

---

# DAS ADA-LOVELACE-CENTER FÜR ANALYTICS, DATEN UND ANWENDUNGEN

Optimierung im ADA-Lovelace-Center – Spannendes aus der Praxis

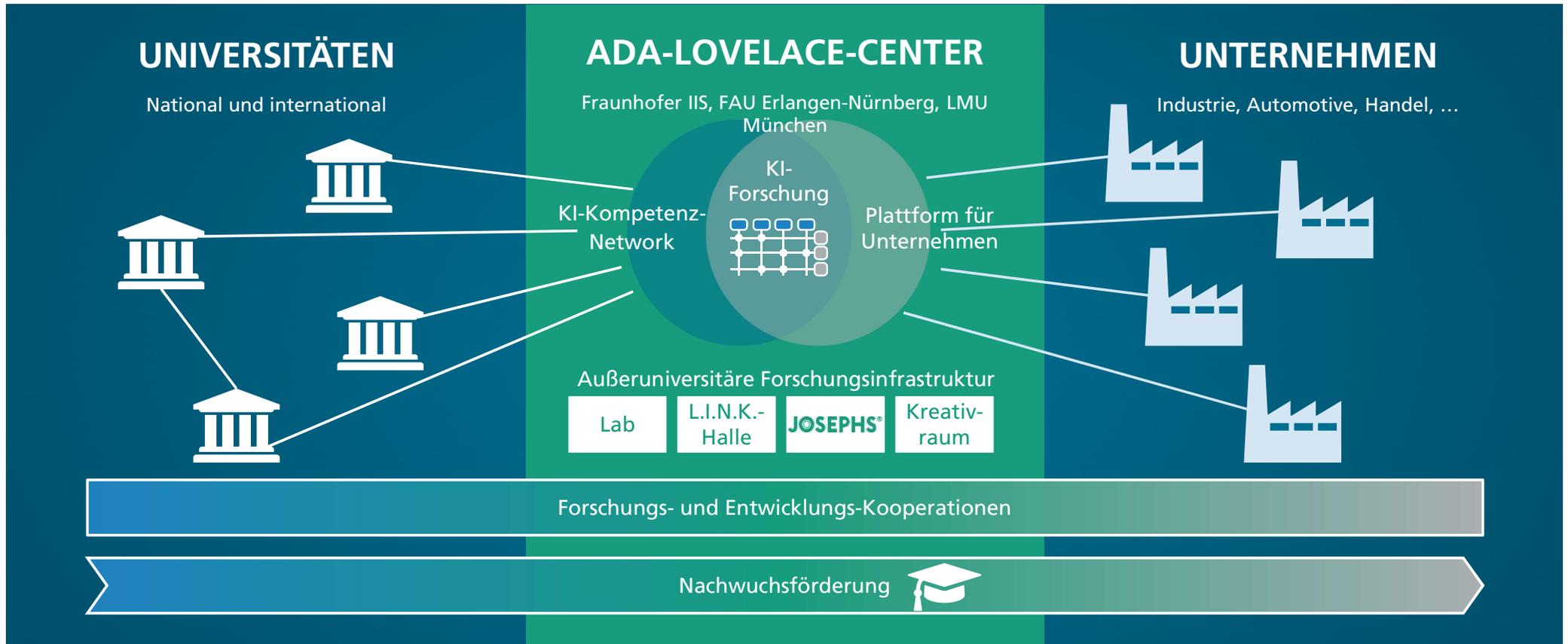
Dr. Andreas Bärmann, Lehrstuhl für Wirtschaftsmathematik, FAU Erlangen-Nürnberg

---



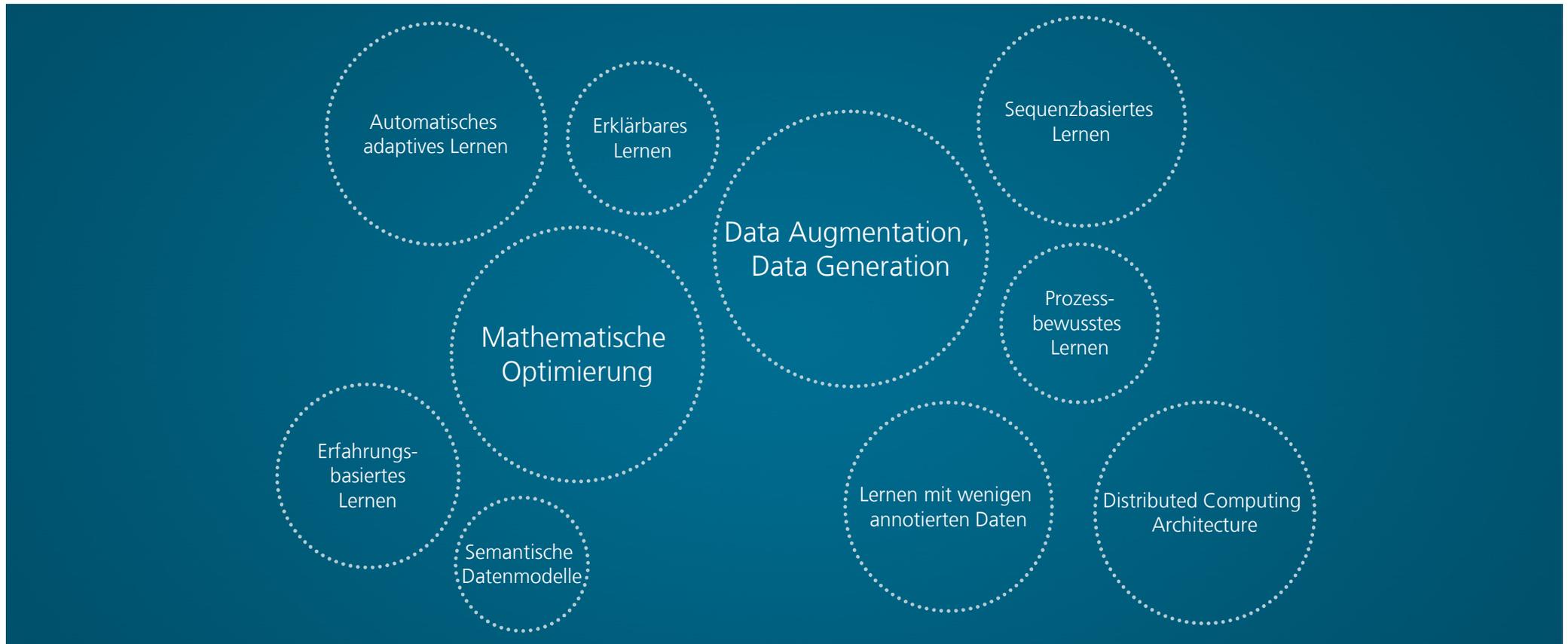
# Das ADA Lovelace Center für künstliche Intelligenz

## Ein Netzwerk, das Forschung und Industrie zusammenbringt



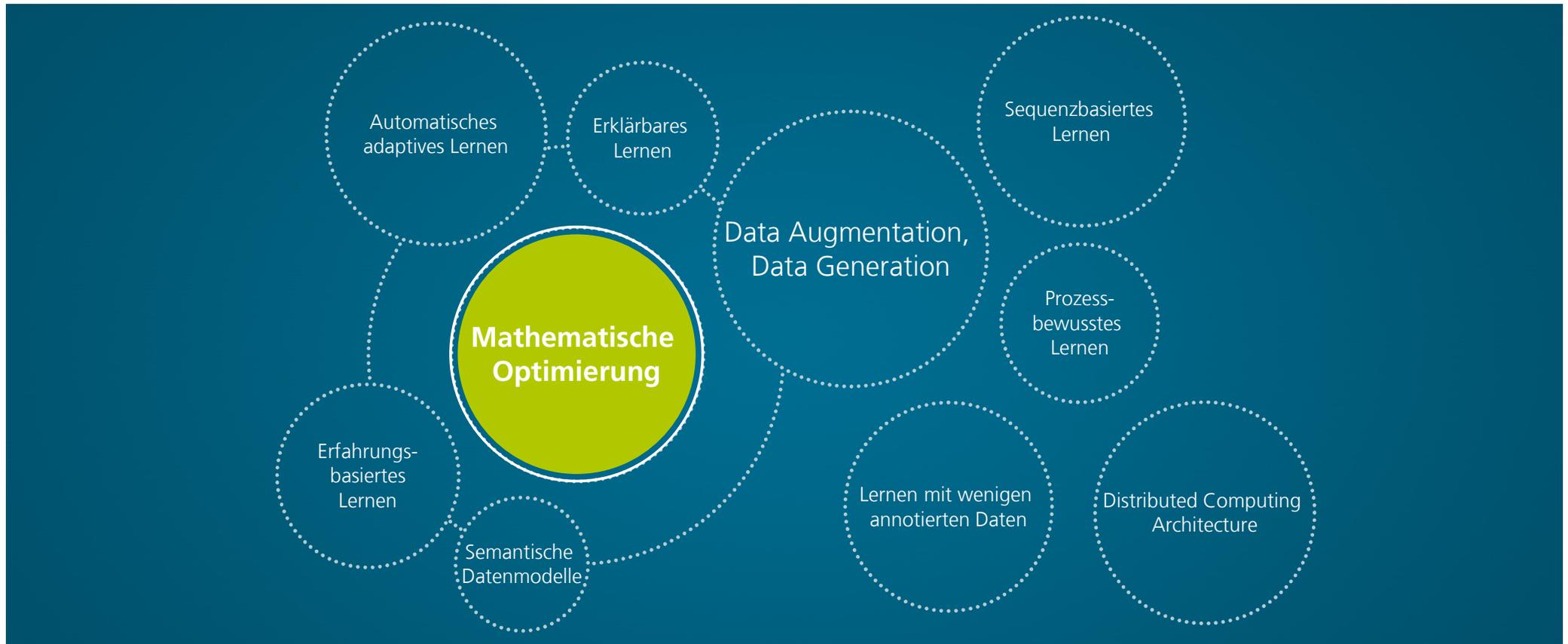
# Das ADA-Lovelace-Center

## Forschungsfelder in der künstlichen Intelligenz



# ADA Lovleace Center

## KI-Forschungsfelder



# Warum Optimierung?

## Praktische Vorteile

### Optimierung kann helfen ...

- Geld effizienter zu benutzen
- Qualität zu garantieren
- robuste Lösungen zu erhalten
- Kapazität zu schaffen
- Flexibilität zu gewährleisten
- ...

# Unsere Referenzen

## Partner aus der Industrie



# Energiekosten sparen durch optimierte Fahrpläne

## Hintergründe zum Stromverbrauch im deutschen Schienennetz

- Der Zugverkehr ist der größte Stromverbraucher in Deutschland (11 Milliarden kWh / 2% des Gesamtverbrauches)
- Ausgaben der Deutschen Bahn AG für Traktionsstrom: ca. 1 Mrd. € / Jahr
- Typische Kostenverteilung eines Eisenbahnverkehrsunternehmens (EVU):
  - 75% für den Gesamtenergieverbrauch
  - 25% für die Spitzenlast
- Auf beide Kostenanteile hat der Fahrplan großen Einfluss!



=



# Energiekosten sparen durch optimierte Fahrpläne

## Die mathematische Sicht auf optimale Fahrpläne

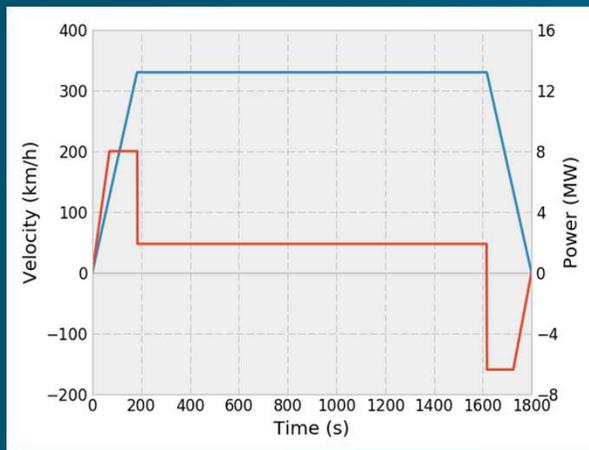


- Es gibt sehr viele mögliche Fahrpläne:  
Bei 4 Zügen mit je 3 Teilstrecken und 7 wählbaren Abfahrtszeitpunkten pro Abfahrt gibt es bereits  $7^{12} \approx 14.000.000.000$  mögliche Fahrpläne
- Mit modernen mathematischen Algorithmen kommt man noch in viel größere Bereiche!

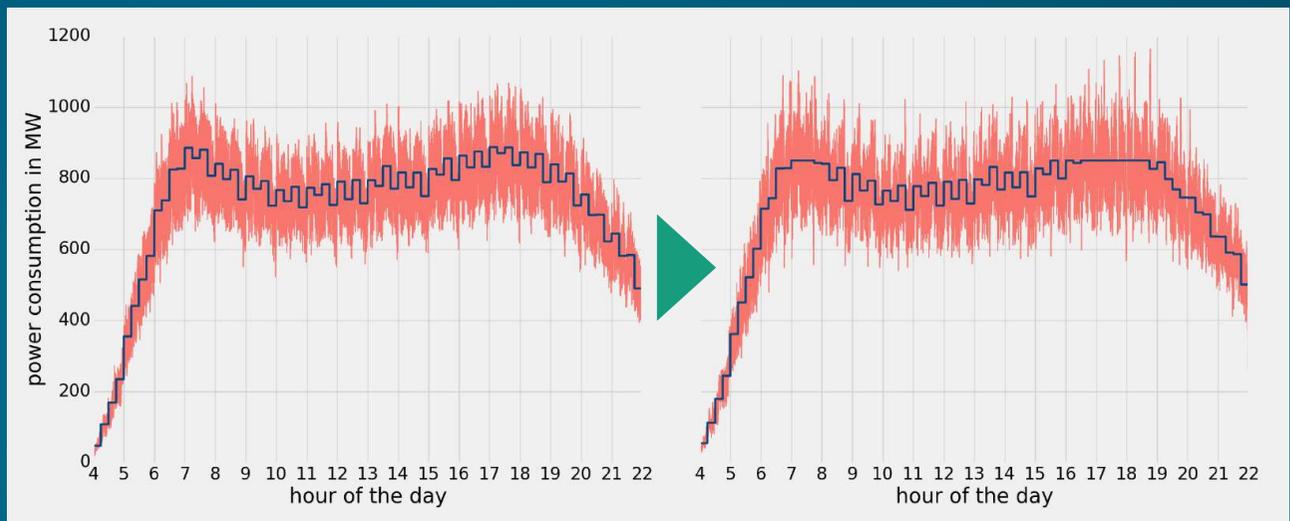
# Energiekosten sparen durch optimierte Fahrpläne

## Ergebnisse für den DB-Personenverkehr

### IDEALISIERTES PROFIL



### VORHER



### NACHHER

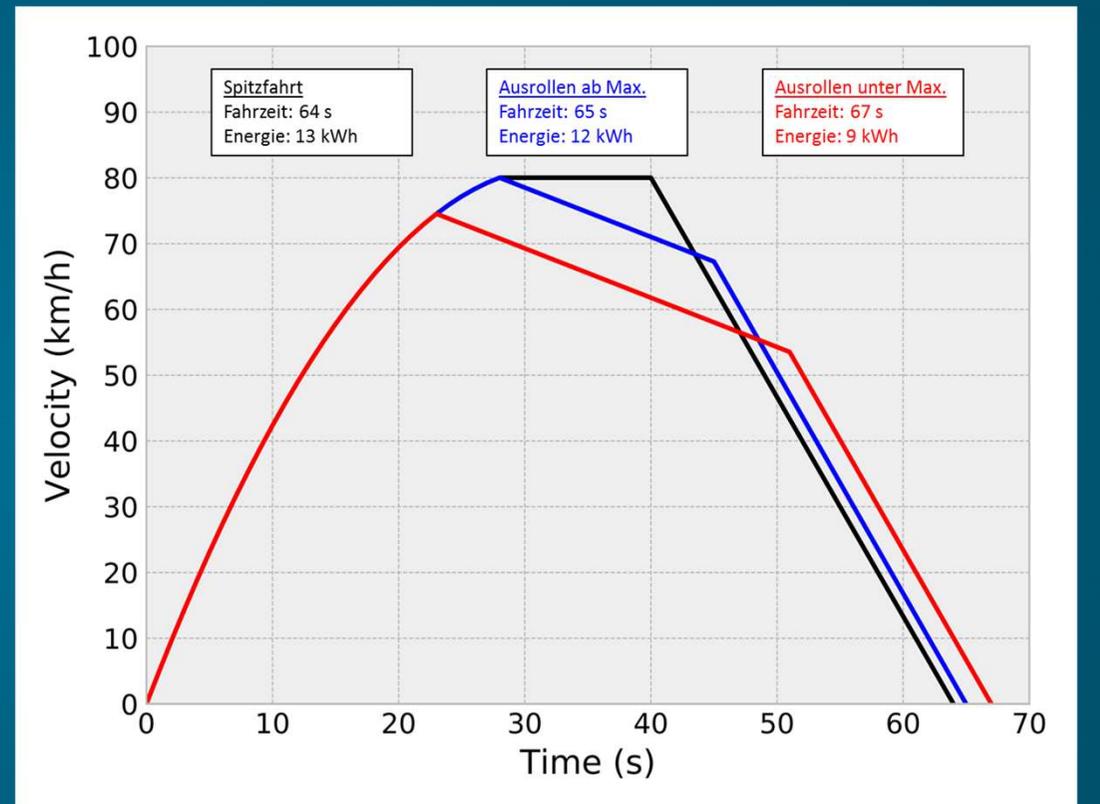
- 22.000 Regional- und Fernzüge, 4 – 22 Uhr, Verschiebung:  $\pm 3$  Minuten
- Einsparung in der Spitzenlast: 38 MW, entspricht ca. 5 Millionen € / Jahr
- Lösungszeit des Problems: ca. 3 Minuten



# Energiekosten sparen durch optimierte Fahrpläne

## Der nächste Schritt: Einbeziehung der Fahrweise

- Das Fahrverhalten eines U-Bahnzuges bestimmt seinen Energieverbrauch:
- Typischer Effekt: 5% längere Fahrzeit spart 1/3 der Energie!



# Energiekosten sparen durch optimierte Fahrpläne

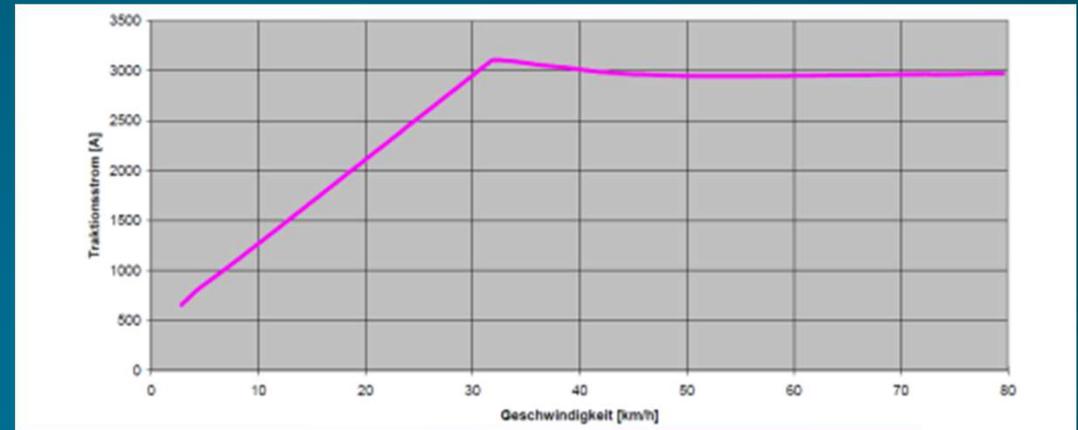
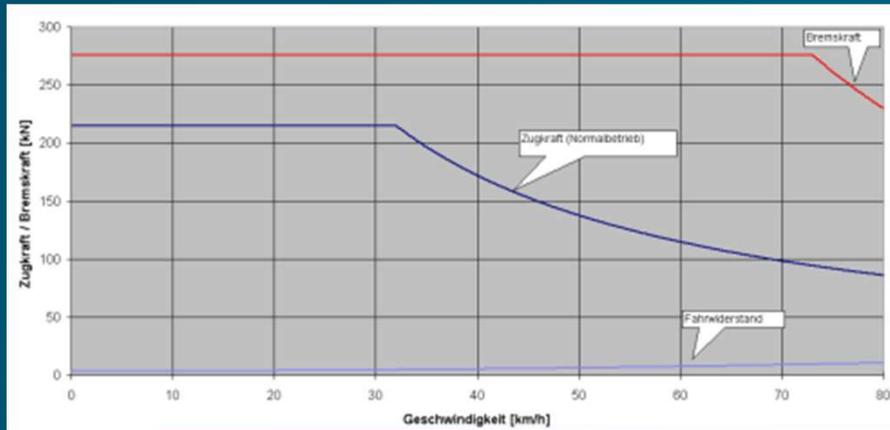
## Datengrundlage: Der Fahrplan der Nürnberger U-Bahn

- Eine Excel-Datei für jede Linie
- Alle Fahrten über einen Tag hinweg
- Ca. 1000 Züge, 24.000 Abfahrten

Microsoft Excel - Fahrplan U1																			
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
2	HBT: MF BT/G: ?																		
3	Linie: U1 RI: 1																		
4																			
5	Unterlinie	0	3	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	0
6	Betriebstag(gruppe)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7	Fahrttyp	P	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
8	Fahrzeitprofil	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
9	Takt (min)																		
10	bis (Uhrzeit)																		
11	Index-Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
12																			
13	Hardhöhe	ab	4:16:05		4:47:05	4:55:05	5:02:05	5:09:05	5:15:05	5:22:05	5:29:05	5:35:05	5:42:05	5:49:05	5:55:05	6:02:05	6:09:05		6:15:05
14	Klinikum Fürth		4:17:36		4:48:36	4:56:36	5:03:36	5:10:36	5:16:36	5:23:36	5:30:36	5:36:36	5:43:36	5:50:36	5:56:36	6:03:36	6:10:36		6:16:36
15	Stadthalle		4:19:03	4:43:03	4:50:03	4:58:03	5:05:03	5:12:03	5:18:03	5:25:03	5:32:03	5:38:03	5:45:03	5:52:03	5:58:03	6:05:03	6:12:03		6:18:03
16	Rathaus		4:20:16	4:44:16	4:51:16	4:59:16	5:06:16	5:13:16	5:19:16	5:26:16	5:33:16	5:39:16	5:46:16	5:53:16	5:59:16	6:06:16	6:13:16		6:19:16
17	Fürth Hauptbahnhof		4:21:51	4:45:51	4:52:51	5:00:51	5:07:51	5:14:51	5:20:51	5:27:51	5:34:51	5:40:51	5:47:51	5:54:51	6:00:51	6:07:51	6:14:51		6:20:51
18	Jakobinenstr.		4:23:13	4:47:13	4:54:13	5:02:13	5:09:13	5:16:13	5:22:13	5:29:13	5:36:13	5:42:13	5:49:13	5:56:13	6:02:13	6:09:13	6:16:13		6:22:13
19	Stadtgrenze		4:24:37	4:48:37	4:55:37	5:03:37	5:10:37	5:17:37	5:23:37	5:30:37	5:37:37	5:43:37	5:50:37	5:57:37	6:03:37	6:10:37	6:17:37		6:23:37
20	Muggenhof		4:26:05	4:50:05	4:57:05	5:05:05	5:12:05	5:19:05	5:25:05	5:32:05	5:39:05	5:45:05	5:52:05	5:59:05	6:05:05	6:12:05	6:19:05		6:25:05
21	Eberhardshof	an	4:27:33	4:51:33	4:58:33	5:06:33	5:13:33	5:20:33	5:26:33	5:33:33	5:40:33	5:46:33	5:53:33	6:00:33	6:06:33	6:13:33	6:20:33		6:26:33
22	Eberhardshof	ab	4:27:33	4:51:33	4:58:33	5:06:33	5:13:33	5:20:33	5:26:33	5:33:33	5:40:33	5:46:33	5:53:33	6:00:33	6:06:33	6:13:33	6:20:33		6:26:33
23	Maximilianstr.		4:28:58	4:52:58	4:59:58	5:07:58	5:14:58	5:21:58	5:27:58	5:34:58	5:41:58	5:47:58	5:54:58	6:01:58	6:07:58	6:14:58	6:21:58		6:27:58
24	Bärenschanze		4:30:13	4:54:13	5:01:13	5:09:13	5:16:13	5:23:13	5:29:13	5:36:13	5:43:13	5:49:13	5:56:13	6:03:13	6:09:13	6:16:13	6:23:13		6:29:13
25	Gostenhof		4:31:23	4:55:23	5:02:23	5:10:23	5:17:23	5:24:23	5:30:23	5:37:23	5:44:23	5:50:23	5:57:23	6:04:23	6:10:23	6:17:23	6:24:23	6:27:23	6:30:23
26	Plärrer	an	4:32:56	4:56:56	5:03:56	5:11:56	5:18:56	5:25:56	5:31:56	5:38:56	5:45:56	5:51:56	5:58:56	6:05:56	6:11:56	6:18:56	6:25:56	6:28:56	6:31:56
27	Plärrer	ab	4:32:56	4:56:56	5:03:56	5:11:56	5:18:56	5:25:56	5:31:56	5:38:56	5:45:56	5:51:56	5:58:56	6:05:56	6:11:56	6:18:56	6:25:56	6:28:56	6:31:56
28	Weißer Turm		4:34:08	4:58:08	5:05:08	5:13:08	5:20:08	5:27:08	5:33:08	5:40:08	5:47:08	5:53:08	6:00:08	6:07:08	6:13:08	6:20:08	6:27:08	6:30:08	6:33:08
29	Lorenzkirche		4:35:40	4:59:40	5:06:40	5:14:40	5:21:40	5:28:40	5:34:40	5:41:40	5:48:40	5:54:40	6:01:40	6:08:40	6:14:40	6:21:40	6:28:40	6:31:40	6:34:40
30	Hauptbahnhof S	an	4:37:10	5:01:10	5:08:10	5:16:10	5:23:10	5:30:10	5:36:10	5:43:10	5:50:10	5:56:10	6:03:10	6:10:10	6:16:10	6:23:10	6:30:10	6:33:10	6:36:10

# Energiekosten sparen durch optimierte Fahrpläne

## Datengrundlage: Schaubilder für Zugkraft und Stromaufnahme

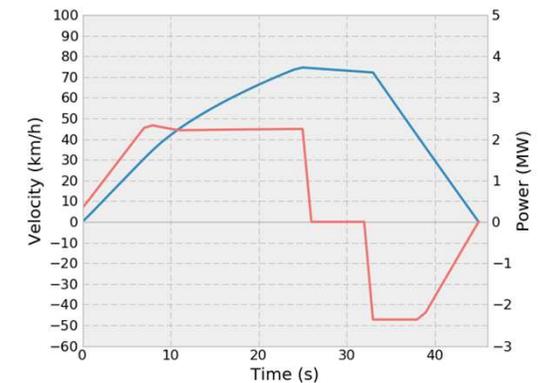


- Je ein Schaubild für die Zugkraft des Motors und seine Stromaufnahme, abhängig von der momentan gefahrenen Geschwindigkeit
- Grundlage für eine erste Schätzung der Energieverbräuche auf jeder Teilstrecke

# Energiekosten sparen durch optimierte Fahrpläne

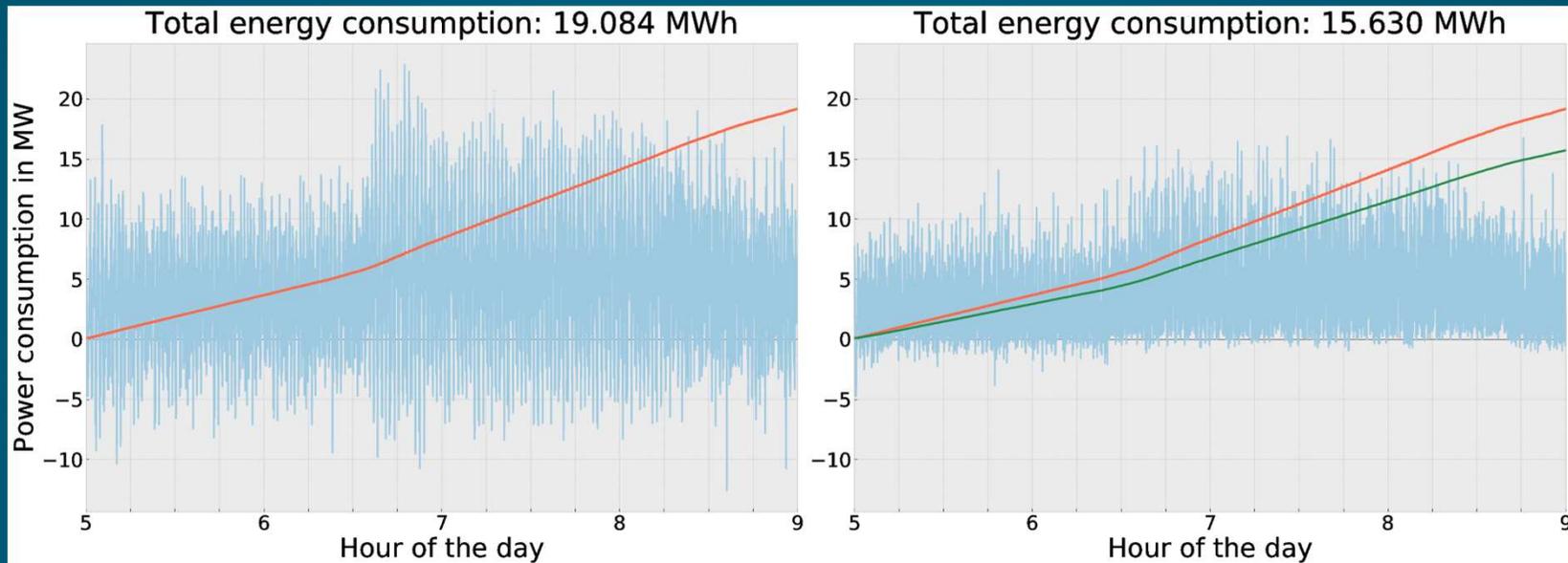
## Unsere erste Vorstudie für die VAG

- Fahrplan-Studie für die U1 von 5 Uhr bis 9 Uhr morgens
- Variation der Abfahrtszeiten um  $\pm 15$  Sekunden im Vergleich zum aktuellen Fahrplan
- 3 mögliche Fahrtprofile zur Auswahl
- Jede Abfahrt mit jedem Fahrtprofil kombinierbar
- Berücksichtigung von:
  - Mindesthaltezeiten
  - Sicherheitsabständen
  - Rückspeisungen der Züge



# Energiekosten sparen durch optimierte Fahrpläne

## Ergebnisse der Vorstudie: Mögliche Energieeinsparungen



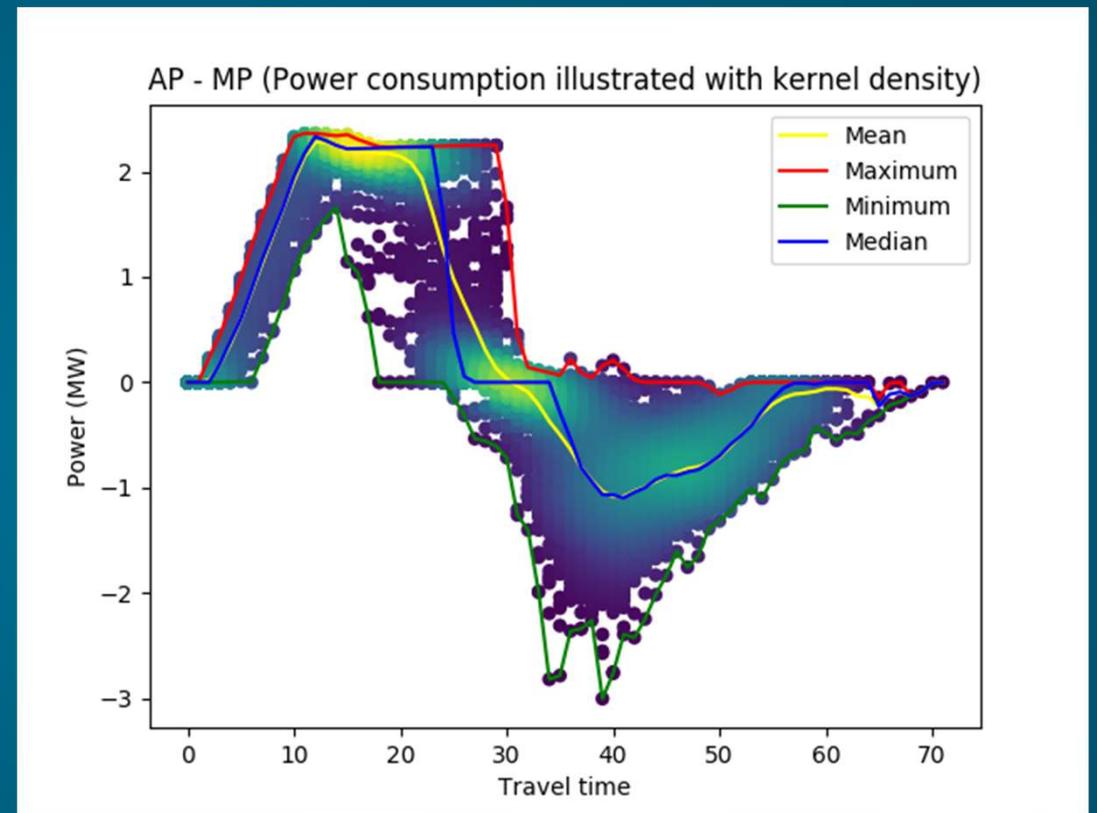
- U-Bahnverkehr zwischen 5 Uhr und 9 Uhr, 124 Züge, 2581 Abfahrten
- Geschätzte Energie-Einsparung: 3,5 MWh (18%)
- Mittlere Verlängerung der Fahrzeiten (inkl. Halten): 0,6 s



# Energiekosten sparen durch optimierte Fahrpläne

## Statistiken: Variabilität der Fahrprofile

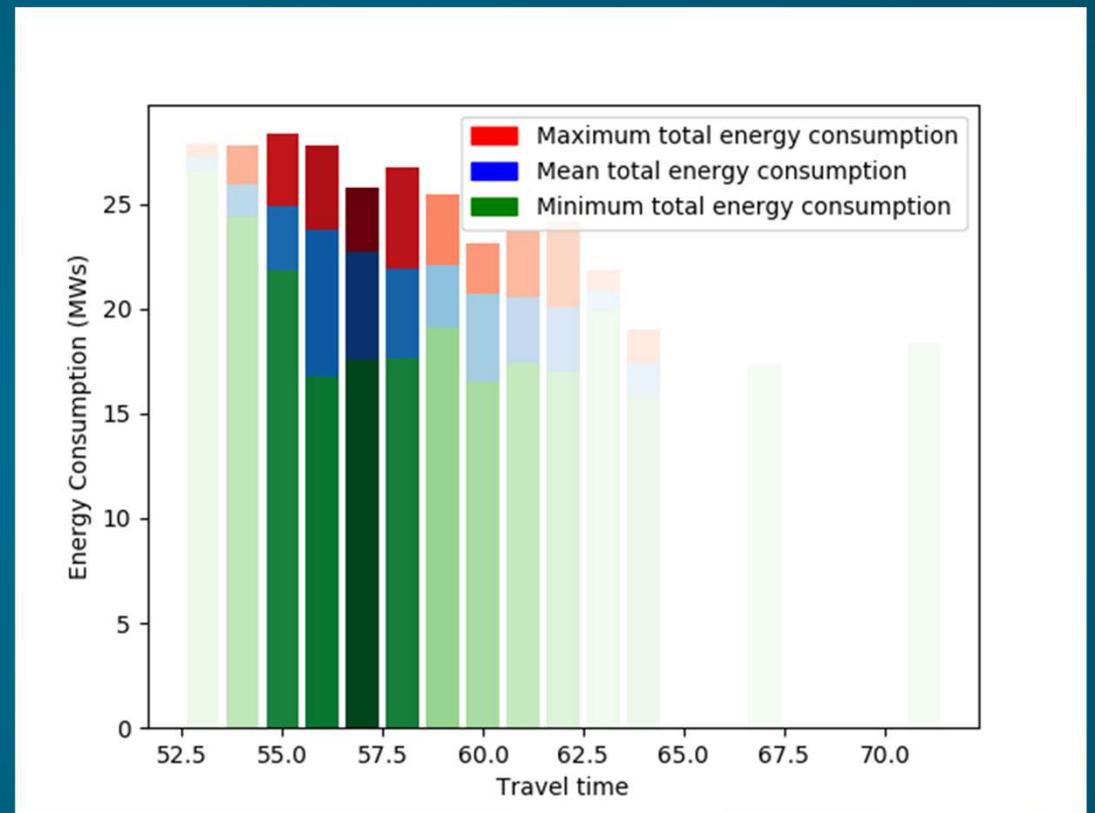
- Auf den meisten Strecken ergibt sich im Betrieb eine Vielfalt an Fahrprofilen
- Die zugehörigen Energie-Verbräuche fallen sehr unterschiedlich aus
- Beispielstrecke:  
Aufseßplatz – Maffeiplatz (630 m)



# Energiekosten sparen durch optimierte Fahrpläne

## Statistiken: Energieverbrauch abhängig von der Fahrtzeit

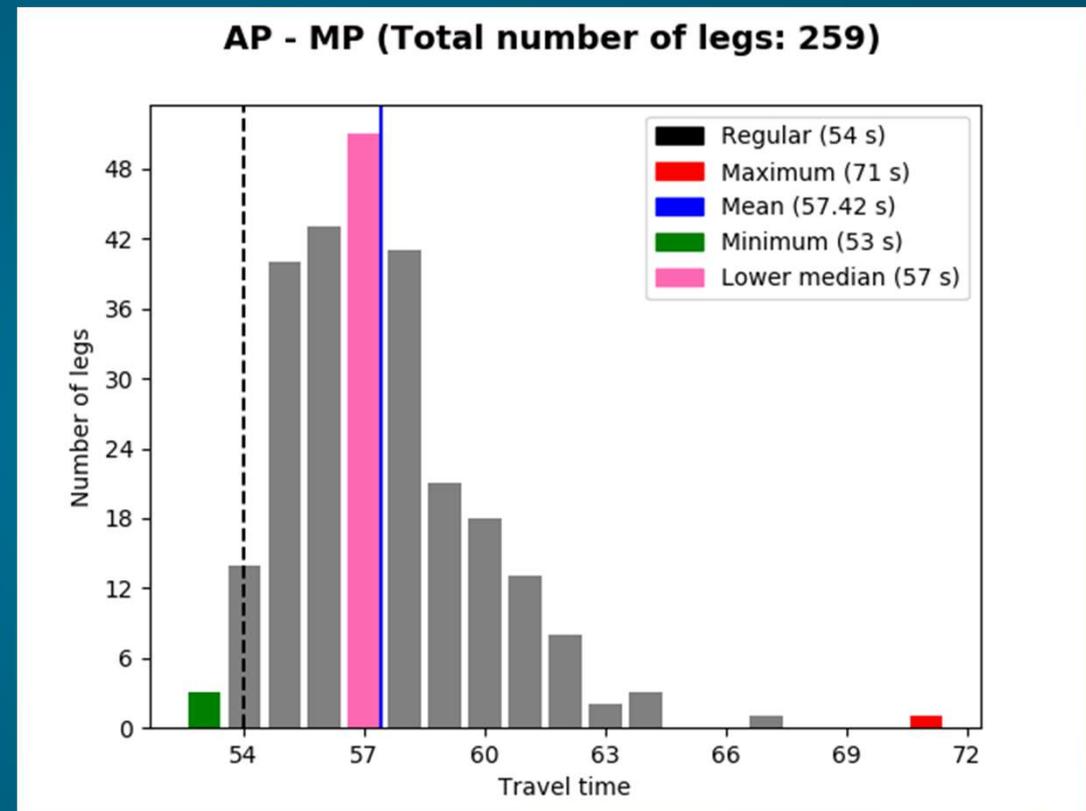
- Auf den meisten Teilstrecken zeigt sich klar der gewünschte Effekt:
- Energieeinsparung durch geringfügige Fahrzeitverlängerung (im Mittel über alle Fahrten)



# Energiekosten sparen durch optimierte Fahrpläne

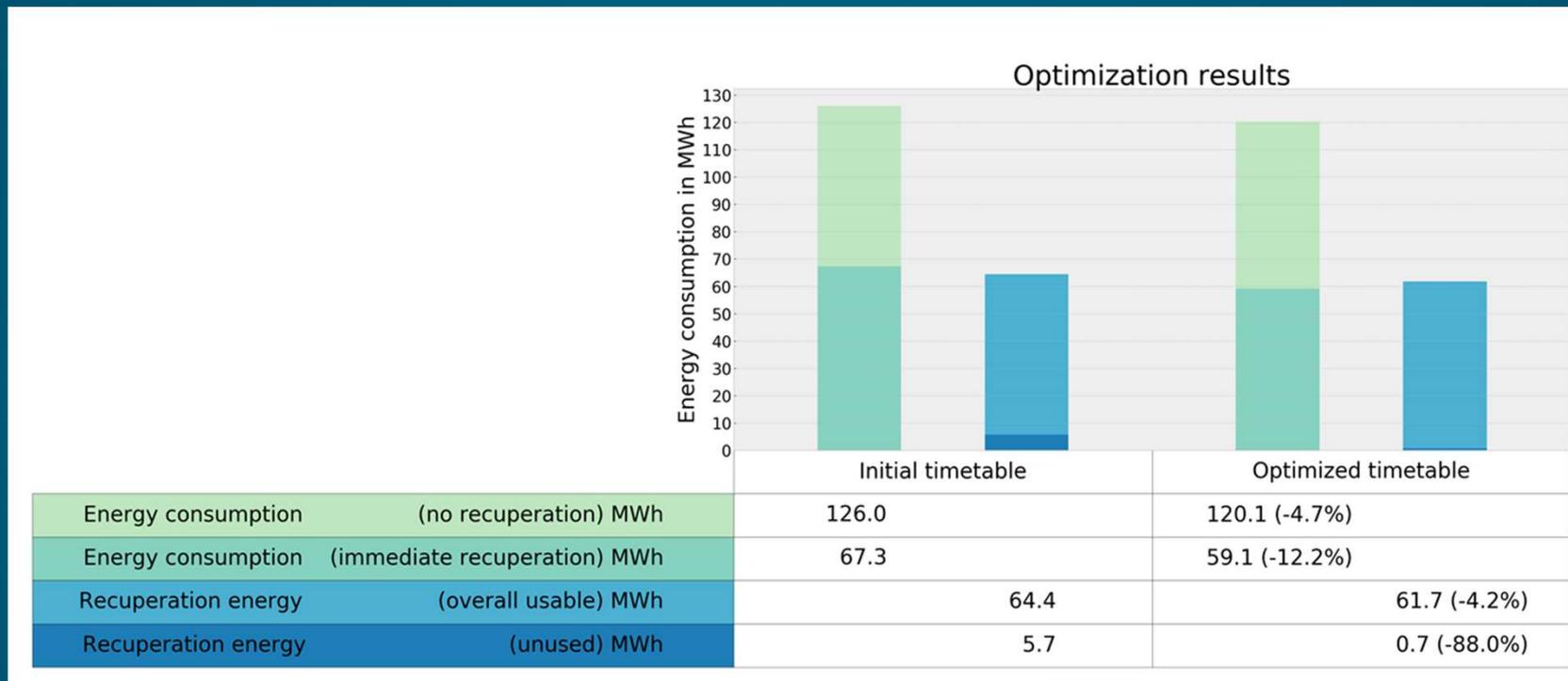
## Statistiken: Verteilungen der Fahrzeiten auf den einzelnen Strecken

- Auf einigen Strecken hohe Varianz der praktisch gefahrenen Zeiten
- Statistiken ermöglichen das Bestimmen von Ist-Referenzfahrzeiten
- Entsprechende Statistiken auch für die Haltezeiten



# Energiekosten sparen durch optimierte Fahrpläne

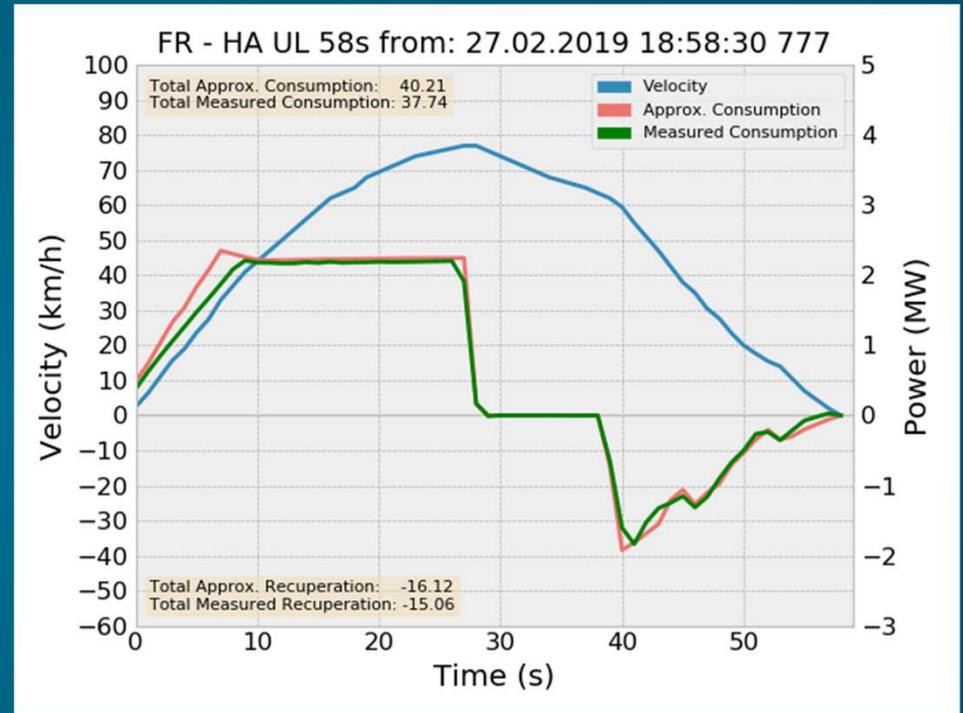
## Zwischenergebnis: Optimierung auf Grundlage von AZG-Daten



- Einsparungspotenzial bei Verlängerung der Linien-Gesamtlauferzeiten um bis zu 10 Sekunden

# Energiekosten sparen durch optimierte Fahrpläne

## Verfeinerung der Datengrundlage: Exakter Energiebezug der Züge



- Anschaffung und Einbau eines DL350-Messgerätes zum Erfassen der Antriebströme

# Energiekosten sparen durch optimierte Fahrpläne

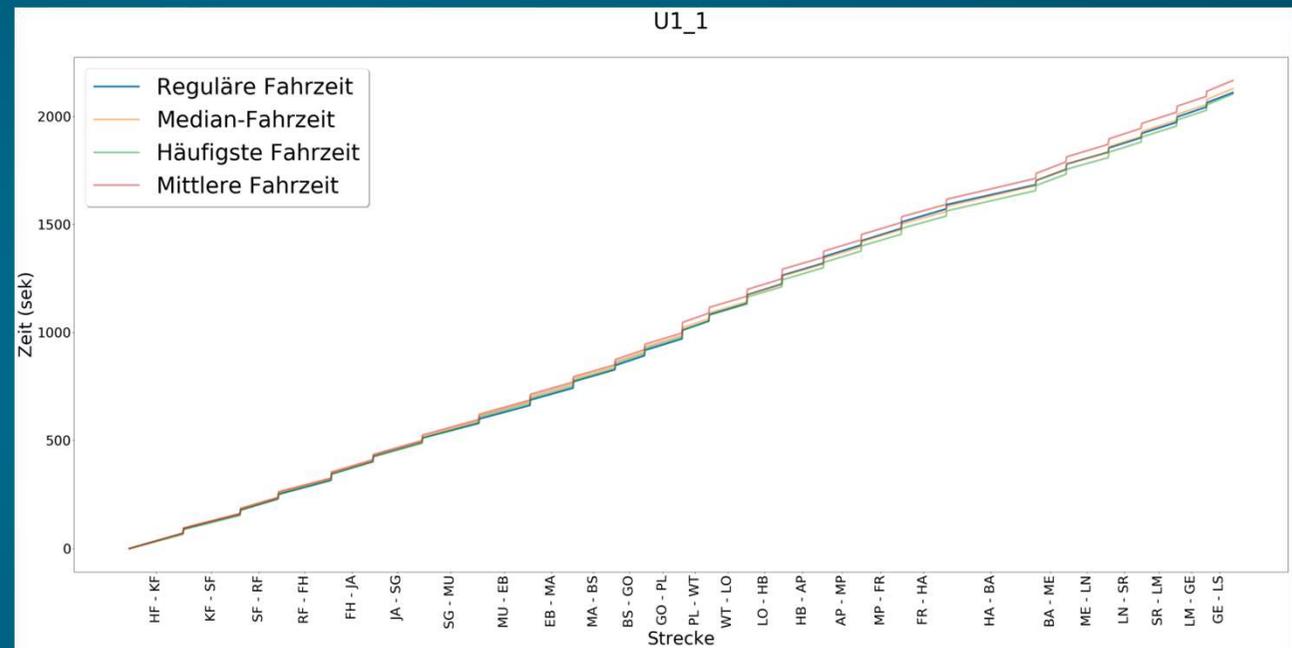
## Verfeinerung der Datengrundlage: Erstellung eines Ist-Referenzfahrplans

### ■ Datenseitiges Problem:

Die aufgezeichneten Fahrten weichen auf einigen Strecken statistisch von den Zeiten des Soll-Fahrplans ab:

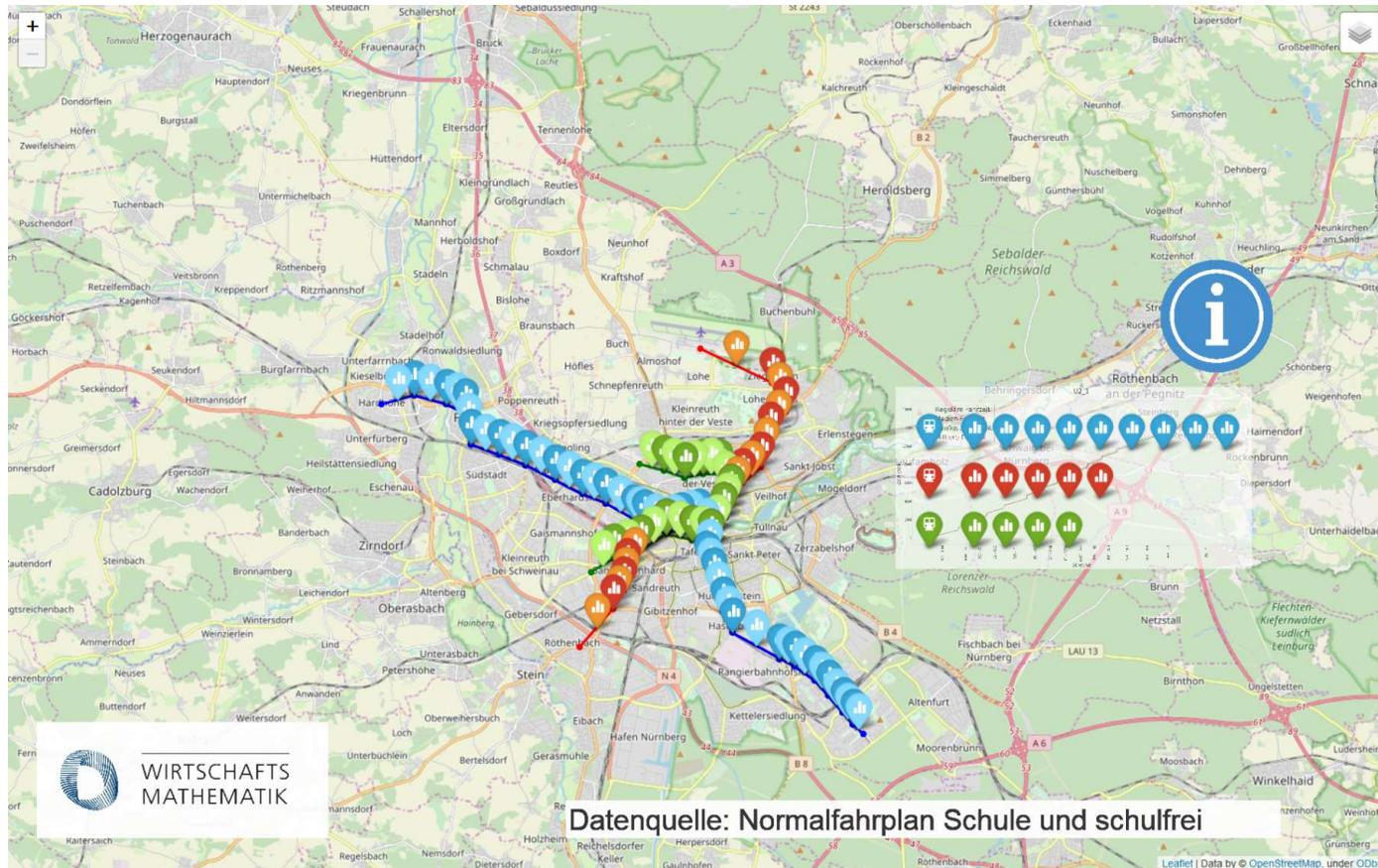
### ■ Unser Lösungsansatz:

Regelbasierte Konstruktion eines Referenzfahrplans aus den statistischen Zeiten, um das reale Fahrtgeschehen genauer abzubilden



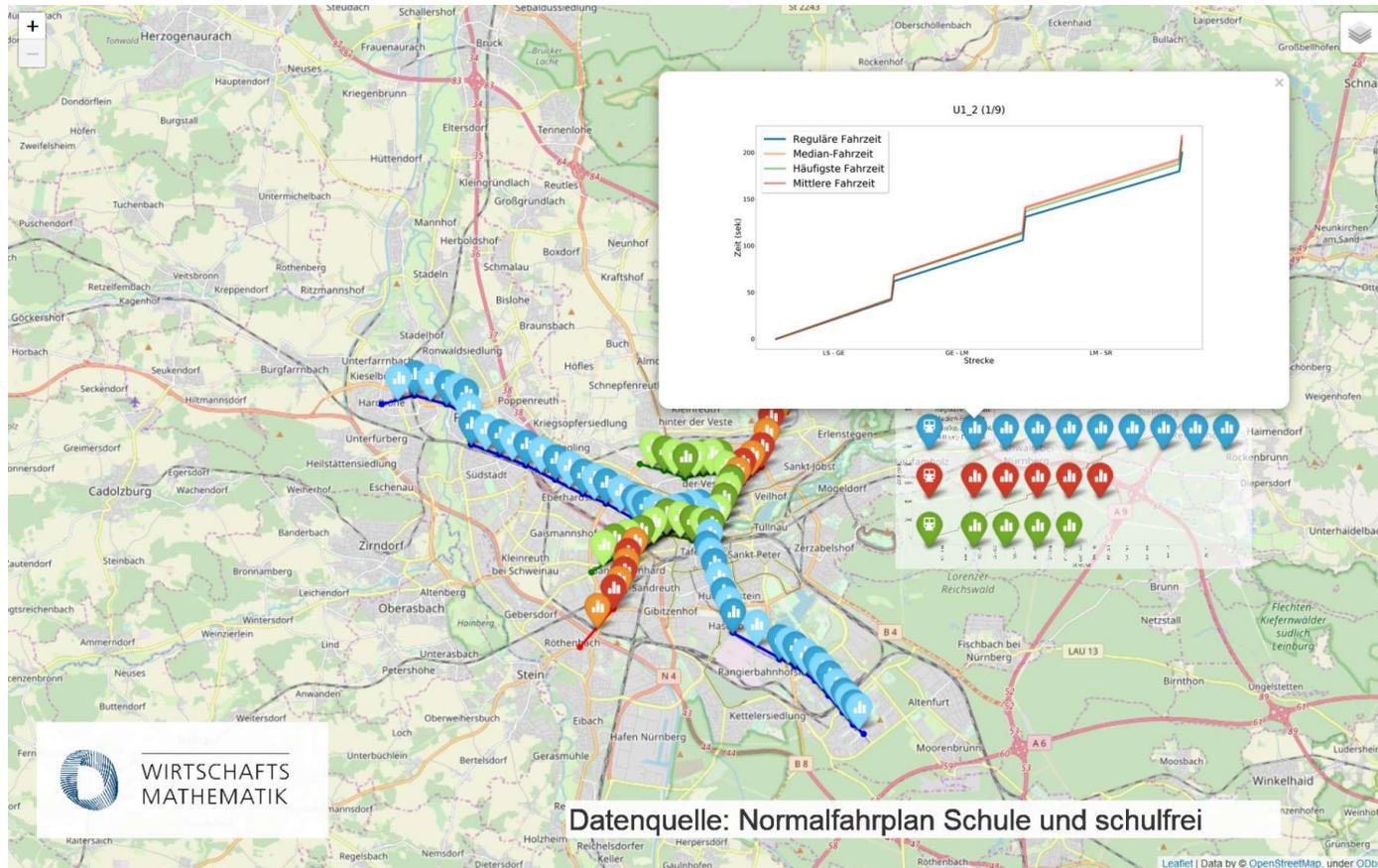
# Energiekosten sparen durch optimierte Fahrpläne

## Interaktive Visualisierung der Statistiken für die VAG-Fahrplaner



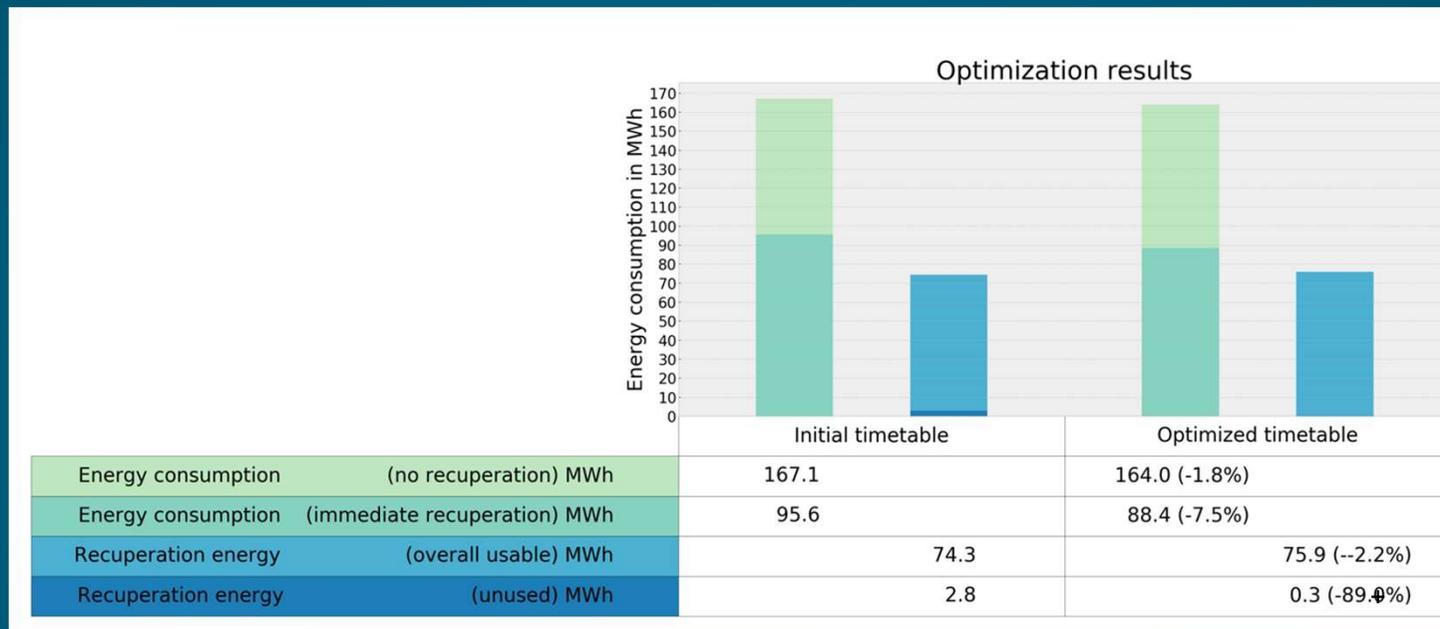
# Energiekosten sparen durch optimierte Fahrpläne

## Interaktive Visualisierung der Statistiken für die VAG-Fahrplaner



# Energiekosten sparen durch optimierte Fahrpläne

## Ergebnis unserer Machbarkeitsstudie: Energie-Einsparungspotenzial



- Optimalitäts-Lücke, d.h. weiteres Verbesserungspotenzial dieser Lösung: 2%
  - ➔ Potenzialspanne für die Energieeinsparung nach aktuellen Modellannahmen und unter optimalen Bedingungen: 7,5 – 10%; entspricht ca. 500.000 Euro / Jahr

# Energiekosten sparen durch optimierte Fahrpläne

## Zusammenfassung und Ausblick

- In einer leichten Fahrplan-Anpassung steckt viel Potenzial! Unter optimalen Bedingungen erreichen wir:
  - Spitzenlastsenkung im Bahnverkehr: 38 MW bzw. 5 Millionen € / Jahr
  - Reduktion des Energieverbrauchs im U-Bahn-Verkehr: 5 MWh bzw. bis zu 0,5 Millionen € / Jahr
- Nur geringe Auswirkungen auf die Fahrplanperformance
- Weitere Schritte:
  - Integration weiterer betrieblicher Randbedingungen
  - Übertragung hin zu einer optimierten Steuerung der U-Bahnfahrten im laufenden Betrieb
  - Mittelfristiges Ziel: Praxiseinsatz unserer Methoden



# Das ADA-Lovelace-Center für künstliche Intelligenz

## Neue Formen der Kooperation



Einzelprojekte



Joint-Labs



ADA-Hub Young Talents



# Das ADA-Lovelace-Center für künstliche Intelligenz

## Und was können wir für Sie tun?

Sprechen Sie uns an!



Dr. Andreas Bäermann  
Telefon 09131 85-67159  
Andreas.Baermann@fau.de

