

Kettenlose Tretantriebe – eine ergonomisch/energetische Betrachtung

Marcel MAYER, Daniel DOLL, Jürgen REMMLINGER, Johannes KOLB

*Schaeffler Hub for Automotive Research in E-Mobility
am Karlsruher Institut für Technologie (SHARE am KIT)
Rintheimer Querallee 2, D-76131 Karlsruhe*

Kurzfassung: Der vorliegende Beitrag beschäftigt sich mit Antriebskonzepten beispielsweise von Pedelecs, welche ohne Antriebskette lediglich mit einer elektrischen Strecke zwischen Tretkurbel und angetriebenem Rad auskommen. Gerade aus energetischen Gesichtspunkten sind derartige Konzepte kritisch zu hinterfragen, da die Leistungsverluste durch mehrfache Wandlung – mechanisch-elektrisch, elektrisch-elektrisch, elektrisch-mechanisch vergleichsweise hoch ausfallen können. Aus ergonomischen Gesichtspunkten bieten derartige Konzepte allerdings Potential, wenn sie über ein reines Substitut der Kette hinausgehen.

Schlüsselwörter: Fahrrad, Elektrifizierung, Automatisierung, Kettenlos, Wirkungsgrad

1. Ausgangssituation und Problemstellung

Im Grundgesetz der Bundesrepublik Deutschland ist in Artikel 11 die Freizügigkeit, also das Recht einer Person zur freien Wahl des Aufenthaltsortes verankert. Der Wechsel zwischen Aufenthaltsorten ist zwar nicht explizit erwähnt, jedoch lässt sich daraus das Verständnis von Mobilität als Grundbedürfnis (bspw. LENZ 2013) einfach ableiten. Die Selbstverständlichkeit und die Unverzichtbarkeit von Mobilität in einem gesellschaftlichen sowie wirtschaftlichen Umfeld wie im heutigen Deutschland gewährleistet die gesellschaftliche Teilhabe, *„also der Zugang zu Ausbildung und Bildung, Arbeit und Versorgung, aber auch zum kulturellen und politischen Geschehen“* (LENZ 2013, S. 13).

Betrachtet man bspw. die Veränderung der Mobilitätsquote von 2002 zu 2008, zeigt sich insgesamt eine Zunahme der Mobilitätsquote über alle Altersklassen hinweg. Die Mobilitätsquote beschreibt dabei die Nutzung von mindestens zwei verschiedenen Verkehrsmitteln pro Woche, ohne Fußwege. Analog verhält sich die Entwicklung der Veränderung der mittleren Wegezahl im gleichen Zeitraum. Nimmt man weiter die Anzahl multimodaler Personen über die drei Zeitfenster 1996-2000, 2001-2005, 2006-2010, so zeigt sich eine Zunahme speziell in der Altersgruppe der 18-25-jährigen (siehe Abbildung 1). Multimodalität beschreibt dabei die Nutzung von mindestens zwei verschiedenen Verkehrsmitteln zur Erreichung eines Zielortes. (Chlond 2013)

Anlässlich des Ortes der diesjährigen GfA Frühjahrskonferenz soll Karlsruhe als Beispiel für eine Betrachtung eines multimodalen Arbeitsweges unter Verwendung von Fahrrad und Bahn bzw. Straßenbahn dienen. Nicht zuletzt deshalb, da in Karlsruhe einerseits mit dem schienengebundenen Stadt-Umland-Verkehr ein Netz von knapp 400 km Länge existiert. Sondern vielmehr auch aufgrund der

Bemühungen den Radverkehr als System zu begreifen und zu fördern (Karlsruhe 2014a).

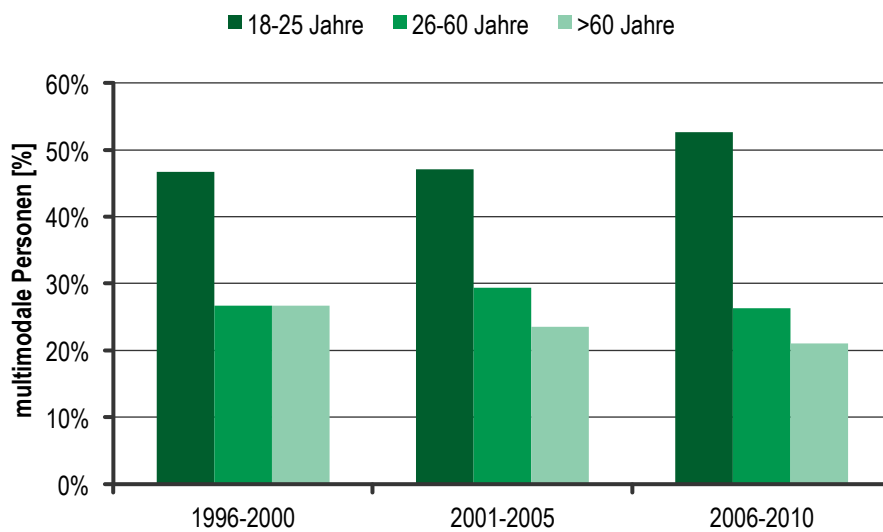


Abbildung 1: Veränderung der Multimodalität nach Chlond (2013)

Betrachten wir Peter, einen von insg. knapp 100.000 sog. Einpendlern (Karlsruhe 2014b), die außerhalb des Stadtgebiets wohnen und in Karlsruhe arbeiten. Peter fährt jeden Morgen mit dem Fahrrad zum Bahnhof einer kleineren Stadt im benachbarten Landkreis. Dort stellt er sein Fahrrad ab und nimmt eine Regionalbahn nach Karlsruhe. Hier könnte er bspw. mit einer Stadtbahn zu einer Haltestelle in der Nähe seines Arbeitsplatzes fahren, müsste aber insg. knapp 15 Minuten Stadtbahn fahren und weitere 10 Minuten zu Fuß zurücklegen. Peter holt daher sein eigenes zweites Fahrrad, welches er in der Radstation – einer überdachten, videoüberwachten Fahrradgarage im Karlsruher Hauptbahnhof – abgestellt hat und fährt in knapp 15 Minuten zu seinem Arbeitsplatz.

Gerne würde Peter nur ein einziges Fahrrad, idealerweise sogar ein Pedelec für den Weg zur Arbeit verwenden, zumal sein erstes Fahrrad nicht so sicher und komfortabel abgestellt ist wie sein zweites. Jedoch ist dies so ohne weiteres nicht möglich: Zwar ist die Fahrradmitnahme im ÖPNV generell gestattet, jedoch Montag bis Freitag vor 09:00 Uhr mit zusätzlichen Kosten verbunden oder in manchen Verkehrssystemen gar nicht erst erlaubt (Bahn 2015).

Eine mögliche Lösung für Peters Wunsch sind klappbare Fahrräder, welche aktuell mit unterschiedlichen Antriebsstrangkonfigurationen, von klassisch über Tretkraftunterstützung bis hin zu kettenlosem Pedelec angeboten werden. Gerade der Verzicht einer Kette eröffnet bei Klapprädern Freiheitsgrade im Entwurf, die Potentiale hinsichtlich ergonomischer Gestaltung eröffnen. Dieses Potential wird jedoch durch einen deutlich geringeren energetischen Wirkungsgrad erkaufte wie im Folgenden gezeigt wird.

2. Elektrifizierung und Automatisierung

Für die zukünftige Mobilität sind derzeit zwei wichtige, primär technologisch geprägte Einflussfaktoren bzw. Trends zu nennen. Zum einen ist dies die sukzessive Erhöhung des Automatisierungsgrades nicht nur im Bereich Automotive, zum anderen ist dies die zunehmende Elektrifizierung von Fahrzeugen aller Art, die durch das immanente Prinzip X-by-Wire die Tür zu einem Paradigmenwechsel im Nutzen sowie im Aufbau auch von Fahrrädern öffnet.

Pedelecs – elektrisch unterstützte Fahrräder – sind mittlerweile bereits häufig im Alltag zu finden. Wie im nationalen Radverkehrsplan 2020 aufgezeigt, interessieren sich insbesondere auch Pendler für Pedelecs (BMVBS 2012). Pedelecs erleben in den letzten Jahren einen außergewöhnlichen Aufschwung: Der Zweirad-Industrie-Verband e.V. schätzt die Anzahl von Pedelecs bzw. E-Bikes in Deutschland auf über 1,6 Mio. mit ca. 410.000 verkaufter E-Bikes in 2013 (ZIV 2013). Auf eine detaillierte Darstellung der unterschiedlichen Antriebkonzepte in Pedelecs wird an dieser Stelle verzichtet.

Im Bereich der Automatisierung von Fahrrädern existieren gerade im Bereich des Getriebes verschiedene Neuentwicklungen. So hat Schaeffler im Rahmen der Eurobike 2013 den elektrischen FAG-Schaltaktor vorgestellt. Neben der Anwendung eines Shift-by-Wire in Standard-Fahrrädern und Pedelecs, kann zudem durch die Verbindung mit FAG-Sensor-Tretlagern eine vollautomatische Ausführung realisiert werden. Somit passt sich die automatische Fahrradschaltung auf Basis von Trittfrequenz, Kraft, Geschwindigkeit und Neigung an und „entscheidet“ sich für den optimalen Gang und Schaltzeitpunkt (Schaeffler 2013). Weiter existieren Pedelecs, die bei der Wahl des Unterstützungsgrades der Tretkraftunterstützung Beanspruchungsgrößen wie bspw. den Puls berücksichtigen. Beispielsweise das Impuls Ergo von Kalkhoff (Kalkhoff o.J.) verfügt neben einer pulsabhängigen Tretkraftunterstützung über ein stufenloses Automatikgetriebe (NuVinci), welches eine vorgegebene Trittfrequenz einregelt. Allerdings erfolgt keine Anpassung von Tretkraft und Übersetzung, da die Systeme am Fahrrad parallel existieren und nicht integriert sind.

Um speziell den Anforderungen von Pendlern wie der zuvor vorgestellten Persona Peter zu genügen, erleben faltbare oder auch Klappfahrräder eine Renaissance. Zwischenzeitlich findet sich auch hier die nahezu komplette Bandbreite an Antriebskonzepten, welche auch in „normalen“ Fahrrädern verbaut werden.

Ein Konzept sticht aus der Masse heraus: Das von Mando hergestellte faltbare Pedelec Footloose substituiert den Kettentrieb durch eine rein elektrische Strecke: Am Kurbeltrieb sitzt ein Generator, welcher die mechanische Energie in elektrische Energie wandelt. Diese wird in den Energiespeicher zwischengespeichert und letztlich durch den im Hinterrad verbauten E-Antrieb wieder in mechanische Energie für den Vortrieb gewandelt. Laut Herstellerangaben ist das Fahren bei leerem Akku nicht möglich.

3. Ergonomisch/energetische Betrachtung

Gerade aus einer energetischen Sichtweise heraus ist dieses Antriebskonzept kritisch zu betrachten. Legt man die Ergebnisse von Oehler (2014) zugrunde, so liegen die Wirkungsgrade von typischen Antriebskonzepten bei Fahrrädern bei 78 – 86 % bei stufenlosen Getrieben, 81 – 95 % bei Nabenschaltungen und 92 – 96 % bei

Kettenschaltungen. Ein Direktantrieb (Singlespeed) kommt nach Oehler (2014) auf einen Wirkungsgrad von ca. 97%. Diese Aussagen beziehen sich auf die Wirkungsgradkette von Tretkurbel zu Rad bei konventionellen Fahrrädern.

Betrachtet man nun die rein elektrische Alternative - auch wenn bei elektrischen Antrieben oftmals von hohen Einzelwirkungsgraden ausgegangen werden kann - muss hier die komplette Wirkkette berücksichtigt werden.

Zunächst haben wir keinen konstanten Momenteneintrag am Tretlagergenerator sondern aufgrund der Krafterzeugung des Menschen sowie des inhärenten Prinzips der Tretkurbel schwankende Momentenverläufe. Weiter kommt hinzu, dass keine konstante Drehzahl anliegt, auf die der Generator ausgelegt wäre.

Weiter müssen die Verluste des Generators, der Leistungselektronik des Generators, die am Energiespeicher entstehenden Verluste sowie die Verluste der Leistungselektronik und der Maschine des Antriebs berücksichtigt werden. Nimmt man hier die in Tabelle 1 zusammengefassten Bereiche für die Wirkungsgrade an, so ergibt sich ein Gesamtwirkungsgradbereich, der mit 41%-67% im Bestfall deutlich unterhalb der zuvor dargestellten Wirkungsgrade bei Kettentrieb und ggf. entsprechendem Getriebe liegt.

Tabelle 1: angenommene Wirkungsgradbereiche η für eine rein elektrische Tretkraftübertragung

| η | Generator | Leistungselektronik Generator | Energiespeicher | Leistungselektronik Motor | Motor |
|--------|-----------|-------------------------------|-----------------|---------------------------|----------|
| | 0,6-0,8 | 0,9-0,95 | 0,95-0,99 | 0,9-0,95 | 0,9-0,95 |

Andererseits ergeben sich durch die elektrische Übertragung neue Gestaltungsmöglichkeiten, welche eine nahezu freie Positionierung der Tretkurbel bei jedwedem Fahrradkonzept (bspw. Hollandrad, Liegerad oder Mountainbike) zulassen. Insofern ermöglicht die Substitution der Kette durch eine elektrische Strecke zumindest theoretisch eine optimale ergonomische Einstellung, die über bisher bekannte Konzepte hinausginge. Ob und inwiefern diese Anpassbarkeit den vergleichsweise schlechten Gesamtwirkungsgrad rechtfertigen kann, bleibt für den konkreten Anwendungsfall zu klären. Ohne eine zusätzliche Tretkraftunterstützung wäre die Antriebskonfiguration auch aus ergonomischer Sicht als eher fragwürdig einzustufen: Schließlich müsste bei reiner Wandlung der Energie aus der Tretkraft fast doppelt so viel Energie durch den Menschen aufgebracht werden, als bei einem konventionellen Antrieb.

Die Schönheit der Lösung liegt nicht so sehr in technischen Gebieten als vielmehr in zulassungstechnischen Fragestellungen. Durch das notwendige Treten – so gering das aufzubringende Moment auch sein mag – und eine maximale Geschwindigkeit von 25 km/h kann das Antriebskonzept in die Kategorie Pedelec eingeordnet werden und muss nach aktuellem Kenntnisstand nicht zugelassen werden. Würde man das Tretlager als Eingabegerät für die gewünschte Geschwindigkeit durch einen Drehgriff analog zum Motorrad ersetzen, so hätte man ein reines E-Bike vorliegen. Dieses wäre einerseits zulassungspflichtig und andererseits würde es bei der genannten Höchstgeschwindigkeit der Helmpflicht unterliegen.

4. Diskussion

Bei den bisher geführten Betrachtungen kommt man fast zwangsläufig zur Fragestellung, ob diese Art des Antriebs außer in einem speziell für die letzte Meile

auf dem Weg von oder zur Arbeit konzipierten *Falt-Pedelec* als Nischenlösung weitere Verwendung findet? Gerade auch unter dem Aspekt, dass das von den MIFA-Werken vorgestellte vergleichbare Konzept *X-PESA* nicht weiter verfolgt wurde.

Die Frage lässt sich so (noch) nicht eindeutig beantworten. Nehmen wir beispielsweise elektrische Fahrzeuge der Fahrzeugklasse *L7e*, welche ohne Batterie ein Gewicht von bis zu 400 kg erlauben und ohnehin zulassungspflichtig sind. Hier können derartige Konzepte als *Rangeextender* im weitesten Sinne oder gar als *Notantrieb* Verwendung finden. Hinzu käme, dass derartige Systeme im Gegensatz zum bspw. im *TWIKE* verbauten kettengetriebenen System relativ einfach ergonomisch anpassbar wären, sodass eine feste Sitzposition – welche gerade bei dem geringen Gesamtgewicht derartiger Fahrzeuge wünschenswert wäre – ohne Probleme beibehalten werden kann. Hinzu käme, dass auch bei Fahrzeugstillstand getreten und somit Energie für den Antrieb erzeugt werden könnte. Um diese Behauptung mit Zahlen zu untermauern, soll eine real im Stadtverkehr gefahrene Strecke als Referenz dienen. Mit der Zielsetzung, dass zukünftige elektrische Fahrzeuge gerade der Klasse *L7e* im konventionellen Verkehr mitschwimmen können, wurde die Messung mit einem konventionellen Pkw durchgeführt.

Im Folgenden wird daher wieder mit Bezug zum Konferenzort ein in der Karlsruher Innenstadt (inkl. Adenauerring) gemessener einstündiger Fahrzyklus als Basis für die Potentialabschätzung verwendet. Der Geschwindigkeitsverlauf ist in *Abbildung 2* dargestellt. Die Strecke umfasst insgesamt ca. 27 km. Für das zu betrachtende Fahrzeug werden ein *cw*-Wert von 0,23, eine Masse von 400 kg und ein Rollwiderstandsbeiwert von 0,015 sowie für den Menschen eine Dauerleistung von 100W angenommen.

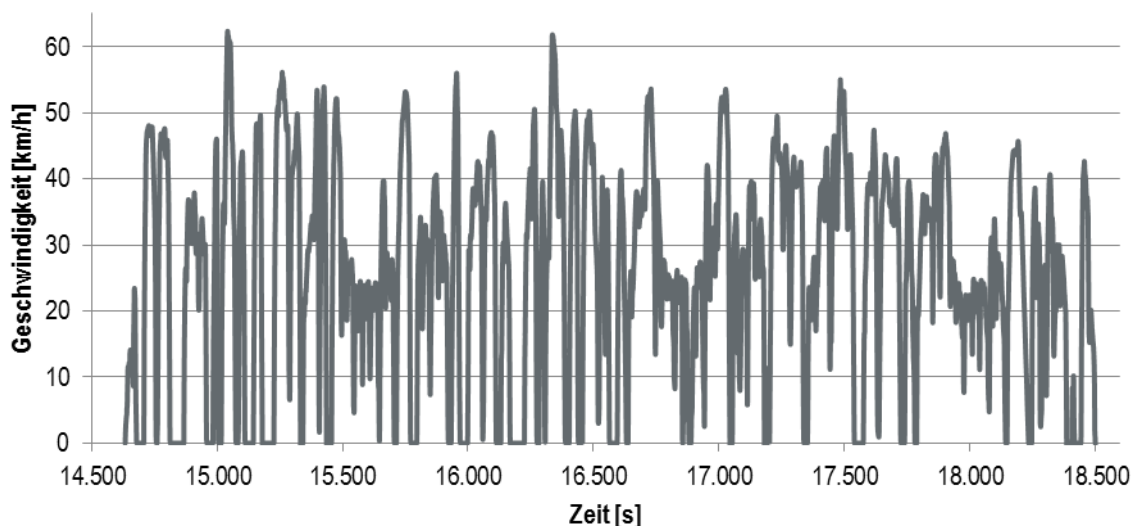


Abbildung 2: *Geschwindigkeitsprofil der Stadtstrecke in Karlsruhe*

Aufgrund der gewählten Daten ergibt sich mit dem gemessenen Geschwindigkeits-Zeit-Profil eine am Rad für den reinen Vortrieb umgesetzte Energie von 1,22 kWh. Der Mensch ist in der Lage in der gefahrenen Zeit 0,1 kWh Energie zu erzeugen. Aufgrund der oben dargestellten Systemverluste stehen jedoch davon im Mittel nur knapp 0,05 kWh an Energie dem Vortrieb zur Verfügung. Bei einem angenommenen Gesamtwirkungsgrad des elektrischen Fahrzeugtriebsstrangs von 90% sowie unter Berücksichtigung von Rekuperation kann ein Mensch folglich im

betrachteten Beispiel knapp 8,5 % der benötigten Energie erzeugen. Gerade bei leichteren Fahrzeugen könnte sich bei einer Gewichtsreduktion um ca. 100 kg sowie durch aerodynamische Maßnahmen der Anteil auf bis zu 15 % erhöhen lassen.

5. Zusammenfassung

Die zukünftige Mobilität im Bereich des Personenindividualverkehrs ist durch die Veränderungen der Anforderungen an Mobilität unterschiedlicher Personengruppen in letzter Konsequenz eine gesamtgesellschaftliche Herausforderung, die durch den Demografischen Wandel (Urbanisierung, Veränderung der Altersstruktur, etc.) geprägt ist. Die Veränderungen der individuellen Anforderungen im Personenindividualverkehr ermöglichen neue Mobilitätslösungen wie das aufgegriffene Beispiel eines rein elektrischen Antriebsstrangs für Pedelecs.

Durch den Verzicht auf eine Kette entstehen konstruktive Freiheiten, die eine individuelle ergonomisch Anpassung ermöglichen würden. Allerdings werden diese Freiheiten durch einen dem Kettentrieb deutlich unterlegenen Gesamtwirkungsgrad erkauft. Dennoch hat das aufgegriffene Beispiel eines faltbaren Pedelecs seine Nische gefunden, da das Fahrzeug nicht auf Reichweite sondern auf komfortables Zurücklegen einer vergleichsweise kurzen Strecke ausgelegt ist.

Ein weiteres, breiteres Anwendungsfeld der rein elektrischen Leistungsübertragung der Pedalerie könnten kleine elektrischen Fahrzeuge sein. Hier könnte das Konzept als eine Art Range Extender eingesetzt werden, bei dem auch die Vorzüge einer ergonomischen Anpassung genutzt werden können. Je nach Fahrzeuggröße und Gewicht könnten so bis zu 15% der benötigten Energie durch einen Menschen bereitgestellt werden. Eine technische Lösung wie bei einem leistungsverzweigten Hybrid könnte den Anteil der vom Mensch bereitgestellten Leistung noch erhöhen.

6. Literatur

- Bahn (2015) <http://haag-marketing.de/DB-BWT-Karte/seiten/kvv.html> (Zugriff 07.01.2015)
- BMVBS (2012). Nationaler Radverkehrsplan 2020. 2. Aufl., Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
- Chlond B (2013) Mobilitätsverhalten und Mobilitätsbedürfnisse versus neue Antriebskonzepte: Wie passt das zusammen? In: Jochem P, Poganietz WR, Grunwald A, Fichtner W (Hrsg) Alternative Antriebskonzepte bei sich wandelnden Mobilitätsstilen. KIT Scientific Publishing, Karlsruhe
- Kalkhoff (o.J.) <http://www.kalkhoff-ergo.com/> (Zugriff 08.01.2015)
- Karlsruhe (2015a) <http://www.karlsruhe.de/b3/verkehr/radverkehr/massnahmen.de> (Zugriff 07.01.2015)
- Karlsruhe (2015b) <http://web1.karlsruhe.de/Stadtentwicklung/siska/sgt/sgt04090.htm> (Zugriff 07.01.2015)
- Lenz B (2013) Zukunftsperspektive individuelle Mobilität – Anforderungen, Erwartungen und Bedürfnisse. In: Jochem P, Poganietz WR, Grunwald A, Fichtner W (Hrsg) Alternative Antriebskonzepte bei sich wandelnden Mobilitätsstilen. KIT Scientific Publishing, Karlsruhe
- Mando (o.J.) <http://www.mandofootloose.com/eng/product/design.asp> (Zugriff 08.01.2015)
- Oehler A (2014) NuVinci und andere – Wirkungsgrad-Messungen an Nabenschaltungen – Teil 2. In: Fahrrad Zukunft, Ausgabe 17.
- Schaeffler 2013 <http://www.schaeffler.de/content.schaeffler.de/de/press/press-releases/press-details.jsp?id=36224256> (Zugriff 08.01.2015)
- ZIV 2013 ZIV - Zweirad-Industrie-Verband e. V.: Zahlen – Daten – Fakten zum Fahrradmarkt in Deutschland. http://ziv-zweirad.de/fileadmin/redakteure/Downloads/PDFs/PK_2014-ZIV_Praesentation_25-03-2014_oT.pdf (Zugriff 09.01.2015)