Frankfurt University of Applied Sciences
Promotionszentrum Mobilität und Logistik

Zusammenfassung der Dissertation

Eine Studie zum Parkplatzsuchen auf der Grundlage von Geodaten mit Methoden aus der Ökonometrie und dem maschinellen Lernen

(Originaltitel: A Study on Cruising for Parking based on Geodata with Methods from Econometrics and Machine Learning)

eingereicht von
Siavash Saki, M.Sc.

Betreuer:
Prof. Dr. Tobias Hagen
Prof. Dr. Matthias Kowald

Erstgutachterin:
Prof. Dr. Anne Lange

Zweitgutachter:
Prof. Dr. Kay W. Axhausen

Frankfurt am Main, August 2025

Einleitung

Die Dissertation von Siavash Saki befasst sich mit dem städtischen Phänomen des **Parkplatzsuchverkehrs**, also dem Umherfahren auf der Suche nach einer freien Parkmöglichkeit. Dieser Suchprozess erhöht Verkehrsaufkommen, Energieverbrauch und Schadstoffemissionen und mindert zugleich die Lebensqualität in Städten. Obwohl die Parkplatzsuche nur einen relativ kurzen Abschnitt einer Reise darstellt, summieren sich die Auswirkungen durch tausende Fahrten pro Tag zu einem erheblichen Problem der urbanen Mobilität. Traditionelle Untersuchungsmethoden wie Befragungen oder Feldversuche können die tatsächliche Dauer und Dynamik der Suche nur ungenau abbilden und beruhen auf starken Annahmen. Moderne GPS-Technologie eröffnet neue Möglichkeiten, doch auch hier mangelt es oft an klar definierten Start- und Endpunkten der Suche, was die Vergleichbarkeit der Studien einschränkt.

Das Hauptziel der Dissertation ist daher die Entwicklung einer empirischen Methode, die den Startzeitpunkt, die Dauer und die Routen der Parkplatzsuche mit möglichst wenigen Annahmen erfasst. Die so erhobenen GPS-Daten werden mit ökonometrischen Modellen sowie Methoden des maschinellen Lernens ausgewertet. Der Untersuchungsansatz stützt sich auf ein eigens entwickeltes Smartphone-App namens Start2park, die normal gefahrenen Strecken, die Suche nach einem Parkplatz und den anschließenden Fußweg zum Zielpunkt separat erhebt. Abbildung 1 veranschaulicht die Methode zur Datenerhebung, die über die Start2park-App angewendet wurde. Mit dieser Methode wurden 3.546 Fahrten freiwilliger Testfahrender aufgezeichnet, wobei neben detaillieren GPS-Daten mit Zeitstempel jeweils Informationen zum Start der Fahrt, dem Beginn der Parkplatzsuche, zum gefundenen Parkplatz sowie zum finalen Ziel nach dem Fußweg aufgezeichnet wurden. Tabelle 1 zeigt die deskriptiven Statistiken der erhobenen Variablen zur Parkplatzsuchdauer, Fußwegedauer und Reisedauer für alle aufgezeichneten Fahrten. Mit diesen Daten kann die Lücke zwischen theoretischen Modellen und realem Fahrverhalten geschlossen werden. Die Arbeit gliedert sich in drei miteinander verbundene Studien: (1) die Identifikation des Beginns der Suche, (2) die Bestimmung der Dauer der Suche und ihrer Einflussfaktoren sowie (3) die Entwicklung eines Modells, das Parkplatzsuche automatisch in GPS-Trajektorien erkennt.

Theoretischer Hintergrund und Forschungsfragen

In der theoretischen Diskussion werden die Ursachen des Suchverkehrs aus ökonomischer Sicht beleuchtet. Die Knappheit von Parkraum bei gegebenem Preis, individuelle Präferenzen der Fahrerinnen und Fahrer sowie unvollständige Information über die Verfügbarkeit freier Plätze führen dazu, dass viele Fahrzeuge in Innenstädten nach günstig gelegenen und möglichst kostenlosen Parkständen am Straßenrand suchen und umherfahren. Zudem variieren Parkgebühren und Strafzettelrisiken, und die Entfernung vom Parkplatz zum Ziel wird unterschiedlich stark wahrgenommen. Im Rahmen der Dissertation wird der Suchprozess als sequentielle Entscheidung modelliert: Zunächst fährt man normal, dann beginnt irgendwann die Suche, und schließlich folgt der Fußweg zum Ziel. Zu jedem Zeitpunkt steht der Fahrer vor der Entscheidung, weiter zu fahren, aktiv nach einem Parkplatz zu suchen, gleich in ein Parkhaus zu fahren oder sogar illegal zu parken. Das Ziel ist es, die gesamten generalisierten Kosten aus Fahrzeit, Suchzeit und Fußweg zu minimieren. Trotz umfangreicher theoretischer Forschung gibt es bisher wenig empirische Arbeiten, die den Übergang vom Fahren zur Suche eindeutig bestimmen.

Die zentralen Forschungsfragen lauten:

- **Wann genau beginnen Autofahrende mit der Parkplatzsuche?**

- **Welche Faktoren beeinflussen die Dauer der Suche und den Wechsel zwischen kostenfreien, kostenpflichtigen und illegalen Parkplätzen?**
- **Lässt sich die Suche mithilfe maschineller Lernverfahren zuverlässig in ungelabelten GPS-Trajektorien identifizieren?**

Diese Fragen werden in drei Publikationen, die den Kern der kumulativen Dissertation bilden, untersucht, die jeweils einen Teilaspekt behandeln und in der Summe einen umfassenden empirischen Rahmen bilden.

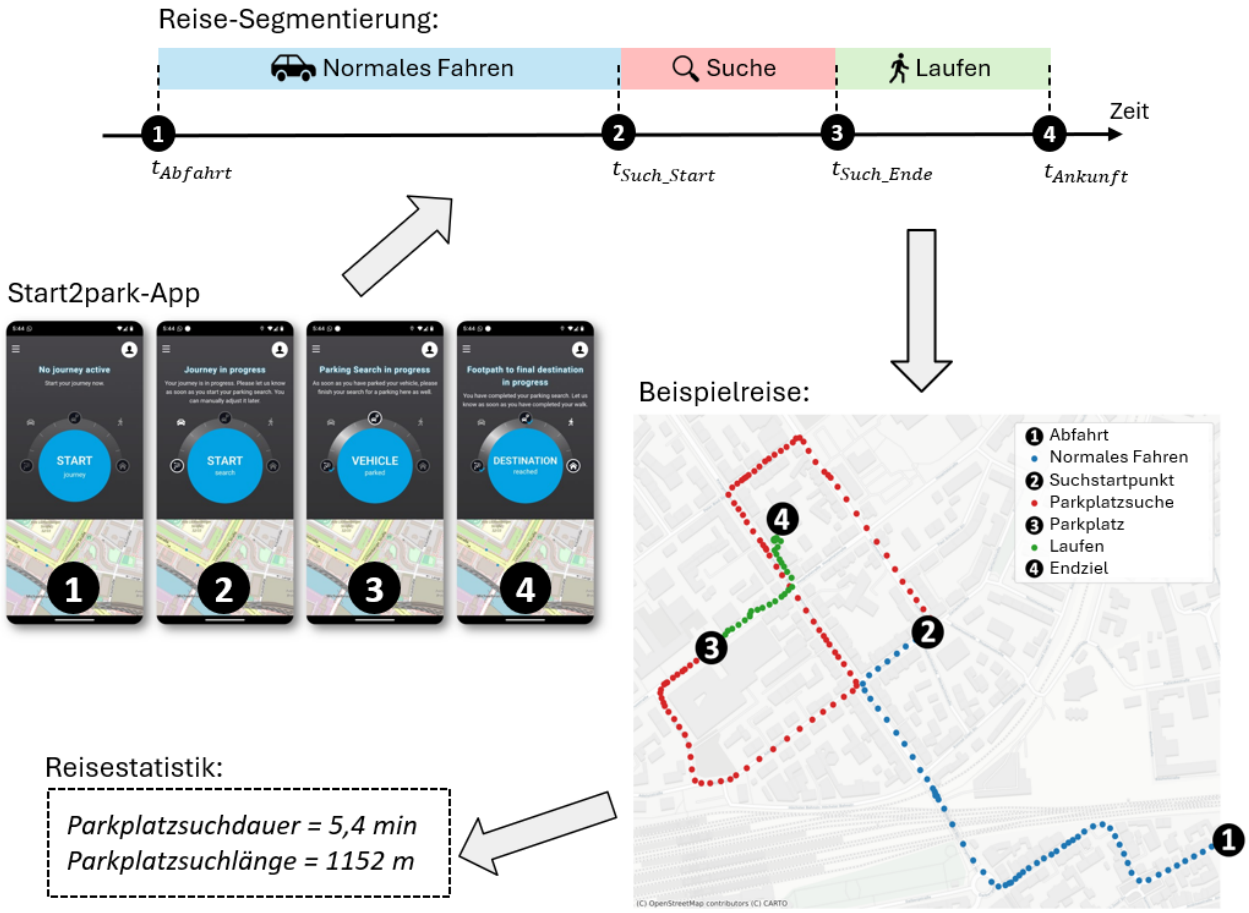

Abbildung 1: Datenerfassung mit der Start2park-App zur Aufzeichnung und Segmentierung ganzer Reisen und zur Analyse der Parkplatzsuche

Tabelle 1: Statistik zur Parkplatzsuchdauer, Fußwegdauer und Reisedauer der endgültig gesammelten Daten (Dauer in MM:SS)

	Variable	Anzahl	5%	25%	Median	75%	95%	Mittel	std
Alle Reisen	Parkplatzsuchdauer	**3546**	00:00	00:18	00:50	01:45	05:27	**01:29**	02:10
	Fußwegdauer	3546	00:00	00:16	01:07	02:55	10:27	**02:40**	05:20
	Reisedauer	3546	06:20	10:51	16:17	23:56	42:20	**19:22**	13:22
Reisen mit PSD>0 (82%)	Parkplatzsuchdauer	**2908**	00:13	00:35	01:04	02:04	06:07	**01:49**	02:16
	Fußwegdauer	2908	00:01	00:28	01:19	03:10	10:30	**02:52**	05:34
	Suchradius (m)	2908	13	52	106	188	368	**140**	126

Artikel I – Beginn der Parkplatzsuche

Der erste Artikel entwickelt ein probabilistisches Modell zur Bestimmung des **Startpunkts** der Suche. Ausgangspunkt ist die Beobachtung, dass Fahrer die Suche häufig möglichst nah am Ziel beginnen, um den Fußweg zu minimieren. Das Modell geht davon aus, dass die Bereitschaft zum Wechsel vom normalen Fahren in die Suchphase mit abnehmender Distanz zum Ziel steigt. Es wurden GPS-Daten von Fahrten analysiert, bei denen der Beginn der Suche per App markiert wurde. Mithilfe eines multinomialen Logit-Modells wird der Übergang zwischen drei Zuständen modelliert: „Normal fahren", „Suchen" und „sofort parken". Als erklärende Variablen dienen der verbleibende Abstand zum Ziel, die aktuelle und „lagged" Geschwindigkeit, die Fahrzwecke (z. B. Arbeit, Einkauf oder Freizeit), die Vertrautheit mit dem Gebiet sowie demografische Merkmale der Fahrenden.

Die Ergebnisse zeigen:

- Der **Abstand zum Ziel** ist die wichtigste Determinante des Suchstarts: Je näher sich das Fahrzeug dem Ziel nähert, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Suche beginnt.
- **Niedrige Geschwindigkeiten** erhöhen sowohl die Wahrscheinlichkeit, sofort zu parken als auch die Suche zu starten.
- **Individuelle Merkmale** spielen eine Rolle: Ältere Fahrerinnen und Fahrer sowie Personen mit kleineren Fahrzeugen beginnen ihre Suche eher, während jüngere Fahrer länger fahren, um einen näheren Platz zu finden. Männer neigen dazu, früher in die Suche zu wechseln, parken aber seltener sofort, verglichen mit Frauen. Wer das Zielgebiet gut kennt oder sich auf dem Heimweg befindet, startet die Suche ebenfalls früher.

Der Artikel liefert damit erstmals eine empirisch fundierte Beschreibung des Suchbeginns und untermauert theoretische Modelle, die von variierenden „Suchradius"-Annahmen ausgehen.

Artikel II – Dauer der Parkplatzsuche und Wahl des Parktyps

Der zweite Artikel präsentiert zunächst einmal ausführliche deskriptive Statistiken zur Parkplatzsuche.

- Auf den ersten Blick und im Mittel der aufgezeichneten Fahrten ist Parkplatzsuche kein massives Problem, außer bei einer begrenzten Anzahl Betroffener bzw. Fahrten. Wenn Nutzende der start2park-App eine Autofahrt beginnen, müssen sie im Durchschnitt damit rechnen, 01:25 Minute für die Parkplatzsuche und 01:09 Minuten für die anschließende Fußwegdauer zum finalen Ziel zu brauchen. Wenn die Nutzenden bereits wissen, dass sie mit einer Parkplatzsuche rechnen müssen (wenn also der Fokus auf die 82% der Fahrten mit einer Parkplatzsuche gelegt wird), dann wird die Parkplatzsuchdauer im Durchschnitt 01:44 Minuten und die Fußwegdauer 01:15 Minuten betragen. Die entsprechenden durchschnittlichen Wege sind knapp 275 Meter für die Parksuchstrecke und 106 Meter für den anschließenden Fußweg.
- Diese Durchschnittswerte werden stark von eher wenigen, sehr langen Parkplatzsuchen beeinflusst. Daher ist es sinnvoll, den Median (50% Quantil) zu betrachten, der die Dauer einer mittleren Parkplatzsuche abbildet, wobei jeweils die Hälfte der Suchdauern kürzer bzw. länger ist. Unter Fahrten mit Parkplatzsuche, beträgt die mittlere (Median-)Suchdauer 00:50 Minuten. 80% der Parksuchvorgänge dauern länger als eine halbe Minute, aber nur 26% länger als 02:00 Minuten. Länger als 03:00 Minuten dauern 15% und länger als 5:00 Minuten nur 6% der Parkplatzsuchen.
- Diese Werte für die Parkplatzsuche unterscheiden sich stark nach fahrt- und fahrerbezogenen Merkmalen. So sind die Dauern in Innenstadtlagen von Metropolen deutlich

länger (im Mittel 5-6 Minuten), während die Parkplatzsuche im ländlichen Gebiet nahezu irrelevant ist. Zudem haben die Uhrzeit, der Fahrzeugtyp sowie das Alter der Personen großen Einfluss. Ältere Menschen versuchen offenbar von vorneherein sowohl die Parkplatzsuche als auch längere Fußwege zu meiden.

- Die Fahrer*innen beginnen die Parkplatzsuche im Mittel (Median) in 84m Luftlinienentfernung zum finalen Ziel Ihrer Reise. Bei den 82% der Fahrten, die wirklich mit einer Parkplatzsuche verbunden sind, sind es 104m Luftlinie.
- Die tatsächlich gefundenen Parkplätze sind näher am finalen Ziel: Die Luftlinie zwischen dem Parkplatz und dem finalen Ziel beträgt im Mittel (Median) ca. 63m. Allerdings sind 5% der Luftlinien länger als 244m. Die tatsächliche zurückgelegte Fußwegstrecke zwischen dem geparkten Fahrzeug und finalen Ziel beträgt im Mittel (Median) aber 96m.
- Fahrzeuge stellen während der Parkplatzsuche ein Verkehrshindernis dar: Deren Durchschnittsgeschwindigkeit beträgt nur 9 km/h.

Dann untersucht der zweite Artikel mithilfe von sog. **Überlebenszeitanalysen** (engl. Survival Analyses) die Dauer der Parkplatzsuche und die Wahl zwischen kostenfreien, kostenpflichtigen und illegalen Parkplätzen. Es wird ein Modell angewendet, dass mehrere Ausgänge (Parktypen: Free, Paid, Illegal) parallel betrachten kann (sog. „competing risk“). Die Datengrundlage sind die per App aufgezeichneten Suchphasen bis zu den Ausgängen. Das Modell erlaubt es auch zu analysieren, ob und inwieweit die Bereitschaft, einen bestimmten Parktyp (Free, Paid, Illegal) zu akzeptieren, mit der fortschreitenden Suchzeit steigt oder fällt.

Wichtige Erkenntnisse:

- Die Wahrscheinlichkeit, einen **kostenfreien Platz** zu wählen, ist zu Beginn der Suche am höchsten. Verlängert sich die Suche, steigt die Bereitschaft, einen **kostenpflichtigen** Parkplatz zu akzeptieren.
- **Illegales Parken** wird vor allem von Fahrern gewählt, die bereits vor Beginn der Suche wenig Zeit investieren möchten; eine längere Suche erhöht diese Bereitschaft kaum.
- **Demografische Faktoren** (Alter, Geschlecht), **Fahrzeugtyp**, **Vertrautheit mit dem Gebiet**, **Reisezweck**, **Tageszeit** und **Wetter** beeinflussen die Entscheidung. Geschäftsreisende greifen häufiger auf kostenpflichtige Parkplätze zurück (mglw. da sie die Kosten erstattet bekommen oder da sie einen höheren Zeitwert haben); Freizeit- und Pendlerfahrten bevorzugen kostenfreie Optionen. Hohe Temperaturen begünstigen kostenloses Parken, wahrscheinlich weil längere Fußwege angenehmer erscheinen.
- Insgesamt zeigt sich eine klare **Dauerabhängigkeit**: Je länger die Suche, desto stärker der Wechsel von kostenfreien zu kostenpflichtigen Plätzen.

Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass eine bedarfsgerechte Gestaltung von Parkgebühren und -kapazitäten die Suchzeiten verkürzen könnte.

Artikel III – Automatische Erkennung von Parkplatzsuche in GPS-Daten

Der dritte Artikel widmet sich der **Erkennung von Parkplatzsuche** in historisch aufgezeichneten GPS-Trajektorien. Hierzu wird ein maschinelles Lernmodell entwickelt, das einzelne GPS-Punkte innerhalb einer Fahrt als „normales Fahren“ oder „Parkplatzsuche“ klassifiziert. Verschiedene Modelltypen wurden getestet (Feedforward-Netze, RNN, LSTM). Die Ergebnisse zeigen, dass ein Feedforward-Netz ausreichende Genauigkeit liefert und im Vergleich zu komplexeren Netzen leichter zu konfigurieren, zu trainieren und einzusetzen ist.

Die wichtigsten Punkte:

- Als **wichtigste Prädiktoren** dienen die aktuelle Geschwindigkeit und die Entfernung zum Ziel. Sie spiegeln die Fahrdynamik und räumliche Nähe wider und sind in den meisten Datensätzen verfügbar.
- Das trainierte Modell wurde mit unterschiedlichen Datensätzen validiert und **übertraf heuristische Methoden** wie fixe Radien oder einfache Geschwindigkeitsgrenzen.
- Angewendet auf einen groß angelegten Datensatz von INRIX mit über **860 000 Fahrten** in Frankfurt ergab die Analyse, dass bei etwa einem Drittel der Fahrten **sofort ein Parkplatz gefunden** wurde. Bei den übrigen Fahrten betrug die durchschnittliche Suchzeit je nach Tageszeit und Gebiet nur wenige Minuten. Dennoch zeigen Spitzenzeiten und Geschäftsviertel längere Suchzeiten.

Durch dieses Modell ist es möglich in beliebigen (ungelabelten) GPS-Daten von PKW-Fahrten Parkplatzsuche zu identifizieren. Dies ermöglicht es in anderen Städten das Phänomen Parkplatzsuche abzuschätzen und erleichtert somit die Verkehrsplanung und das Parkraummanagement.

Gesamtergebnisse und Schlussfolgerungen

Die drei Studien ergänzen sich zu einem umfassenden Verständnis des Parkplatzsuchverhaltens:

1. **Empirischer Suchbeginn**: Artikel I liefert erstmalig eine empirische Messung des Suchstarts und verdeutlicht den Einfluss von Geschwindigkeit, Distanz zum Ziel, Vertrautheit, Fahrzweck und demografischen Merkmalen auf den Übergang vom Fahren zur Suche.
2. **Dauer und Präferenzen**: Artikel II quantifiziert die Dauer der Suche und zeigt, dass die Bereitschaft, kostenpflichtige Stellplätze zu nutzen, mit zunehmender Suchdauer wächst, während illegal geparkt wird, wenn Fahrer von vornherein wenig Zeit investieren wollen.
3. **Skalierbare Detektion**: Artikel III stellt ein übertragbares Verfahren zur automatischen Erkennung der Suche in GPS-Daten bereit.

Aus den Ergebnissen lassen sich mehrere Implikationen für Forschung und Praxis ableiten:

- **Parkraumangebot und -verteilung**: Ein erheblicher Anteil der Fahrten endet sofort mit einem Parkplatz, was darauf hindeutet, dass Parkraum im Durchschnitt ausreichend vorhanden ist, jedoch schlecht verteilt oder schwer erkennbar ist. Informationssysteme könnten die Suche reduzieren.
- **Preispolitik und Kapazitätssteuerung**: Da die Akzeptanz kostenpflichtiger Plätze mit der Suchdauer steigt, könnten flexible Preisstrategien und die gezielte Bereitstellung von kostenpflichtigem Parkraum in Gebieten mit hoher Nachfrage die Suche verkürzen.
- **Personalisierte Navigation**: Individuelle Merkmale und Vertrautheit mit dem Gebiet beeinflussen die Suche. Navigationsdienste könnten diese Faktoren berücksichtigen und personalisierte Empfehlungen zur Parkplatzwahl geben.
- **Datengetriebene Stadtplanung**: Die Kombination aus ökonomischer Theorie, empirischer Analyse und maschinellem Lernen zeigt, dass datenbasierte Methoden das Potenzial haben, die Parkplatzsuche in Echtzeit zu erkennen und Kommunen objektive Entscheidungsgrundlagen zu liefern.