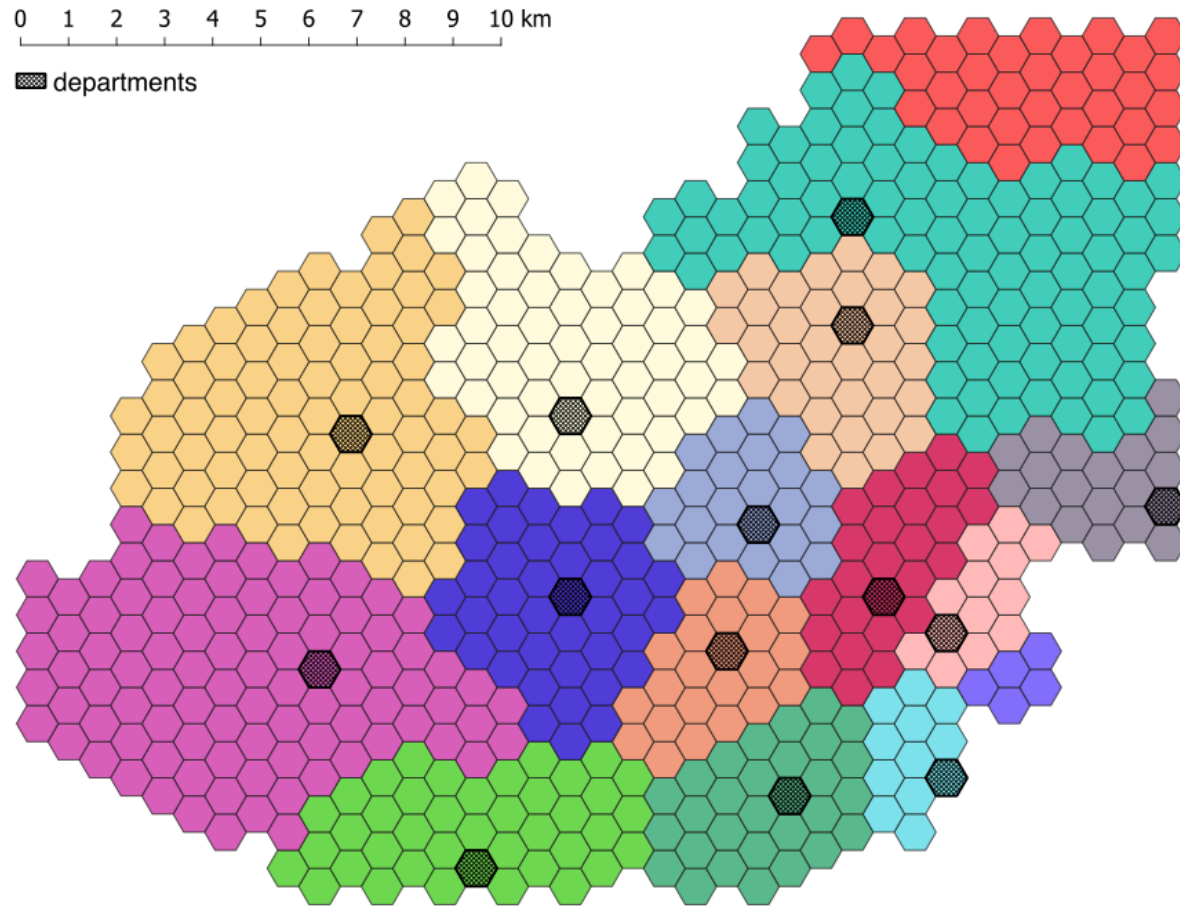
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 km

▣ departments



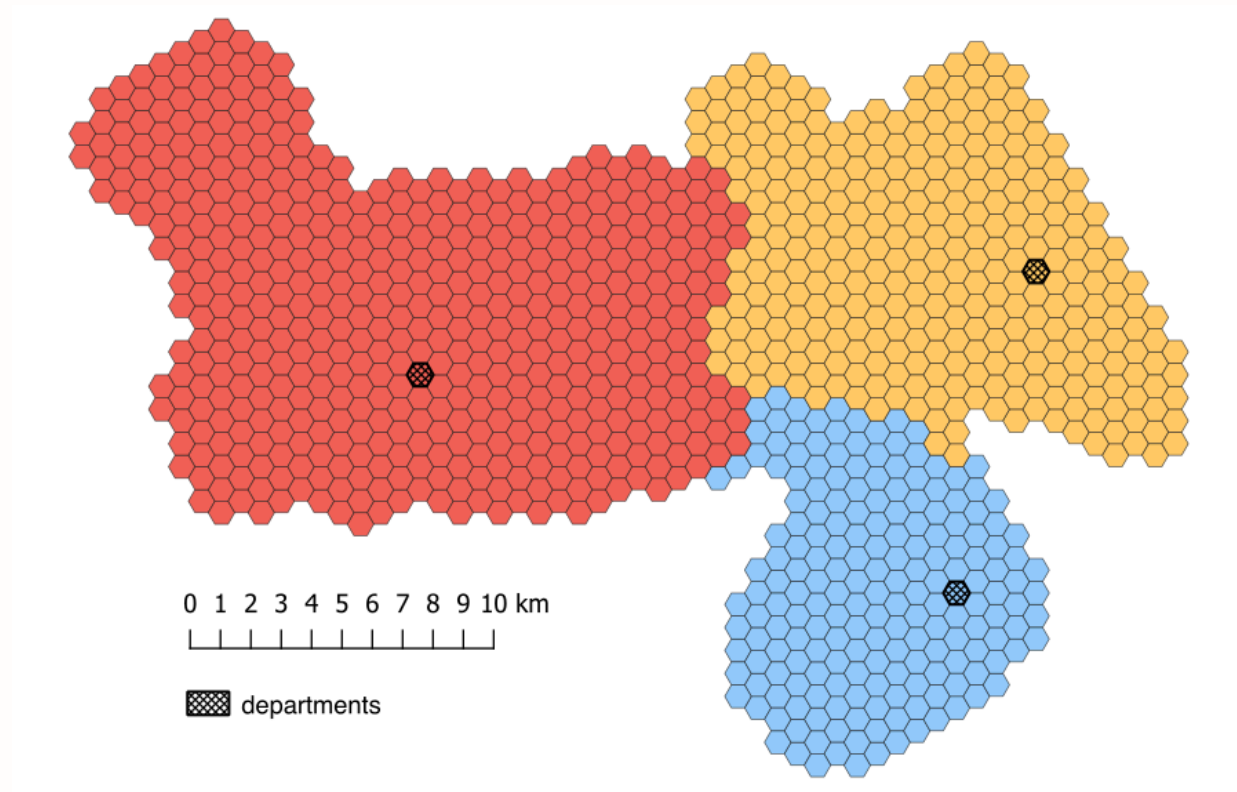
- Großstadt: **1,8 Mio.** Einsätze (2015–2019).
- Rund **20** Wachen, **1 596** Gebietszellen.

Fallstudie Deutschland

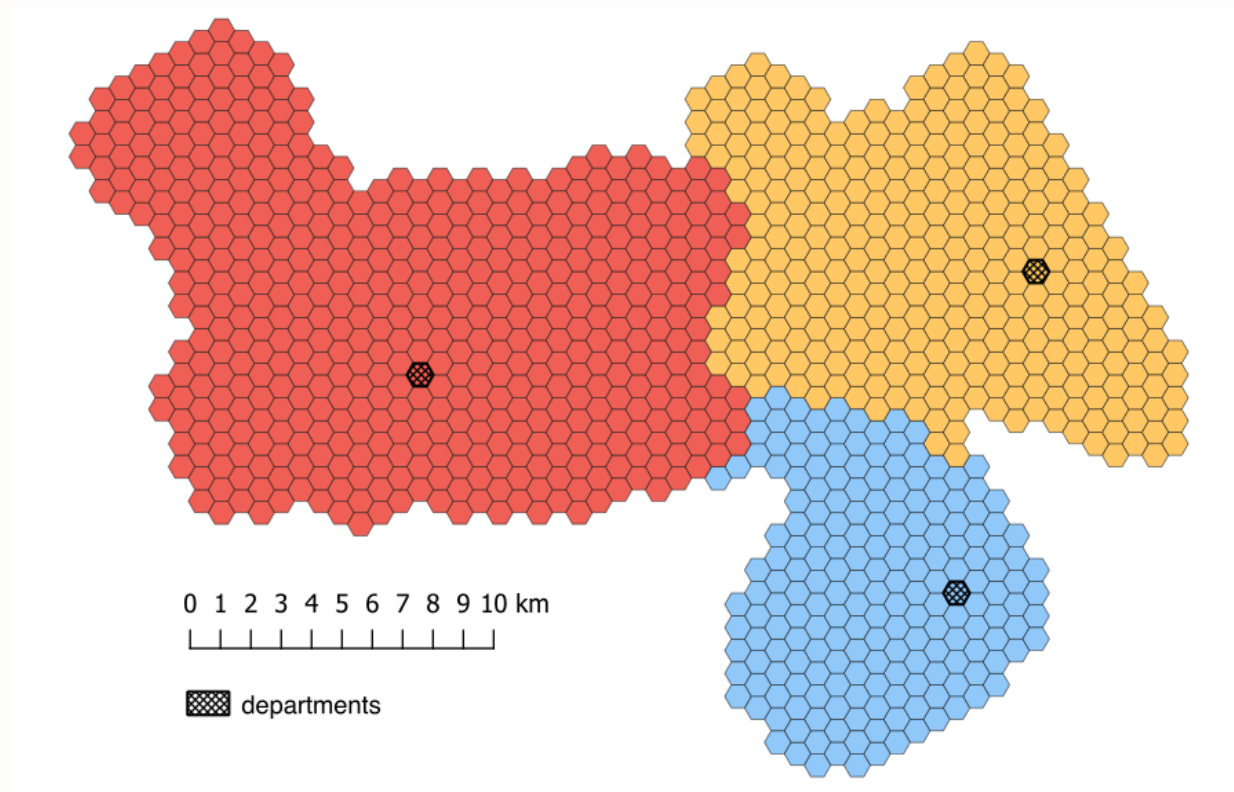


- Großstadt: **1,8 Mio.** Einsätze (2015–2019).
- Rund **20** Wachen, **1 596** Gebietszellen.
- Ziel: Bezirke neu zuschneiden, **Reaktionszeit** senken.

Fallstudie Belgien

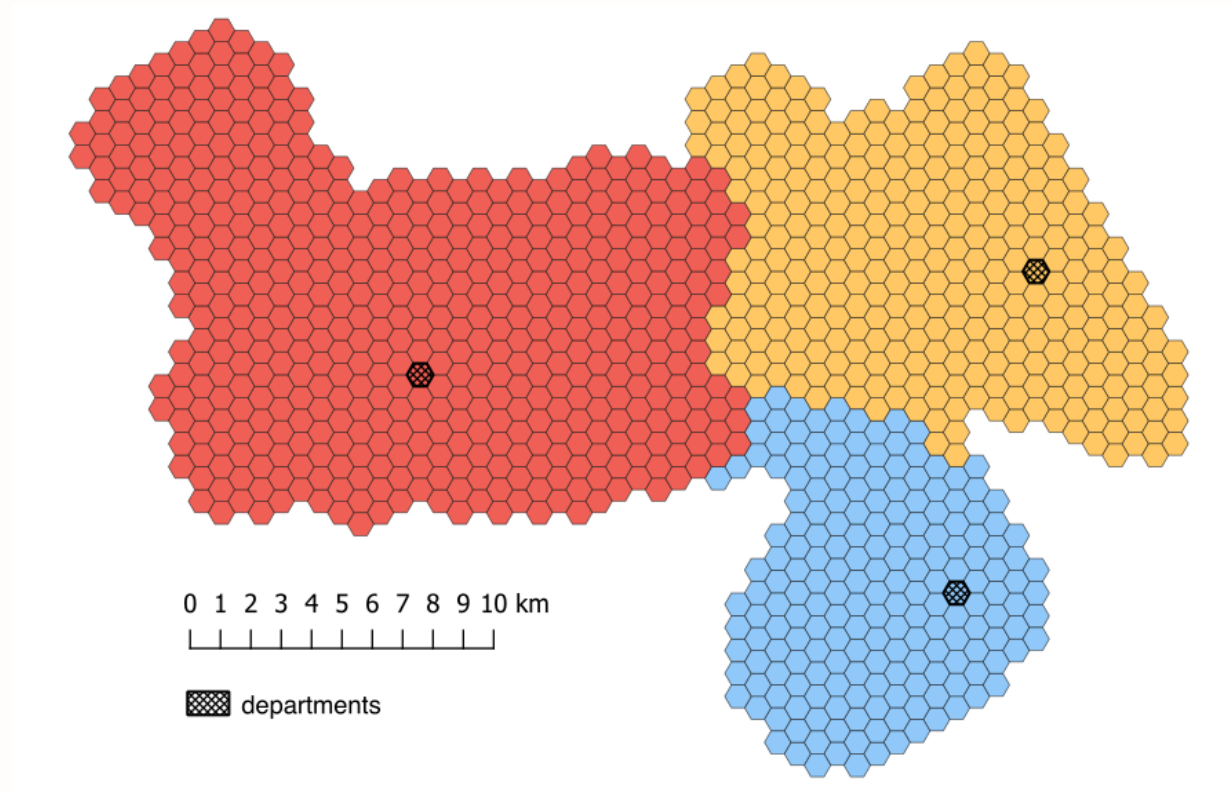


Fallstudie Belgien



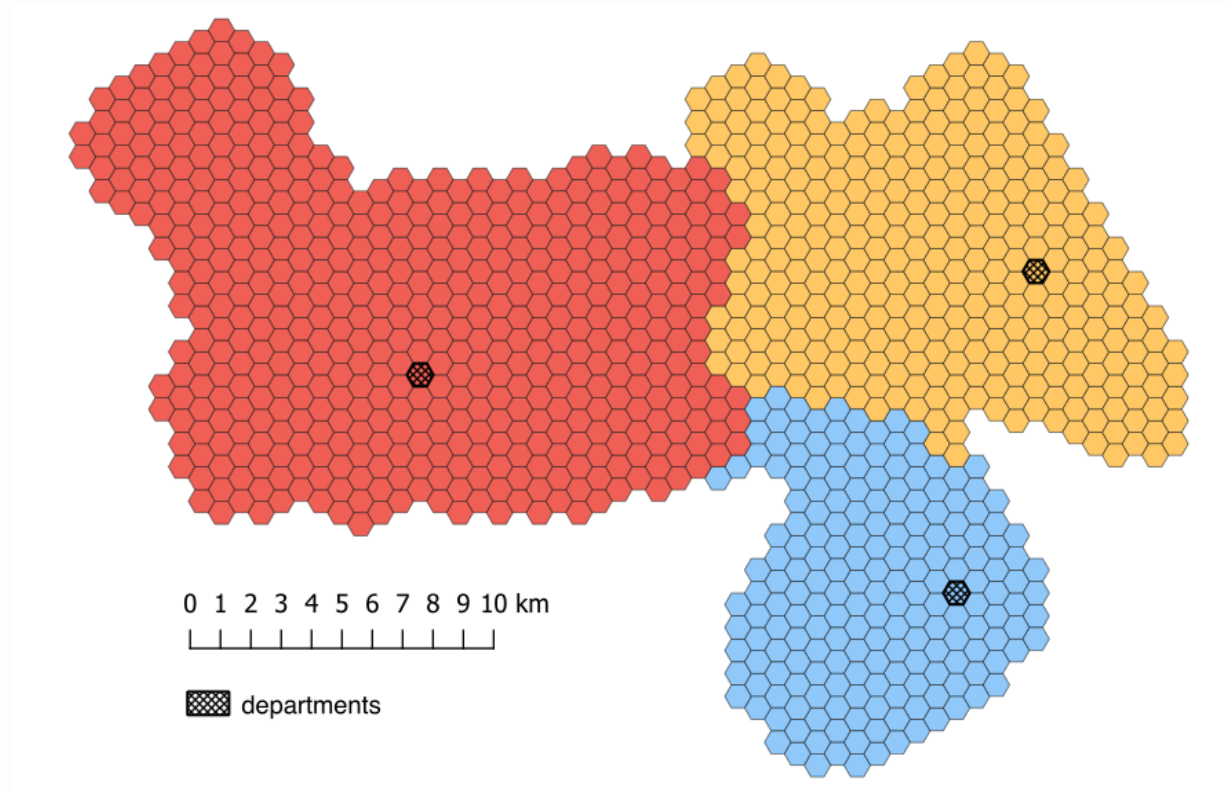
- Ländlich: **50 000** Einsätze (2019–2020).

Fallstudie Belgien



- Ländlich: **50 000** Einsätze (2019–2020).
- **2** Wachen, eine **dritte** geplant; **1 233** Gebietszellen.

Fallstudie Belgien



- Ländlich: **50 000** Einsätze (2019–2020).
- **2** Wachen, eine **dritte** geplant; **1 233** Gebietszellen.
- Ziel: Bezirke neu zuschneiden und die **neue Wache** einbinden.

Bewertung per Simulation

Bewertung per Simulation

- **Fahrzeiten** aus Straßennetz und Verkehrsdaten (Google Maps).

Bewertung per Simulation

- **Fahrzeiten** aus Straßennetz und Verkehrsdaten (Google Maps).
- Die neuen Bezirke laufen in einer **Simulation** des Rettungsdienstes.

Bewertung per Simulation

- **Fahrzeiten** aus Straßennetz und Verkehrsdaten (Google Maps).
- Die neuen Bezirke laufen in einer **Simulation** des Rettungsdienstes.
- Sie erfasst räumliche und zeitliche **Einsatzmuster**, Schichten, Priorisierung, Rushhour, Aushilfe zwischen Bezirken, schwankende Fahrzeiten und Folgeeinsätze.

Bewertung per Simulation

- **Fahrzeiten** aus Straßennetz und Verkehrsdaten (Google Maps).
- Die neuen Bezirke laufen in einer **Simulation** des Rettungsdienstes.
- Sie erfasst räumliche und zeitliche **Einsatzmuster**, Schichten, Priorisierung, Rushhour, Aushilfe zwischen Bezirken, schwankende Fahrzeiten und Folgeeinsätze.

Anders als im Spiel erzwingt dort keine Restriktion eine ausgeglichene **Auslastung**: Kompakte Bezirke um gut gelegene Wachen verteilen sie von selbst, gemessen in der Simulation.

Ergebnis der Fallstudien

Fallstudien in Deutschland und Belgien:

! Wirkung

Optimierte Polizeibezirke senkten die Reaktionszeit in der Simulation um bis zu 14,5 %, ohne zusätzliches Personal.

Ergebnis der Fallstudien

Fallstudien in Deutschland und Belgien:

! Wirkung

Optimierte Polizeibezirke senkten die Reaktionszeit in der Simulation um bis zu 14,5 %, ohne zusätzliches Personal.

- Notdienste profitieren von OR bei Standorten und Bezirkszuschnitt.

Ergebnis der Fallstudien

Fallstudien in Deutschland und Belgien:

! Wirkung

Optimierte Polizeibezirke senkten die Reaktionszeit in der Simulation um bis zu 14,5 %, ohne zusätzliches Personal.

- Notdienste profitieren von OR bei Standorten und Bezirkszuschnitt.
- Derselbe Ansatz lässt sich auf andere Rettungsdienste übertragen.

Discrete Choice

Welches Verkehrsmittel?



Nachfrage prognostizieren

Wie **entscheiden** sich Menschen zwischen Alternativen (Auto, Bus, Bahn)?

Nachfrage prognostizieren

Wie **entscheiden** sich Menschen zwischen Alternativen (Auto, Bus, Bahn)?

- Grundlage: eine **Stichprobe** befragter Personen.

Nachfrage prognostizieren

Wie **entscheiden** sich Menschen zwischen Alternativen (Auto, Bus, Bahn)?

- Grundlage: eine **Stichprobe** befragter Personen.
- **Revealed preferences**: „Ich habe x gewählt.“

Nachfrage prognostizieren

Wie **entscheiden** sich Menschen zwischen Alternativen (Auto, Bus, Bahn)?

- Grundlage: eine **Stichprobe** befragter Personen.
- **Revealed preferences**: „Ich habe x gewählt.“
- **Stated preferences**: „Ich würde x wählen.“

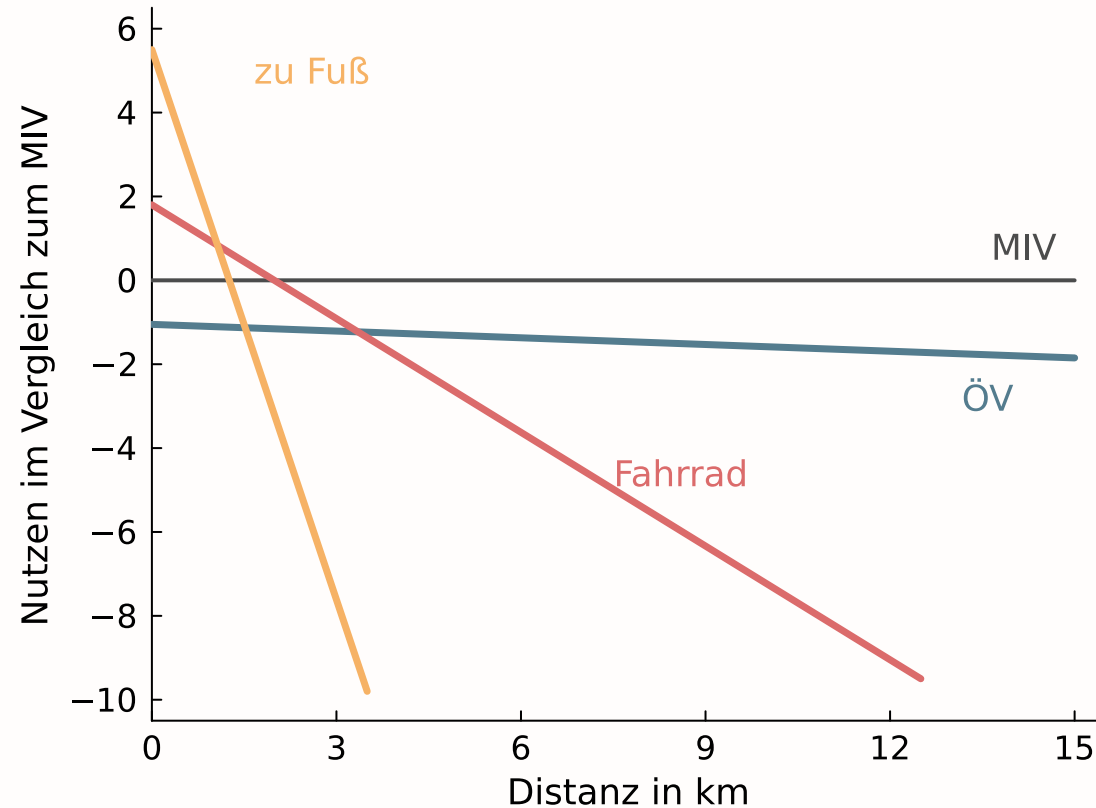
Nachfrage prognostizieren

Wie **entscheiden** sich Menschen zwischen Alternativen (Auto, Bus, Bahn)?

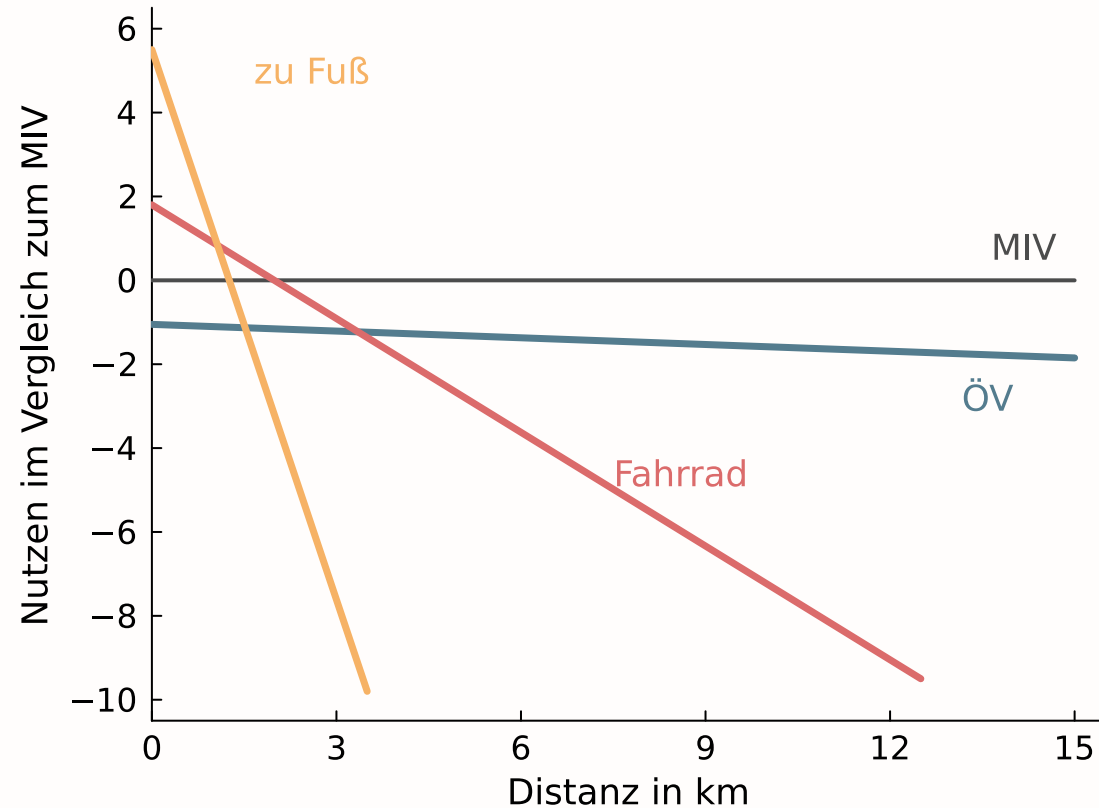
- Grundlage: eine **Stichprobe** befragter Personen.
- **Revealed preferences**: „Ich habe x gewählt.“
- **Stated preferences**: „Ich würde x wählen.“
- Daraus wird eine **Nutzenfunktion** geschätzt, und daraus die **Nachfrage** prognostiziert.

Nutzen und Distanz

Nutzen je Verkehrsmittel,
gemessen am **MIV** (Pkw).



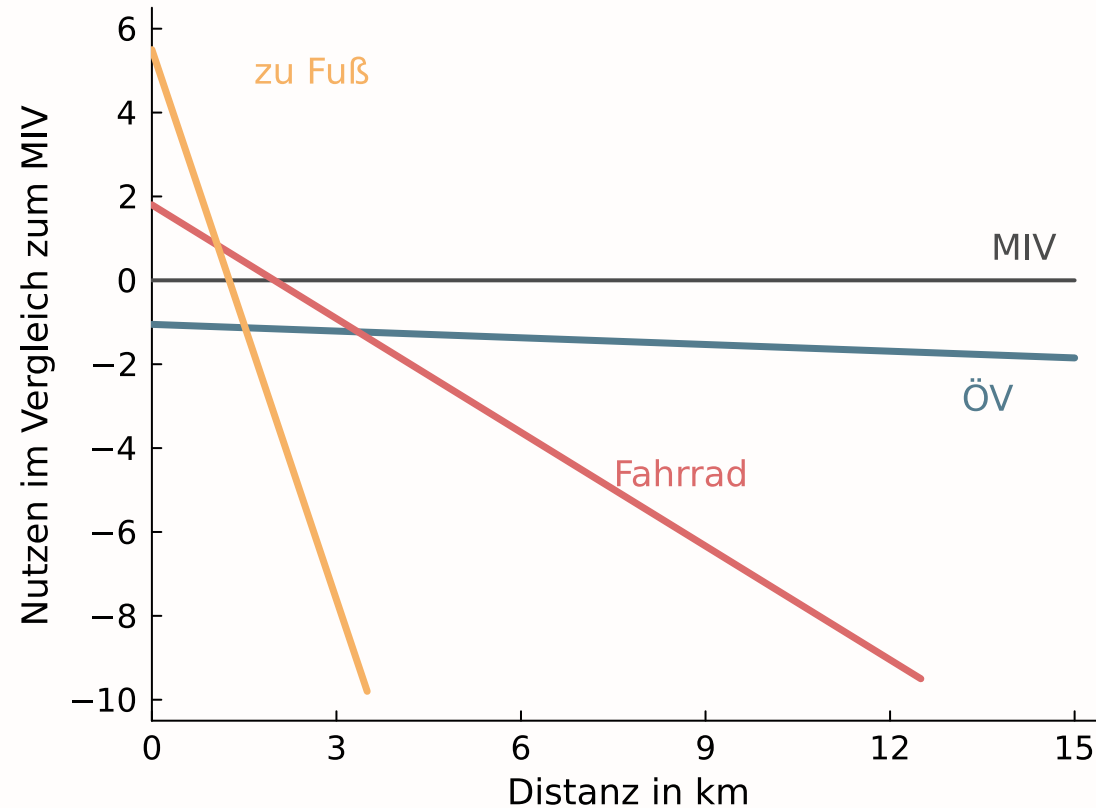
Nutzen und Distanz



Nutzen je Verkehrsmittel,
gemessen am **MIV** (Pkw).

**Frage: Ab wann liegt der Pkw
vorn?**

Nutzen und Distanz

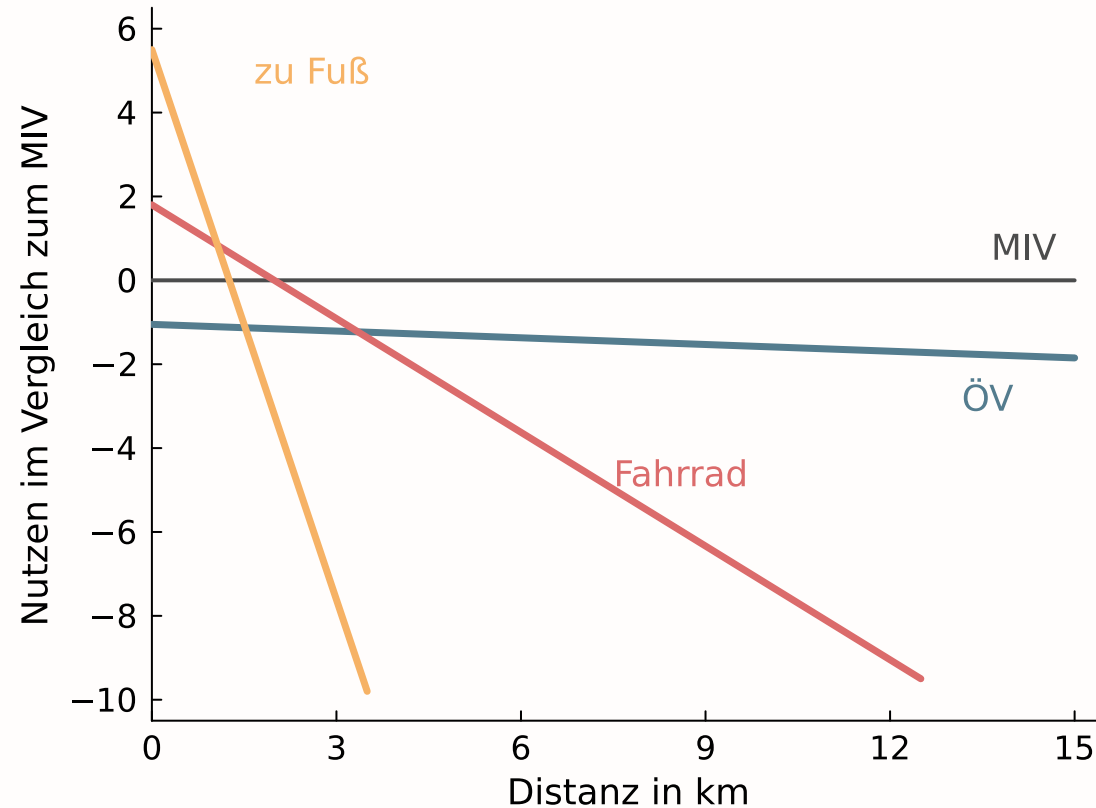


Nutzen je Verkehrsmittel,
gemessen am **MIV** (Pkw).

**Frage: Ab wann liegt der Pkw
vorn?**

Ab etwa **2 km**; davor Fußweg
(bis 1 km) und Fahrrad.

Nutzen und Distanz



Nutzen je Verkehrsmittel, gemessen am **MIV** (Pkw).

Frage: Ab wann liegt der Pkw vorn?

Ab etwa **2 km**; davor Fußweg (bis 1 km) und Fahrrad.

Der ÖV liegt nie vorn und wird doch gewählt: Nutzen ist auch **zufällig**.

Was liefert die Analyse?

Aus der geschätzten Nutzenfunktion folgen direkt:

Was liefert die Analyse?

Aus der geschätzten Nutzenfunktion folgen direkt:

- Nachfrageprognosen für neue Angebote.

Was liefert die Analyse?

Aus der geschätzten Nutzenfunktion folgen direkt:

- Nachfrageprognosen für neue Angebote.
- Zahlungsbereitschaften der Kunden.

Was liefert die Analyse?

Aus der geschätzten Nutzenfunktion folgen direkt:

- Nachfrageprognosen für neue Angebote.
- Zahlungsbereitschaften der Kunden.
- Die ökonomische Beurteilung von Infrastrukturmaßnahmen.

Was liefert die Analyse?

Aus der geschätzten Nutzenfunktion folgen direkt:

- Nachfrageprognosen für neue Angebote.
- Zahlungsbereitschaften der Kunden.
- Die ökonomische Beurteilung von Infrastrukturmaßnahmen.
- Die Ausgestaltung des Dienstleistungsangebots.

Was liefert die Analyse?

Aus der geschätzten Nutzenfunktion folgen direkt:

- Nachfrageprognosen für neue Angebote.
- Zahlungsbereitschaften der Kunden.
- Die ökonomische Beurteilung von Infrastrukturmaßnahmen.
- Die Ausgestaltung des Dienstleistungsangebots.

Fallstudie **Dresdner Schülerverkehr**: geschätzte Nutzenfunktionen zeigten, wie Schüler auf Takt und Preis des ÖPNV reagieren.

Fallstudie: BART

Prognose des Marktanteils des neuen **Bay Area Rapid Transit** (San Francisco):

Verkehrsmittel	Tatsächlich [%]	Prognose [%]
nur Pkw	59,90	55,84
Bus	10,78	12,51
Park-and-Ride	1,43	2,41
BART + Bus	0,95	1,05
BART + Pkw	5,23	5,29
Carpooling	21,71	22,89

Fallstudie: BART

Prognose des Marktanteils des neuen **Bay Area Rapid Transit** (San Francisco):

Verkehrsmittel	Tatsächlich [%]	Prognose [%]
nur Pkw	59,90	55,84
Bus	10,78	12,51
Park-and-Ride	1,43	2,41
BART + Bus	0,95	1,05
BART + Pkw	5,23	5,29
Carpooling	21,71	22,89

BART: **Prognose 6,3 %** vs. **tatsächlich 6,2 %**, sehr genau.

Crowd Management

Der Hadsch in Mekka



Der Hadsch

Der **Hadsch** ist die große islamische Pilgerfahrt nach **Mekka**, dem religiösen Zentrum des Islams in Saudi-Arabien.

Der Hadsch

Der **Hadsch** ist die große islamische Pilgerfahrt nach **Mekka**, dem religiösen Zentrum des Islams in Saudi-Arabien.

- Jeder körperlich fähige Muslim soll ihn **einmal im Leben** vollziehen.

Der Hadsch

Der **Hadsch** ist die große islamische Pilgerfahrt nach **Mekka**, dem religiösen Zentrum des Islams in Saudi-Arabien.

- Jeder körperlich fähige Muslim soll ihn **einmal im Leben** vollziehen.
- Wegen der beengten Verhältnisse dürfen nur **2 bis 4 Millionen** Menschen im Jahr die Reise antreten.

Das Ritual

Das Ritual

- Eine mehrtägige Reise mit mehreren Ritualen an verschiedenen Stätten.

Das Ritual

- Eine **mehrtägige** Reise mit mehreren Ritualen an verschiedenen Stätten.
- Fokus: das **Ramy-al-Jamarat-Ritual**: Die Pilger werfen Kieselsteine gegen drei Säulen, die für die Versuchungen des Teufels stehen.

Das Ritual

- Eine **mehrtägige** Reise mit mehreren Ritualen an verschiedenen Stätten.
- Fokus: das **Ramy-al-Jamarat-Ritual**: Die Pilger werfen Kieselsteine gegen drei Säulen, die für die Versuchungen des Teufels stehen.
- Wiederholt an **vier aufeinanderfolgenden Tagen**.

Zeltstadt von Mina



In diesen vier Tagen wohnen etwa **1,5 bis 2 Millionen** Pilger in der Zeltstadt von Mina und erreichen die heilige Stätte immer wieder über ein Netz von Straßen und Wegen.

Das Risiko

Das Risiko

- Pilger haben je Ritualtag **Zeitpräferenzen**; auch **religiöse Traditionen** prägen die Wahl.

Das Risiko

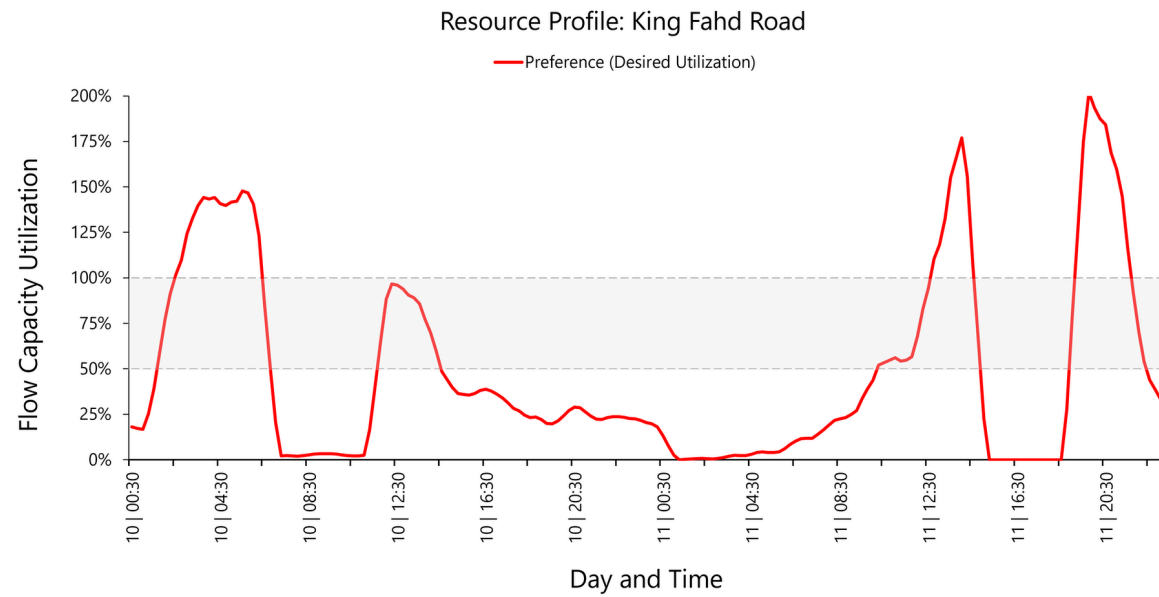
- Pilger haben je Ritualtag **Zeitpräferenzen**; auch **religiöse Traditionen** prägen die Wahl.
- Logistische Grenzen (An- und Abfahrt der **Shuttles**), extreme **Wüstenhitze**, enge Infrastruktur.

Das Risiko

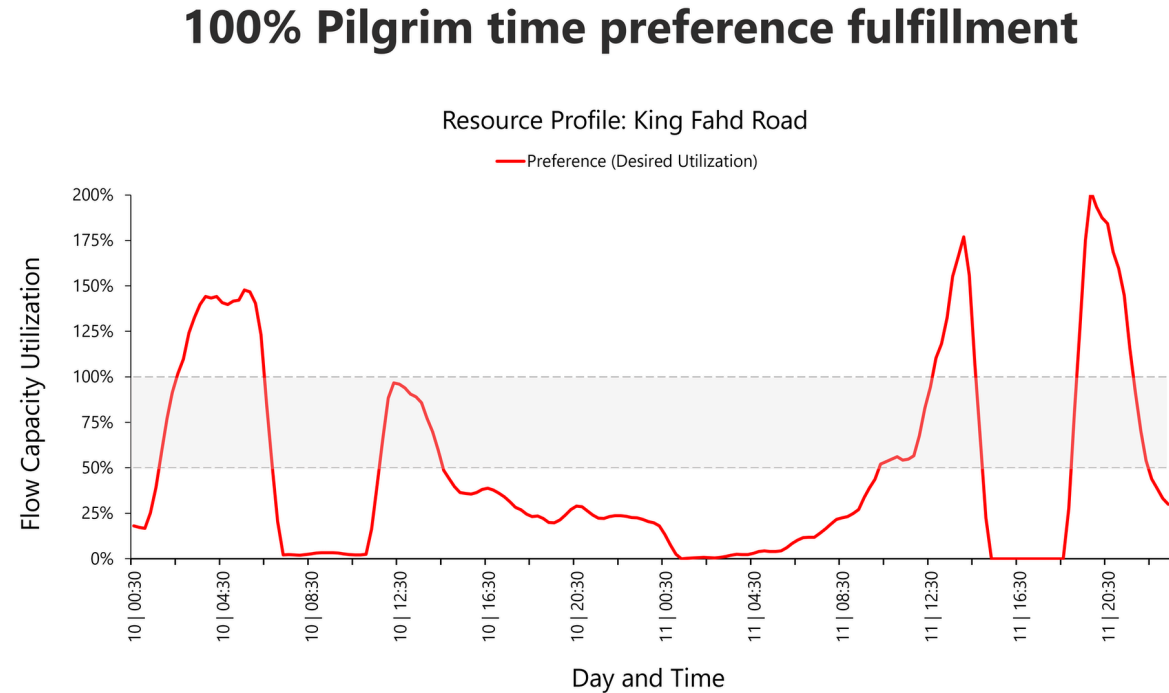
- Pilger haben je Ritualtag **Zeitpräferenzen**; auch **religiöse Traditionen** prägen die Wahl.
- Logistische Grenzen (An- und Abfahrt der **Shuttles**), extreme **Wüstenhitze**, enge Infrastruktur.
- In Extremfällen eskalierte unkoordinierter Zugang zu **Massenkatastrophen**.

Spitzenzeiten

100% Pilgrim time preference fulfillment

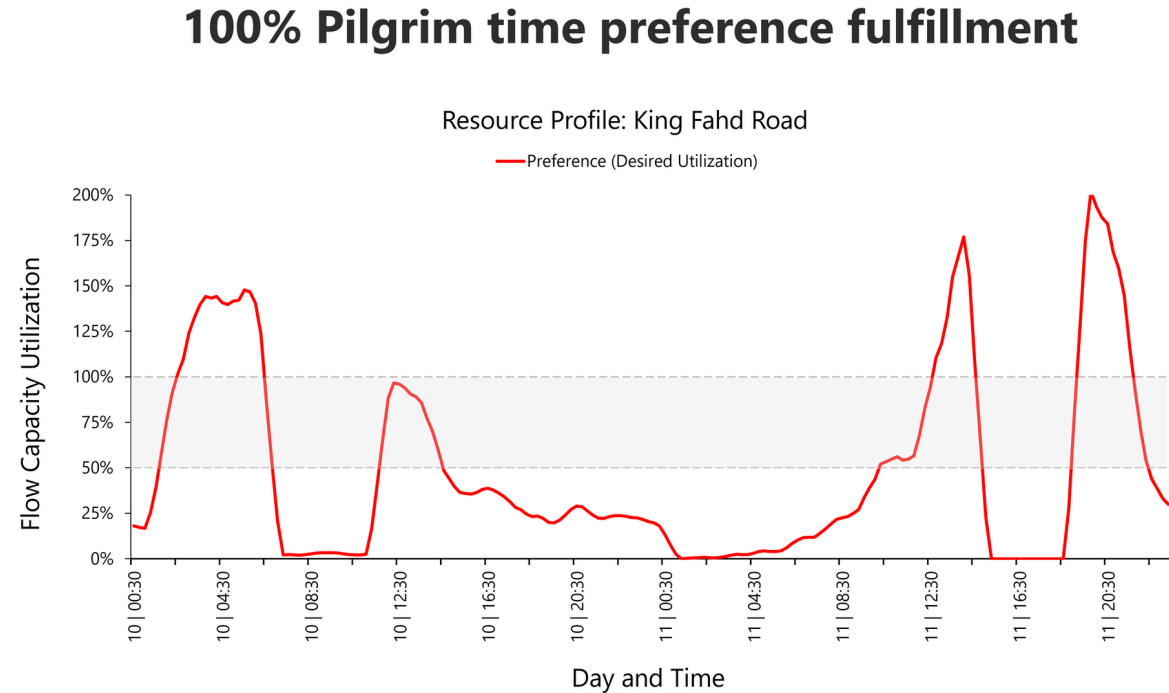


Spitzenzeiten



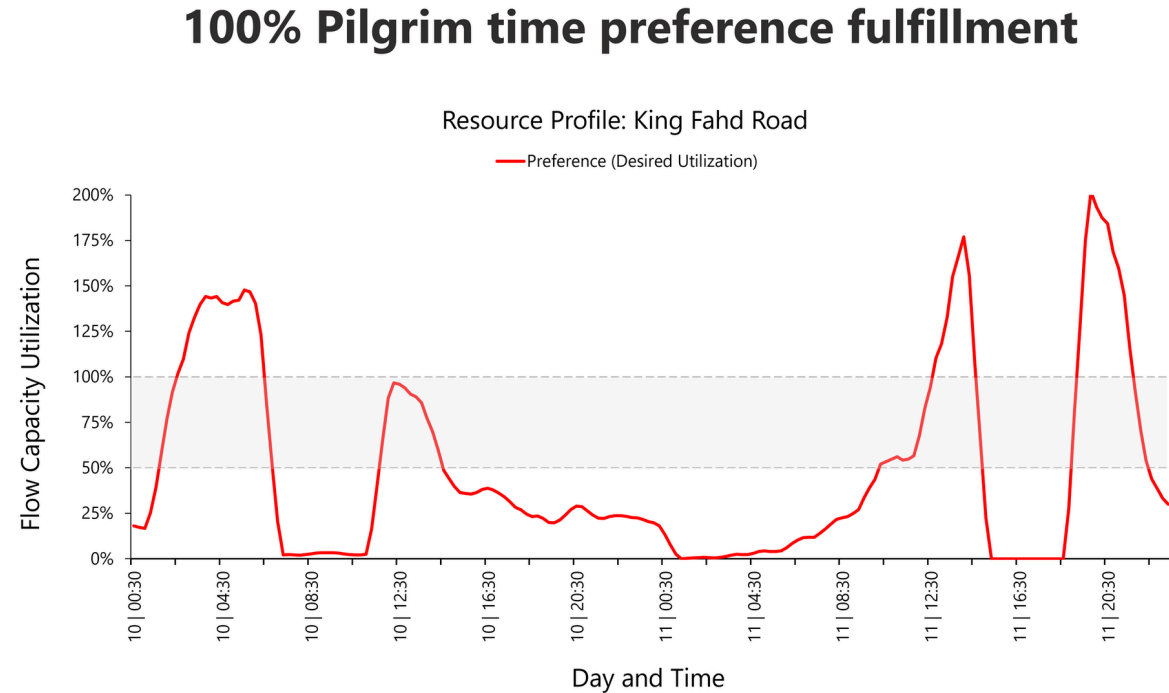
- Die Wünsche ballen sich um **Spitzenzeiten**, die auf den Propheten Mohammed zurückgehen.

Spitzenzeiten



- Die Wünsche ballen sich um **Spitzenzeiten**, die auf den Propheten Mohammed zurückgehen.
- **2 bis 4 Millionen** Menschen wollen binnen weniger Stunden an denselben Ort.

Spitzenzeiten



- Die Wünsche ballen sich um **Spitzenzeiten**, die auf den Propheten Mohammed zurückgehen.
- **2 bis 4 Millionen** Menschen wollen binnen weniger Stunden an denselben Ort.
- Gewünschte Auslastung der King Fahd Road: bis zu **200 %** der Kapazität.

Crowd Disasters

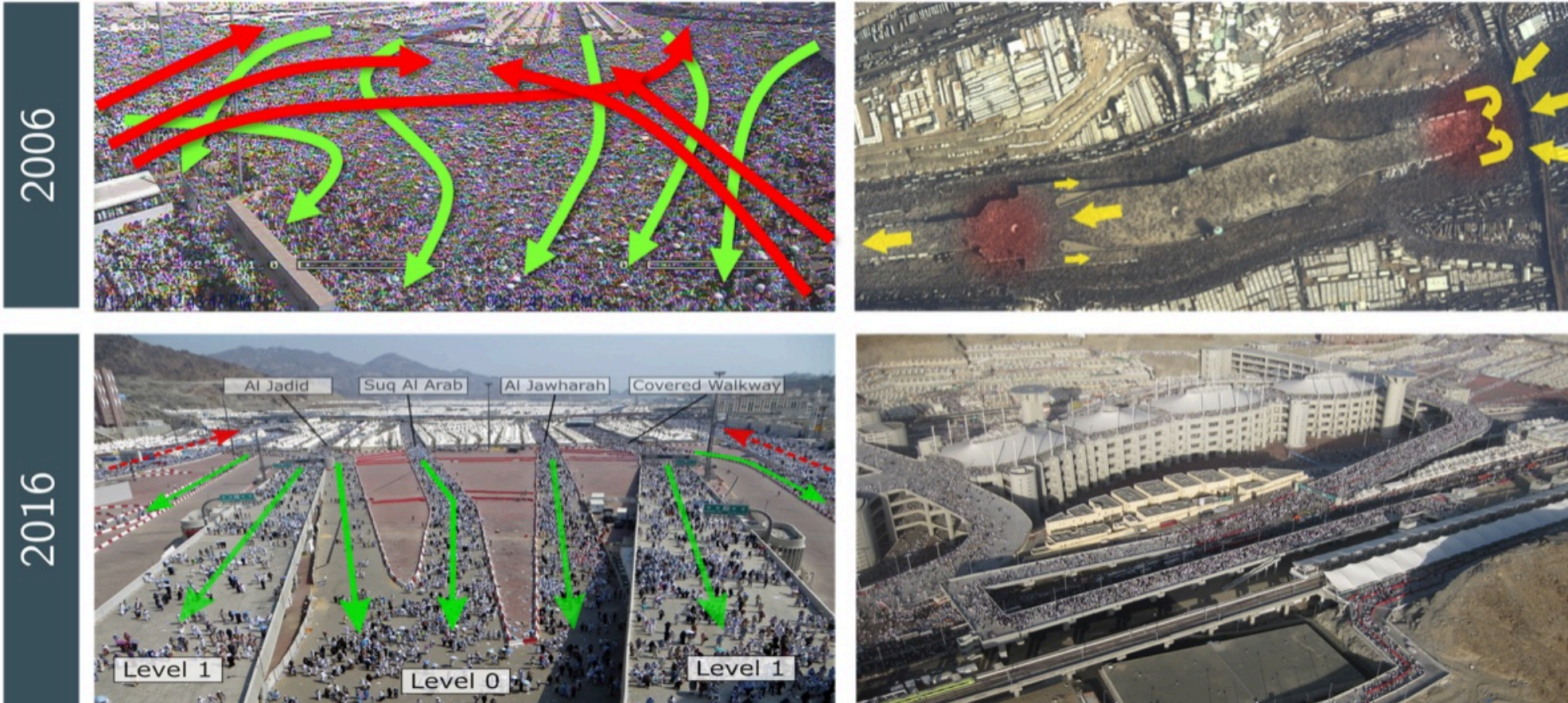
Jahr	Ort	Tote
1990	Al-Ma'aisim	1 426
1994	Jamarat	266
1997	Jamarat	22
1998	Jamarat	118
2001	Jamarat	35
2004	Jamarat	251
2006	Jamarat	363
2015	Mina	769 offiziell, 2 411 laut AP

Crowd Disasters

Jahr	Ort	Tote
1990	Al-Ma'aisim	1 426
1994	Jamarat	266
1997	Jamarat	22
1998	Jamarat	118
2001	Jamarat	35
2004	Jamarat	251
2006	Jamarat	363
2015	Mina	769 offiziell, 2 411 laut AP

Lange Wartezeiten und Engpässe machen die Pilgerfahrt gefährlich:
ein **Ablaufplanungsproblem**.

Pilgerströme ordnen



Kreuzende Ströme sind am gefährlichsten. 2006 kreuzten sie sich an der Jamarat-Brücke, 2016 laufen sie als **Einbahnwege** auf mehreren Ebenen.

Der OR-Beitrag

Anpassungen auf Basis von Operations Research:

Der OR-Beitrag

Anpassungen auf Basis von Operations Research:

- **Zeitplanung** der Steinigungsrituale (*Path Assignment & Timetabling*).

Der OR-Beitrag

Anpassungen auf Basis von Operations Research:

- **Zeitplanung** der Steinigungsrituale (*Path Assignment & Timetabling*).
- **Metronutzung** und Pilgerstrom-Monitoring.

Der OR-Beitrag

Anpassungen auf Basis von Operations Research:

- **Zeitplanung** der Steinigungsrituale (*Path Assignment & Timetabling*).
- **Metronutzung** und Pilgerstrom-Monitoring.
- Mobile **Apps**, elektronische **E-Gates** (RFID), Online-Karten, **Simulation**.

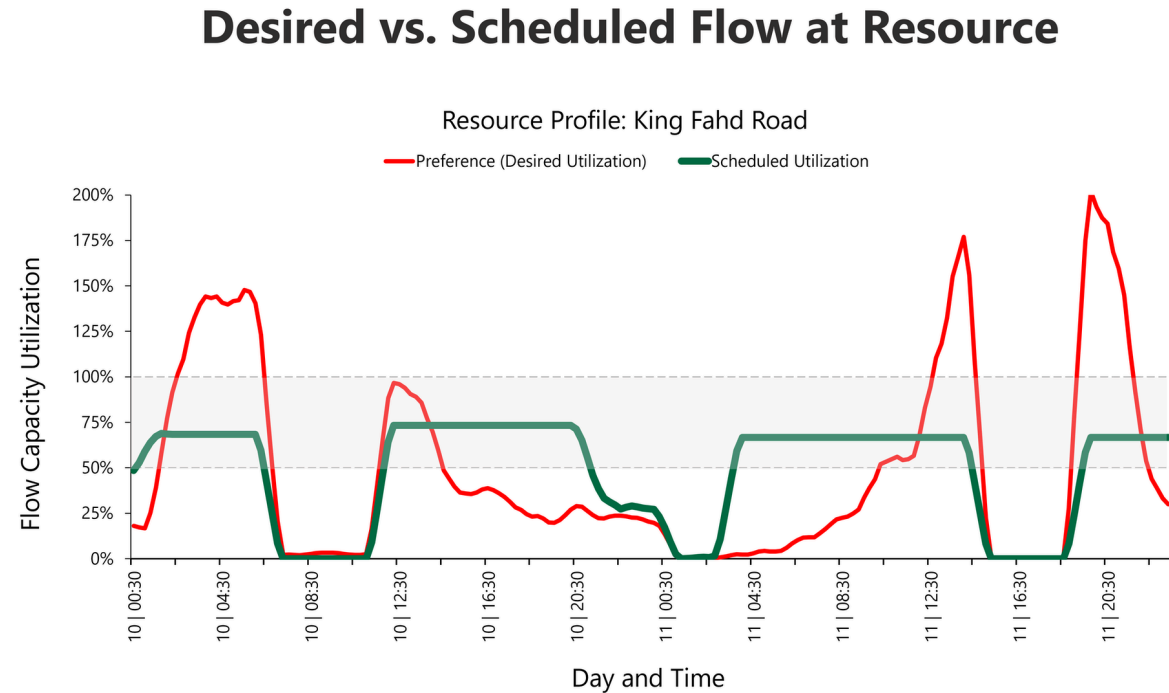
Der OR-Beitrag

Anpassungen auf Basis von Operations Research:

- **Zeitplanung** der Steinigungsrituale (*Path Assignment & Timetabling*).
- **Metronutzung** und Pilgerstrom-Monitoring.
- Mobile **Apps**, elektronische **E-Gates** (RFID), Online-Karten, **Simulation**.

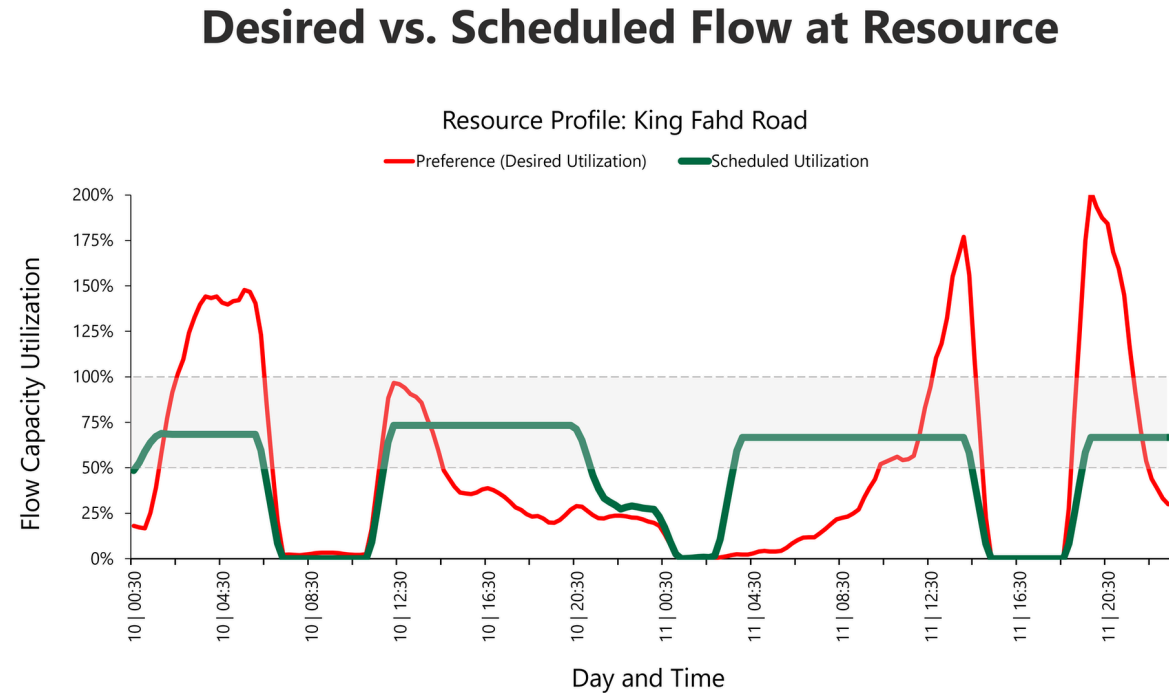
Im Kern: Ströme über ein **Netzwerk** zeitlich so verteilen, dass Engpässe vermieden werden (die Werkzeuge aus V06 und V09).

Der Plan glättet die Spitzen



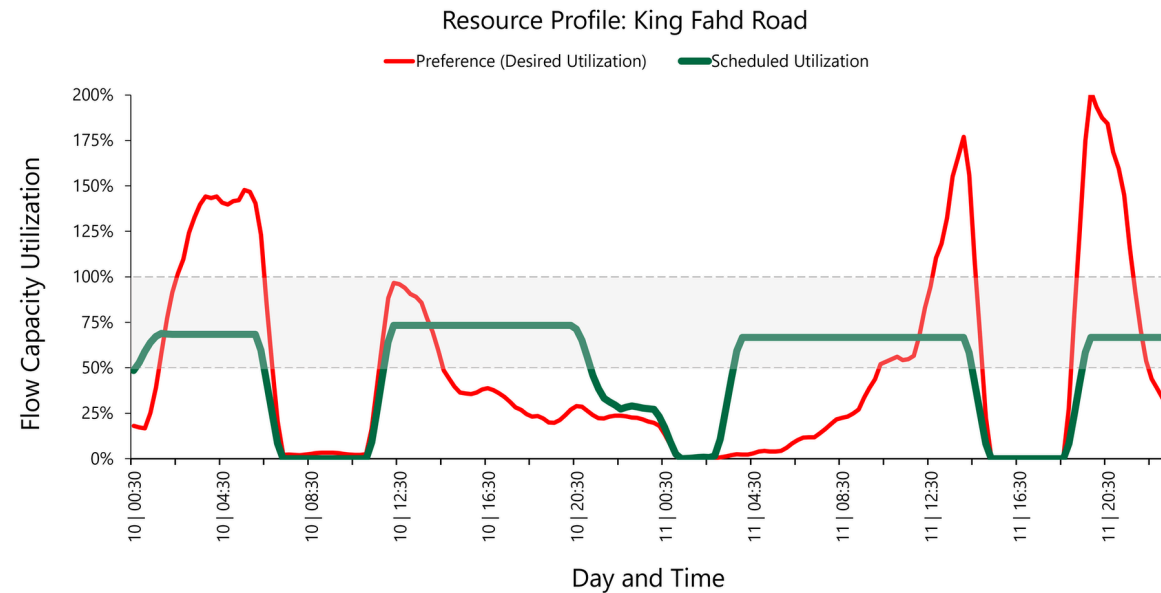
Der Plan glättet die Spitzen

- Jede Pilgergruppe erhält je Ritualtag ein **Zeitfenster** und einen **Weg**.



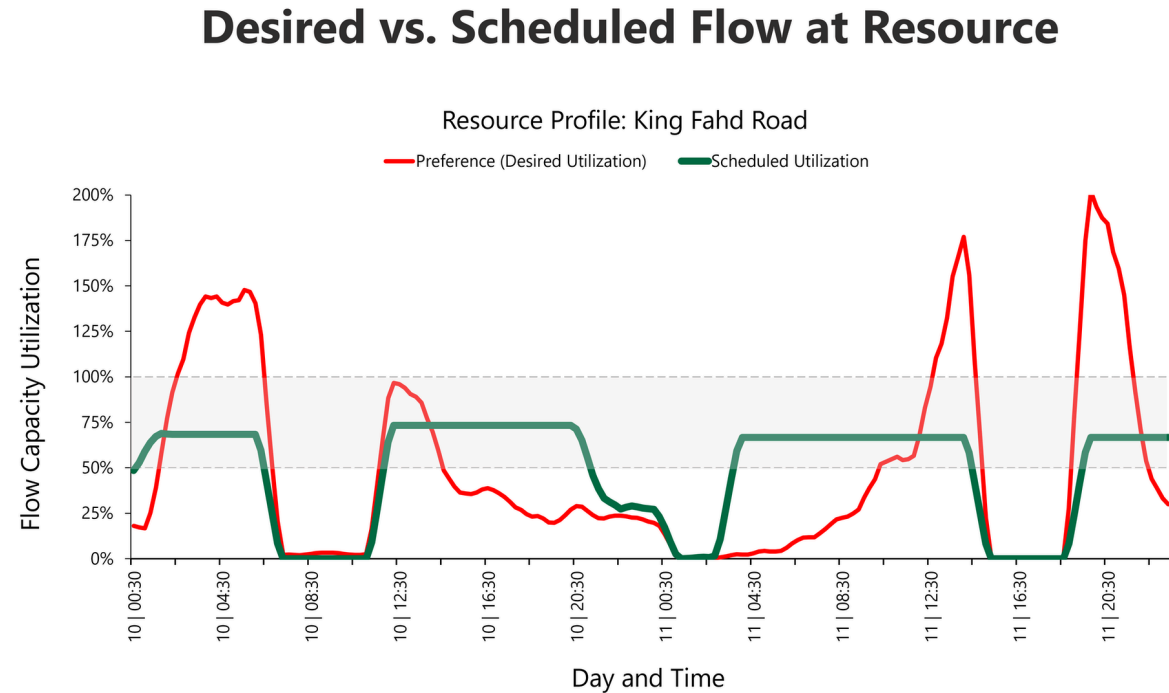
Der Plan glättet die Spitzen

Desired vs. Scheduled Flow at Resource



- Jede Pilgergruppe erhält je Ritualtag ein **Zeitfenster** und einen **Weg**.
- Rot: gewünschte, grün: geplante Auslastung.

Der Plan glättet die Spitzen



- Jede Pilgergruppe erhält je Ritualtag ein **Zeitfenster** und einen **Weg**.
- Rot: gewünschte, grün: geplante Auslastung.
- Sicherheit zuerst: Die **Kapazität** hält, die Wunschzeiten werden so gut wie möglich getroffen.

Weitere Anwendungen

Dieselben Bausteine tragen viele weitere Projekte:

Weitere Anwendungen

Dieselben Bausteine tragen viele weitere Projekte:

- Standortplanung für Automobilhändler.

Weitere Anwendungen

Dieselben Bausteine tragen viele weitere Projekte:

- **Standortplanung** für Automobilhändler.
- **Tourenplanung**: Getränkehandel, medizinische Labore, Bücherhallen.

Weitere Anwendungen

Dieselben Bausteine tragen viele weitere Projekte:

- **Standortplanung** für Automobilhändler.
- **Tourenplanung**: Getränkehandel, medizinische Labore, Bücherhallen.
- **Waren-Lager-Zuordnung** in der Logistik.

Weitere Anwendungen

Dieselben Bausteine tragen viele weitere Projekte:

- Standortplanung für Automobilhändler.
- Tourenplanung: Getränkehandel, medizinische Labore, Bücherhallen.
- Waren-Lager-Zuordnung in der Logistik.
- Steuerung von Metroauslastungen.

Weitere Anwendungen

Dieselben Bausteine tragen viele weitere Projekte:

- Standortplanung für Automobilhändler.
- Tourenplanung: Getränkehandel, medizinische Labore, Bücherhallen.
- Waren-Lager-Zuordnung in der Logistik.
- Steuerung von Metroauslastungen.
- Sitzpläne unter Abstandsregeln.

Pakete im Onlinehandel



Welcher von **100 000+** Artikeln liegt in welchem Lager?

Pakete im Onlinehandel



Welcher von **100 000+** Artikeln liegt in welchem Lager?

- Liegen die Artikel eines Auftrags in verschiedenen Lagern, kommen **zwei Pakete**.

Pakete im Onlinehandel



Welcher von **100 000+** Artikeln liegt in welchem Lager?

- Liegen die Artikel eines Auftrags in verschiedenen Lagern, kommen **zwei Pakete**.
- Ausgangslage: **6,95 %** aller Aufträge wurden geteilt.

Pakete im Onlinehandel



Welcher von **100 000+** Artikeln liegt in welchem Lager?

- Liegen die Artikel eines Auftrags in verschiedenen Lagern, kommen **zwei Pakete**.
- Ausgangslage: **6,95 %** aller Aufträge wurden geteilt.
- Eine Zuordnung per Heuristik (Chi-Quadrat-Tests) senkt diese Teilungen rechnerisch um **82 %**.

Bibliotheken beliefern



Tourenplanung in Schleswig-Holstein:

Bibliotheken beliefern



Tourenplanung in Schleswig-Holstein:

- **165** Bibliotheken, **119** davon alle zwei Wochen.

Bibliotheken beliefern



Tourenplanung in Schleswig-Holstein:

- **165** Bibliotheken, **119** davon alle zwei Wochen.
- Bis zu **9** Touren, je höchstens **8 h**.

Bibliotheken beliefern



Tourenplanung in Schleswig-Holstein:

- **165** Bibliotheken, **119** davon alle zwei Wochen.
- Bis zu **9** Touren, je höchstens **8 h**.
- MIP nach 1 h: noch **40–45 %** Lücke zur Schranke.

Bibliotheken beliefern

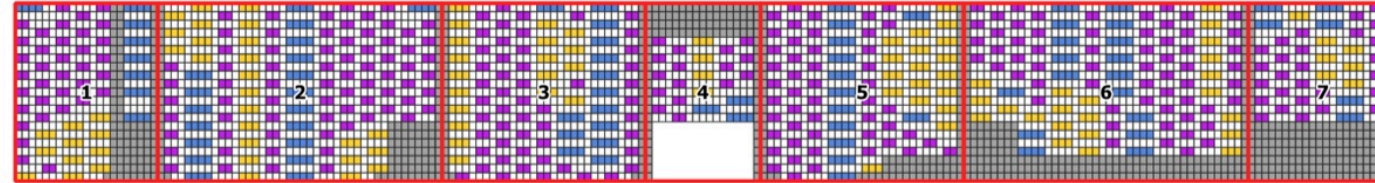


Tourenplanung in Schleswig-Holstein:

- **165** Bibliotheken, **119** davon alle zwei Wochen.
- Bis zu **9** Touren, je höchstens **8 h**.
- MIP nach 1 h: noch **40–45 %** Lücke zur Schranke.
- Heuristik: **unter 5 min**, rund **20 %** kürzere Strecke als von Hand, **12–15 t** weniger CO₂ im Jahr.

Sitzpläne unter Abstandsregeln

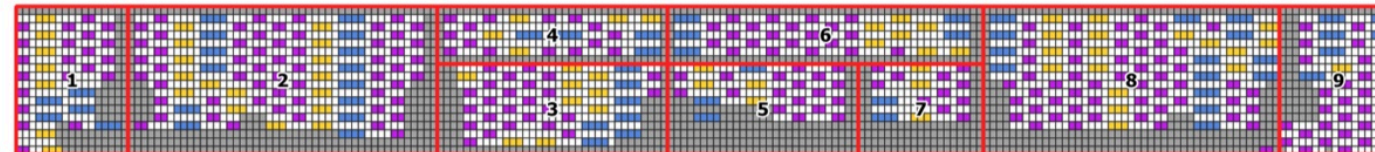
Block	Plätze		
	Verfügbar	Belegt	Belegt %
Nord 1	349	135	38.7%
Nord 2	788	290	36.8%
Nord 3	586	217	37.0%
Nord 4	150	56	37.3%
Nord 5	549	204	37.2%
Nord 6	692	254	36.7%
Nord 7	266	99	37.2%
Nord Gesamt	3380	1255	37.1%
Süd 1	214	83	38.8%
Süd 2	587	218	37.1%
Süd 3	281	105	37.4%
Süd 4	165	61	37.0%
Süd 5	153	60	39.2%
Süd 6	225	83	36.9%
Süd 7	105	39	37.1%
Süd 8	576	213	37.0%
Süd 9	251	96	38.2%
Süd Gesamt	2557	958	37.5%
Nord+Süd Gesamt	5937	2213	37.3%



Nordtribüne



Südtribüne

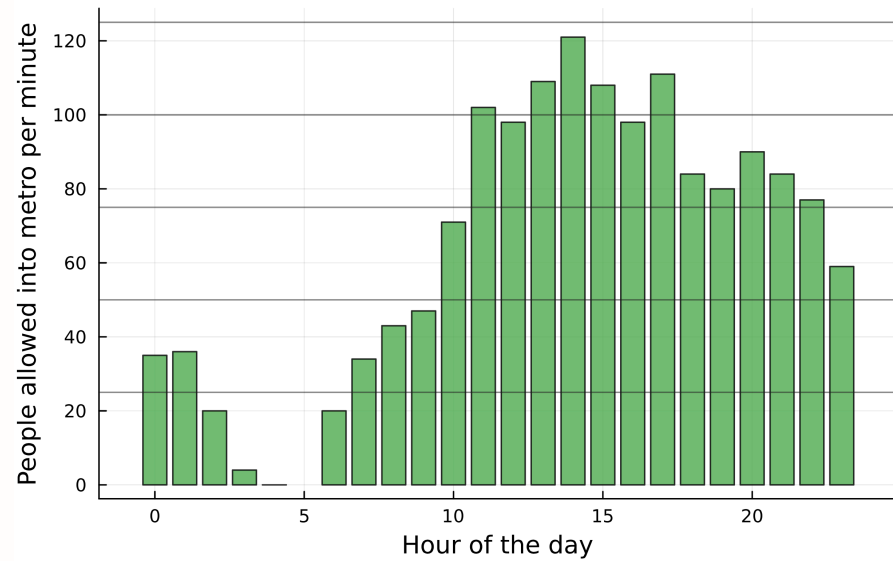


Modellrechnung Bremer Brücke

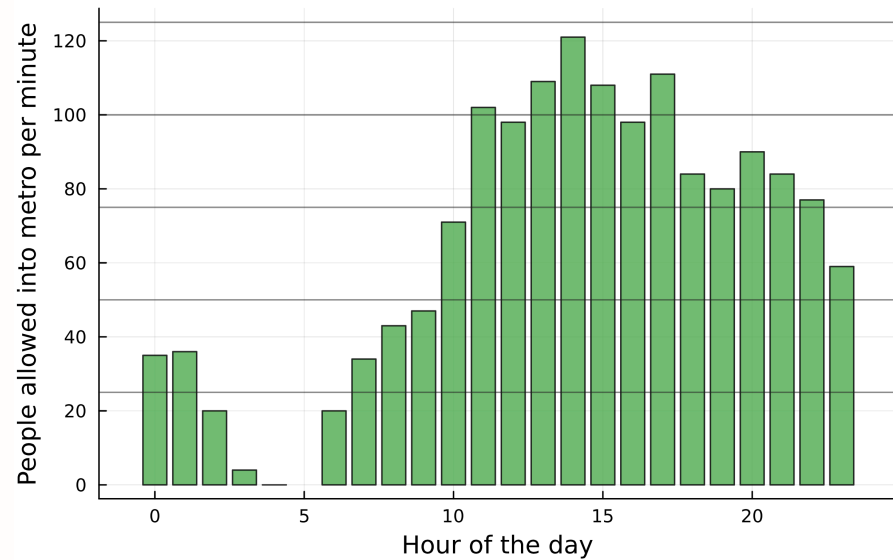
VfL Osnabrück, Relegation 2021: **241** zusätzliche Plätze (+12 %) unter allen Abstandsregeln, von den Behörden genehmigt, rund **8 435 €** Mehreinnahmen in einem Spiel.

Metro-Zufluss in Doha

WM 2022 in Katar, über 1 Mio. Gäste:



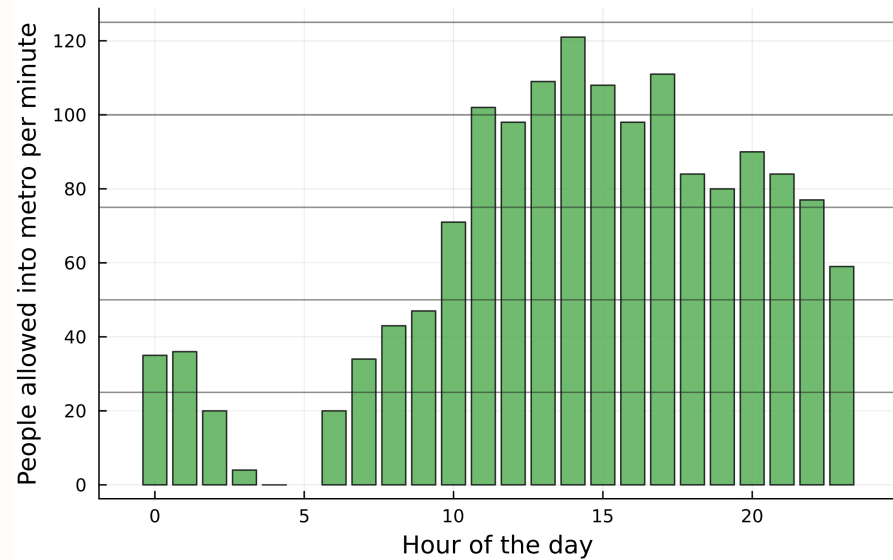
Metro-Zufluss in Doha



WM 2022 in Katar, über 1 Mio. Gäste:

- Kapazitätsüberschreitungen:
25 941 → 4.

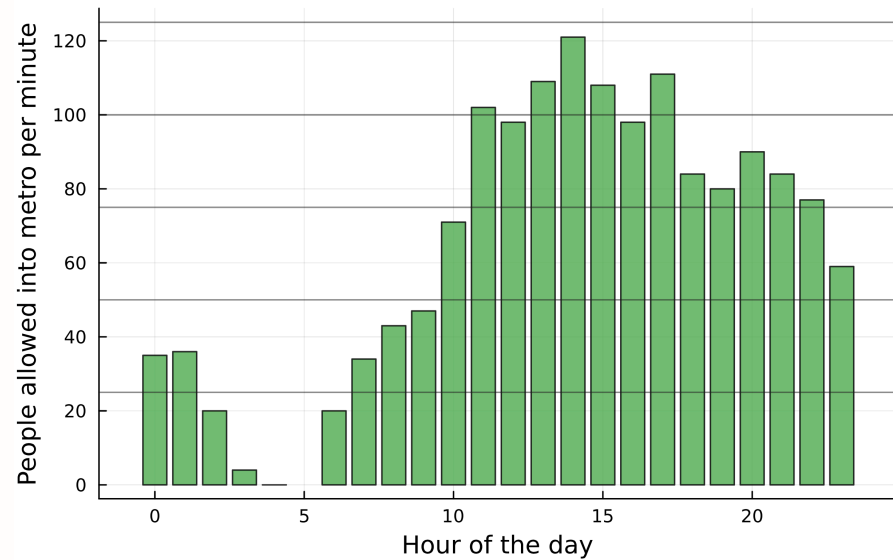
Metro-Zufluss in Doha



WM 2022 in Katar, über 1 Mio. Gäste:

- Kapazitätsüberschreitungen:
25 941 → 4.
- Höchste Auslastung einer Strecke:
316 % → 109 %.

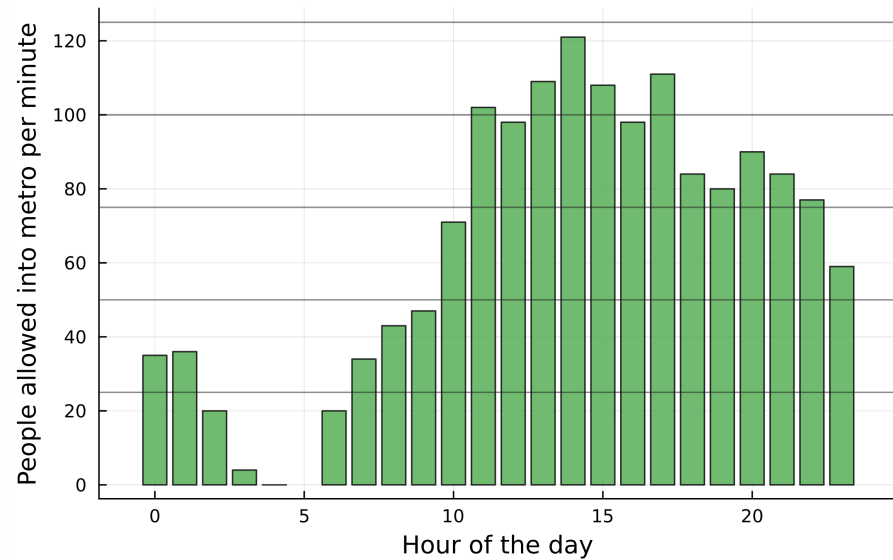
Metro-Zufluss in Doha



WM 2022 in Katar, über 1 Mio. Gäste:

- Kapazitätsüberschreitungen:
25 941 → 4.
- Höchste Auslastung einer Strecke:
316 % → 109 %.
- **81 %** sicher befördert, der Rest wartet draußen.

Metro-Zufluss in Doha



WM 2022 in Katar, über 1 Mio. Gäste:

- Kapazitätsüberschreitungen: 25 941 → 4.
- Höchste Auslastung einer Strecke: 316 % → 109 %.
- 81 % sicher befördert, der Rest wartet draußen.
- Rechenzeit: rund 1,4 s je Planungsperiode.

Zusammenfassung

Operations Research wirkt

Operations Research wirkt

- **Brauerei:** Losgrößen-MIP steuert eine Jahresproduktion.

Operations Research wirkt

- **Brauerei:** Losgrößen-MIP steuert eine Jahresproduktion.
- **Verkaufsgebiete:** eine Optimierung statt drei Bauchentscheidungen.

Operations Research wirkt

- **Brauerei:** Losgrößen-MIP steuert eine Jahresproduktion.
- **Verkaufsgebiete:** eine Optimierung statt drei Bauchentscheidungen.
- **Distrikte:** Reaktionszeiten sinken um über 14 %.

Operations Research wirkt

- **Brauerei:** Losgrößen-MIP steuert eine Jahresproduktion.
- **Verkaufsgebiete:** eine Optimierung statt drei Bauchentscheidungen.
- **Distrikte:** Reaktionszeiten sinken um über 14 %.
- **Discrete Choice:** Marktanteile aufs Zehntelprozent prognostiziert.

Operations Research wirkt

- **Brauerei:** Losgrößen-MIP steuert eine Jahresproduktion.
- **Verkaufsgebiete:** eine Optimierung statt drei Bauchentscheidungen.
- **Distrikte:** Reaktionszeiten sinken um über 14 %.
- **Discrete Choice:** Marktanteile aufs Zehntelprozent prognostiziert.
- **Crowd-Management:** Netzwerkmodelle retten Leben.

Operations Research wirkt

- **Brauerei:** Losgrößen-MIP steuert eine Jahresproduktion.
- **Verkaufsgebiete:** eine Optimierung statt drei Bauchentscheidungen.
- **Distrikte:** Reaktionszeiten sinken um über 14 %.
- **Discrete Choice:** Marktanteile aufs Zehntelprozent prognostiziert.
- **Crowd-Management:** Netzwerkmodelle retten Leben.

Die **Bausteine** dieses Kurses (LP, MIP, Graphen, Netzpläne) sind genau die Werkzeuge dieser Projekte.

Literatur

Literaturverzeichnis

- Bruce, Christopher. 2009. „Districting and Resource Allocation: A Question of Balance“. *A Quarterly Bulletin of Applied Geography for the Study of Crime & Public Safety* 1 (4): 1–3.
- Dkaidik, Usama, und Matthes Koch. 2025. „Arena Seat Planning Under Distancing Rules“. In *Operations Research Proceedings 2024*. Lecture Notes in Operations Research. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-92575-7_12.
- Domschke, Wolfgang, Andreas Drexl, Robert Klein, und Armin Scholl. 2015. *Einführung in Operations Research*. 9. Aufl. Springer Gabler. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-48216-2>.
- Gambrell, Jon. 2015. „Hajj stampede death toll tops 2,400, hundreds missing“. Associated Press, veröffentlicht in The Times of Israel, Dezember 10. <https://www.timesofisrael.com/hajj-stampede-death-toll-tops-2400-hundreds-missing/>.

Literaturverzeichnis (2/3)

- Haase, Knut, Habib Zain Al Abideen, Salim Al-Bosta, u. a. 2016. „Improving Pilgrim Safety During the Hajj: An Analytical and Operational Research Approach“. *Interfaces* 46 (1): 74–90. <https://doi.org/10.1287/inte.2015.0833>.
- Liberatore, Federico, Miguel Camacho-Collados, und Begoña Vitoriano. 2020. „Police Districting Problem: Literature Review and Annotated Bibliography“. In *Optimal Districting and Territory Design*, herausgegeben von Roger Z. Ríos-Mercado. International Series in Operations Research & Management Science. Springer International Publishing.
- Mickein, Markus, Matthes Koch, und Knut Haase. 2022. „A Decision Support System for Brewery Production Planning at Feldschlösschen“. *INFORMS Journal on Applied Analytics* 52 (2): 158–72. <https://doi.org/10.1287/inte.2021.1101>.
- Vlček, Tobias, Knut Haase, Malte Fliedner, und Tobias Cors. 2024. „Police Service District Planning“. *OR Spectrum* 46 (4): 1029–61. <https://doi.org/10.1007/s00291-024-00745-3>.

Literaturverzeichnis (3/3)

- Vlček, Tobias, Knut Haase, Matthes Koch, Lena Dolz, Anneke Weygandt, und Jan Pape. 2023. „Controlling Passenger Flows into Metro Systems to Mitigate Overcrowding During Large-Scale Events“. *Working Paper*.
- Vlček, Tobias, und Guido Voigt. 2023. „Optimizing SKU-Warehouse Allocations to Minimize Split Parcels in E-Commerce Environments“. *Working Paper*.