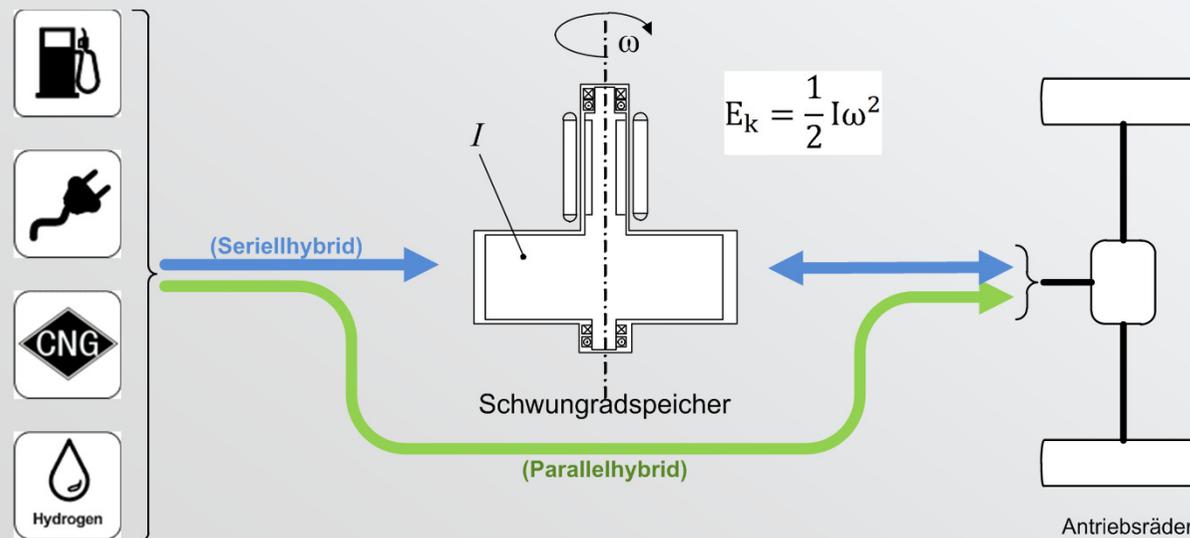


# *Schwungradhybrid als alternatives Antriebskonzept für den urbanen Individual- und Nahverkehr*

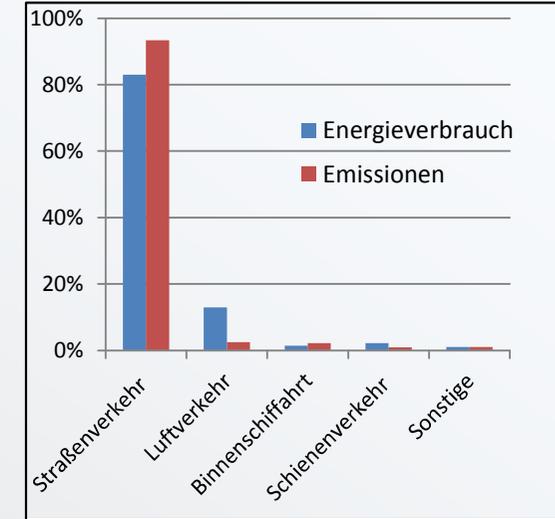
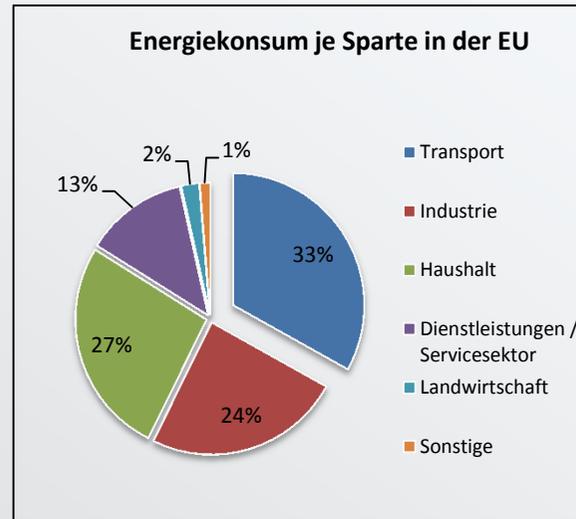
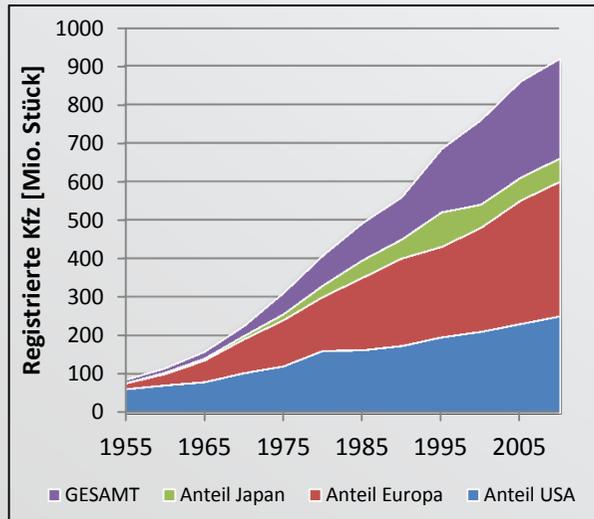
Michael Bader, Armin Buchroithner, Ivan Andrašec, Andreas Brandstätter



## Übersicht

- *Allgemeine Situationsbeschreibung*
- *Eigenschaften von Hybridkonzepten und reinen Elektrofahrzeugen*
- *Eigenschaften von mobilen Energiespeichern*
- *Eignung des urbanen Nahverkehrs für die Hybridisierung*
- *Rekuperierbare Energie als Maß für das Einsparungspotential*
- *Prinzip der Energieübertragung von Schwungradmassenspeichern*
- *Aufbau und Ausführung von Schwungradmassenspeichern*
- *Simulationstechnischer Vergleich von Energiespeicherkonzepten*
- *Beispiele für den erfolgreichen Einsatz von Schwungradhybriden im öffentlichen Verkehr*
- *Zusammenfassung*

## Allgemeine Situationsbeschreibung



- **Steigender Energieverbrauch**
- **Steigendes Verkehrsaufkommen**
- **Hoher Anteil des Straßenverkehrs am Energieverbrauch**
- **Problematik Ballungszentren - Luftqualität**

→ **Effizienzsteigerung**

→ **Reduktion der Emission im urbanen Gebiet**

## Elektrifizierung von PKW und NFZ

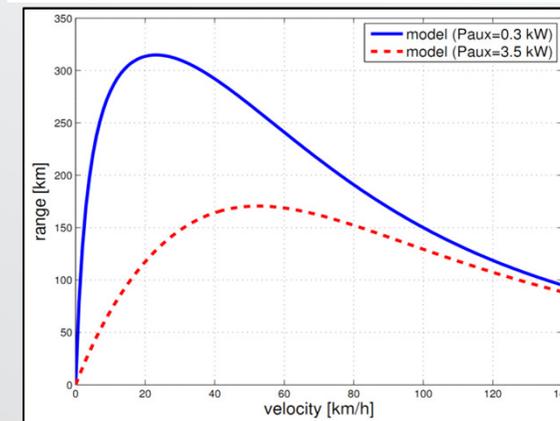
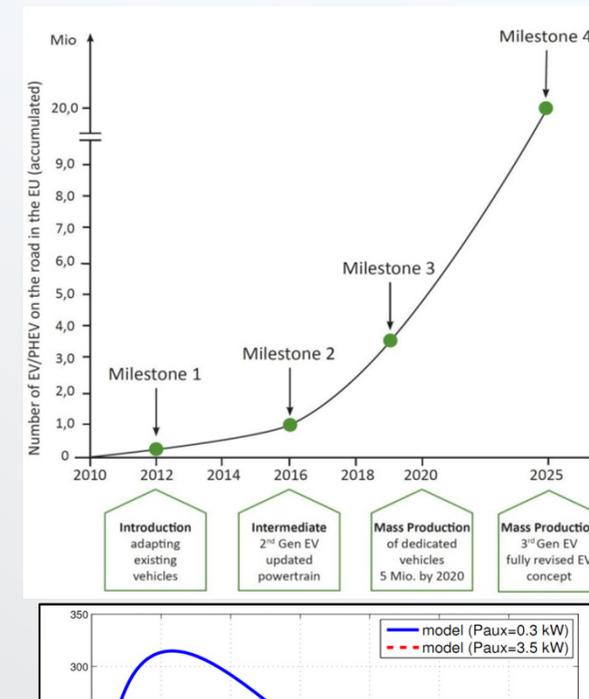
Elektrifizierung als (politisches) Ziel – **Green Car Initiative** der EU

### Herausforderungen bei elektrischen (Batterie-) Speichern:

- Energiedichte (und somit Fahrzeugreichweite)
- Leistungsdichte
- Laden (schnelles Laden ist schädlich)
- Rohstoffe (Verfügbarkeit und damit Preis)
- Lebensdauer
- Recycling
- Energetische und finanzielle Amortisation

### Bsp.: Reichweitenreduktion im Praxiseinsatz:

- Nebenaggregate
- Temperatureinfluss: 15°C → -5°C: Reichweite -50%
- ...



## Hybridisierung von PKW und NFZ

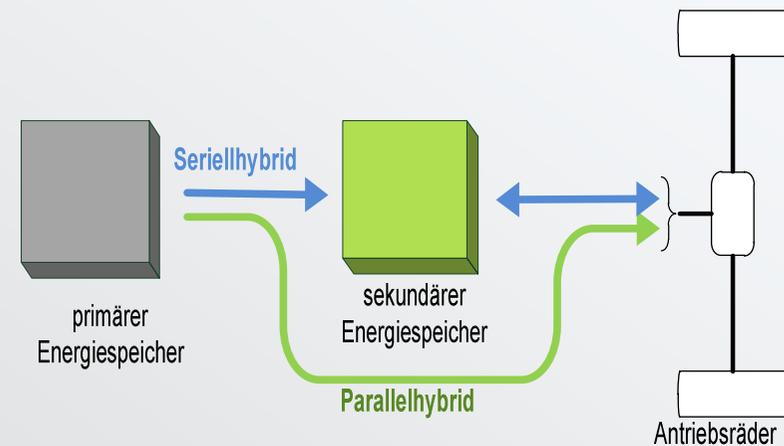
### Eigenschaften im Vergleich zu konventionellen Antriebskonzepten mit Verbrennungsmotoren

#### Vorteile:

- Energieeinsparung bei dynamischem Lastzyklus
- emissionsfreie Fahrt möglich
- temporärer Allradantrieb möglich

#### Nachteile:

- zusätzlicher Antrieb und Energiespeicher
- Gewicht
- Bauraum
- Komplexität der Struktur
- Preis



Strukturdiagramm Hybridtriebstrang

## Typische Eigenschaften mobiler Energiespeicher

**Batterie:** hohe Energiedichte, geringe Leistungsdichte, geringe Lebensdauer, relativ kostengünstig

**Schwungrad (flywheel):** mittlere Energiedichte, hohe Leistungsdichte, hohe Lebensdauer

**Supercap:** geringe Energiedichte, hohe Leistungsdichte, hohe Lebensdauer, teuer

		Li-Io-Batterie (leistungsoptimiert)	Schwungrad (flywheel)	Supercap
<b>Energiedichte</b>	[Wh/kg]	+	○	-
<b>Leistungsdichte</b>	[W/kg]	-	+	+
<b>Preis</b>	[€]	+	○	-
<b>Lebensdauer</b>	[Zyklen]	-	+	+

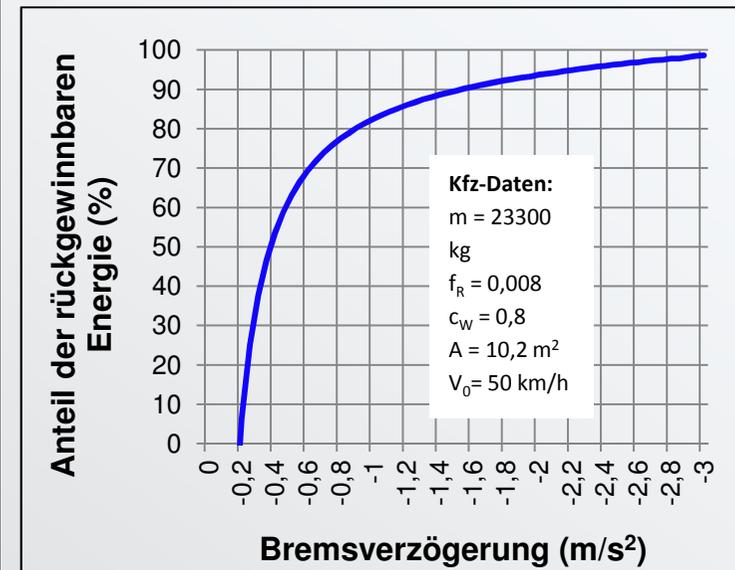
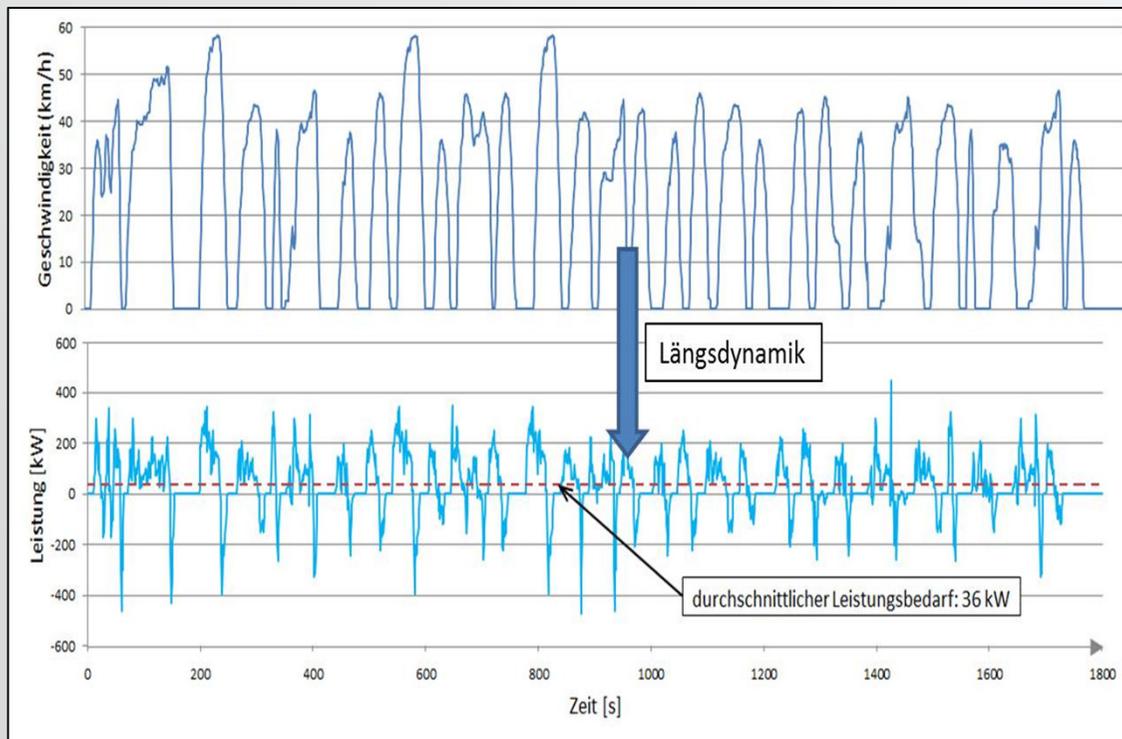
## Typische Kenndaten mobiler Energiespeicher

		Aktuell			Zukunft
		Li-Io-Batterie (leistungsoptimiert)	Schwungrad	Supercap	Li-Luft Batterie
<b>Gravimetrische Energiedichte</b>	[Wh/kg]	200	10 bis 100	5 bis 10	5000
<b>Gravimetrische Leistungsdichte</b>	[W/kg]	700	1000 bis 6000	1500 bis 7000	100
<b>Volumetrische Energiedichte</b>	[Wh/l]	250	bis 60	5	300
<b>Volumetrische Leistungsdichte</b>	[W/l]	500	bis 7500	um 5000	3000 bis 4000

## Eignung des Nahverkehrs für Hybridisierung

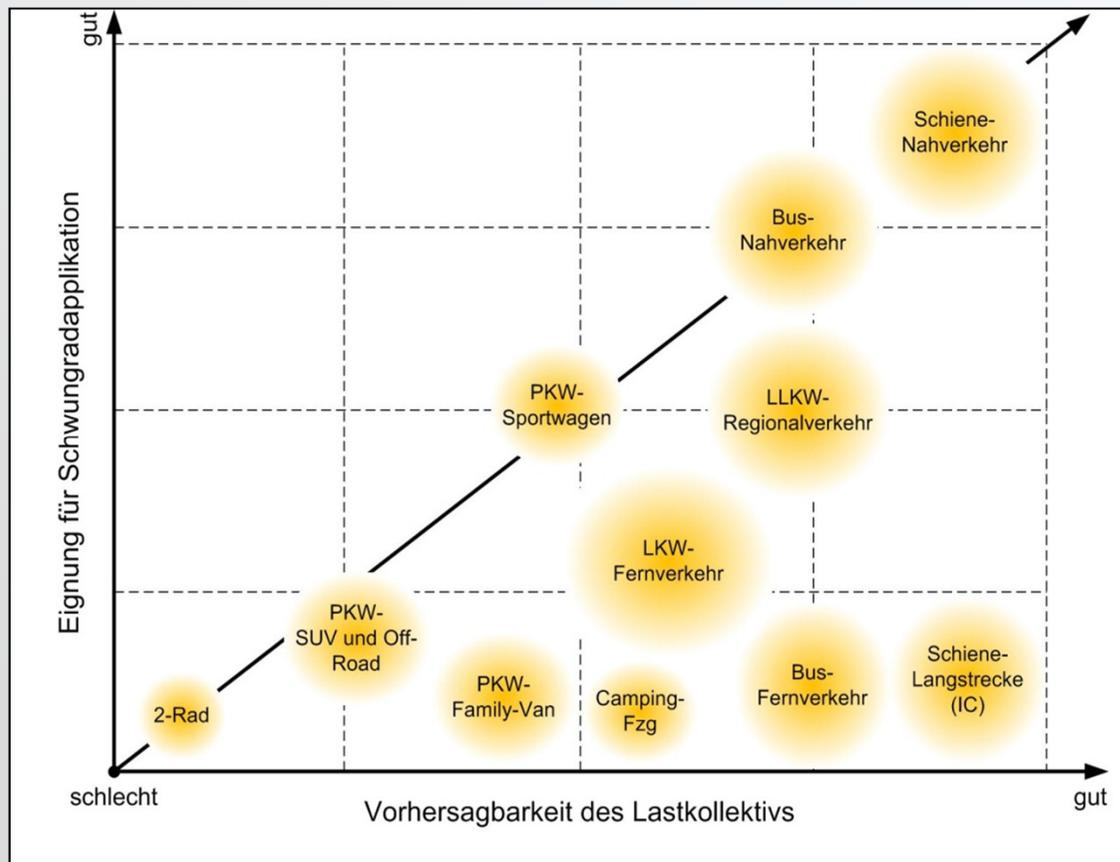
### Rekuperation

- Hohe Längsdynamik: hohe Lastspitzen, geringe Durchschnittslast
- Relativ hohe Bremsverzögerung nötig



# Eignung des Nahverkehrs für Hybridisierung

## Vorhersagbarkeit des Lastkollektivs



# Prinzip der Energieübertragung von Schwungmassenspeichern

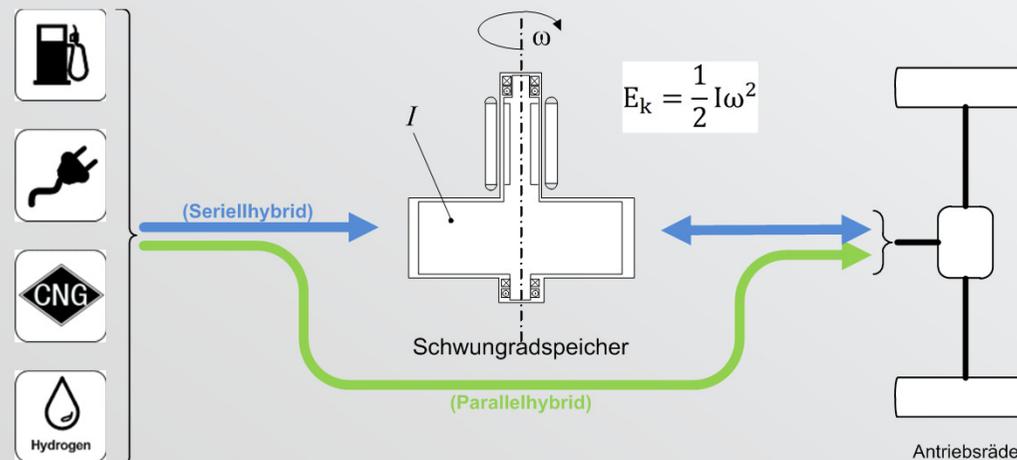
## 1. Mechanische Speicherung und Übertragung

## 2. Mechanische Speicherung – elektrische Übertragung

Schwungradspeicher mit Motor/Generator – elektrische Übertragung – (Rad-) Motor/Generator

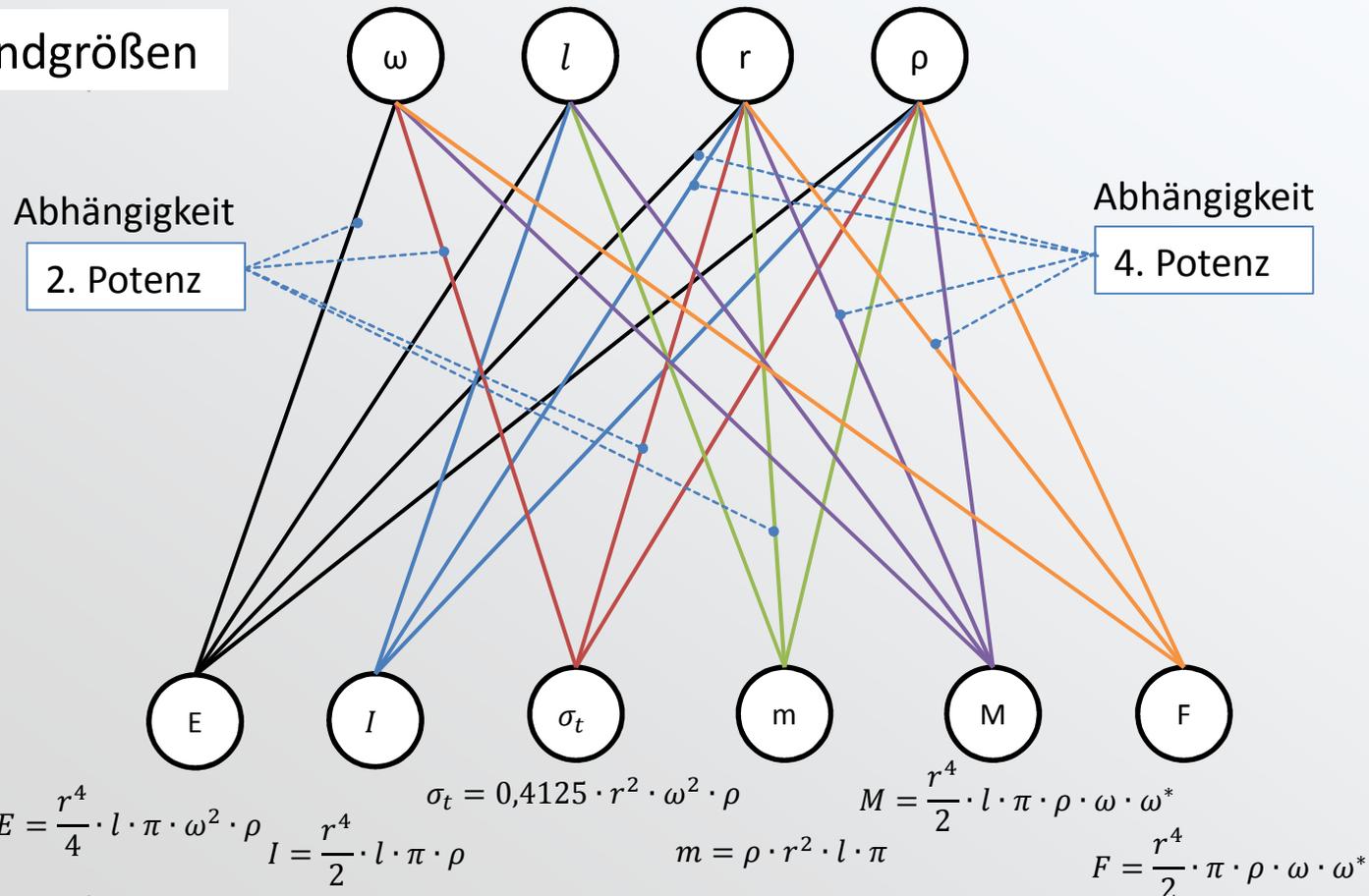
## Multidimensionales Optimierungsproblem

Elektrotechnik (Maschine und Regelung) – Maschinenbau – Werkstoffkunde – Thermomanagement – ...



## Auslegung eines Schwungradspeichers

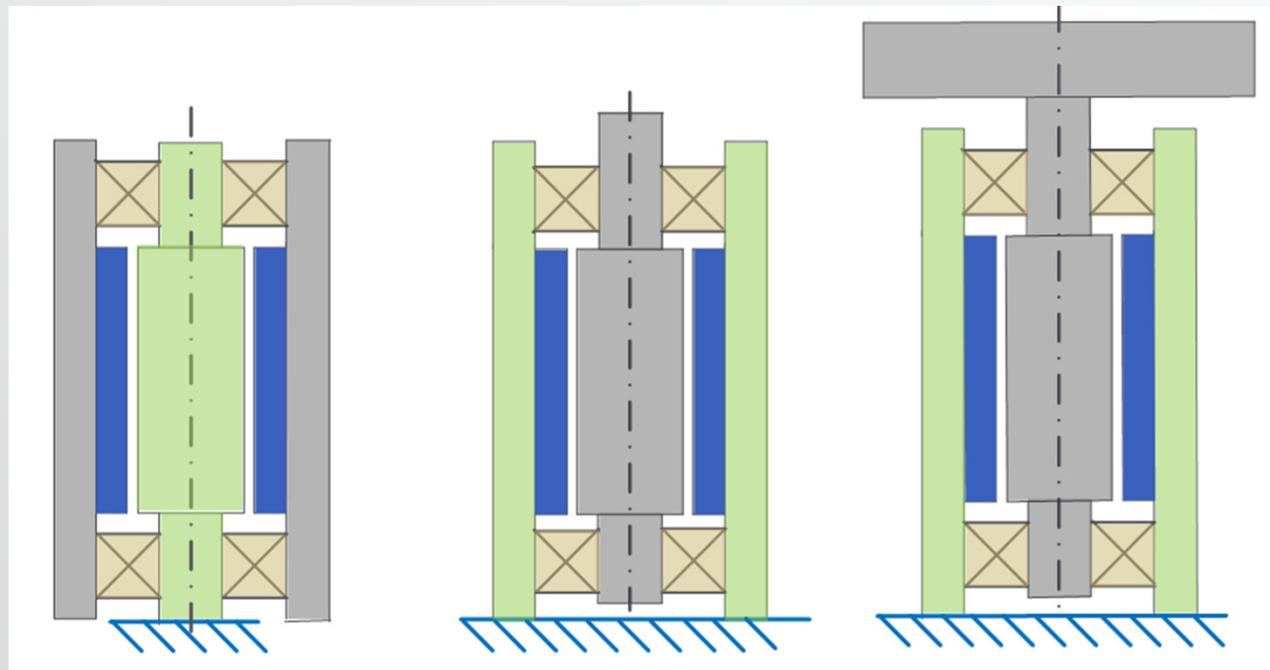
4 Grundgrößen



6 zusammengesetzte Größen

Einschränkung: gültig nur für Scheibenläufer konstanter Dicke

## Aufbau des Schwungradspeichers



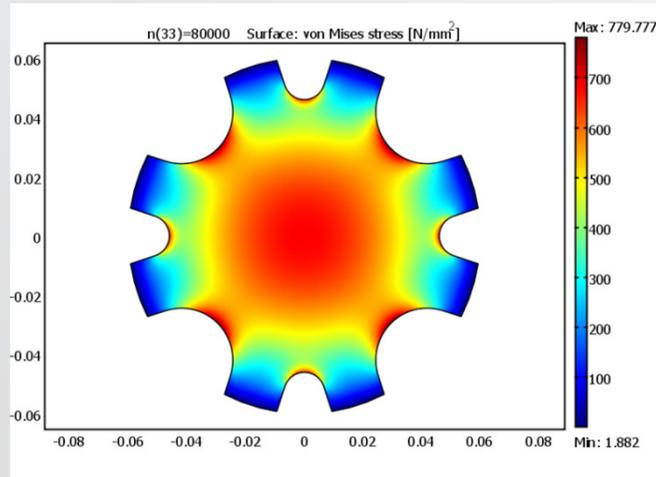
**Außenläufer**  
Hoher Energieinhalt

**Innenläufer**  
hohe Leistung

**Hybridläufer**  
Optimierung der Komponenten

Grün: stehende Komponenten    Grau: drehende Komponenten

## Ausführung der elektrischen Maschine

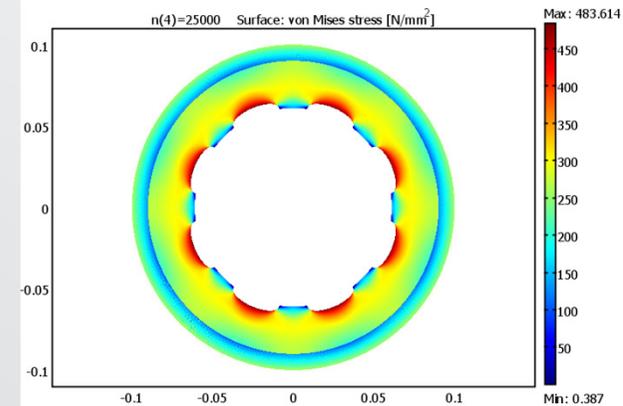
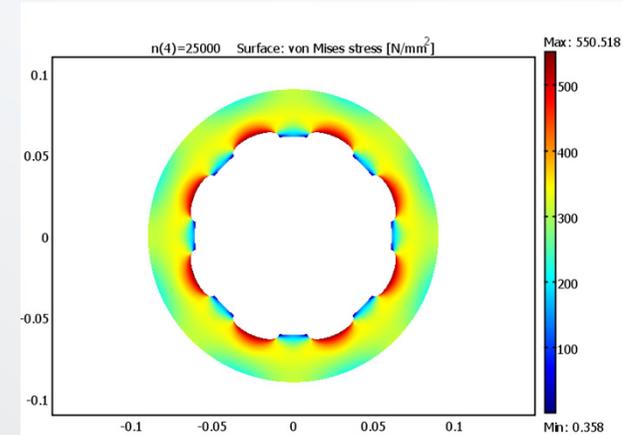


Innenläufer – Reluktanzmaschine:

$n_{\max} = 60.000 \text{ upm}$ ,  $P = 20 \text{ kW}$ ,  $E = 0,08 \text{ kWh}$ ,  $d_{\text{Luftspalt}} = 120 \text{ mm}$   
 Einfacher Rotoraufbau, Stator = Berstschutz

Permanenterregte Synchronmaschine:

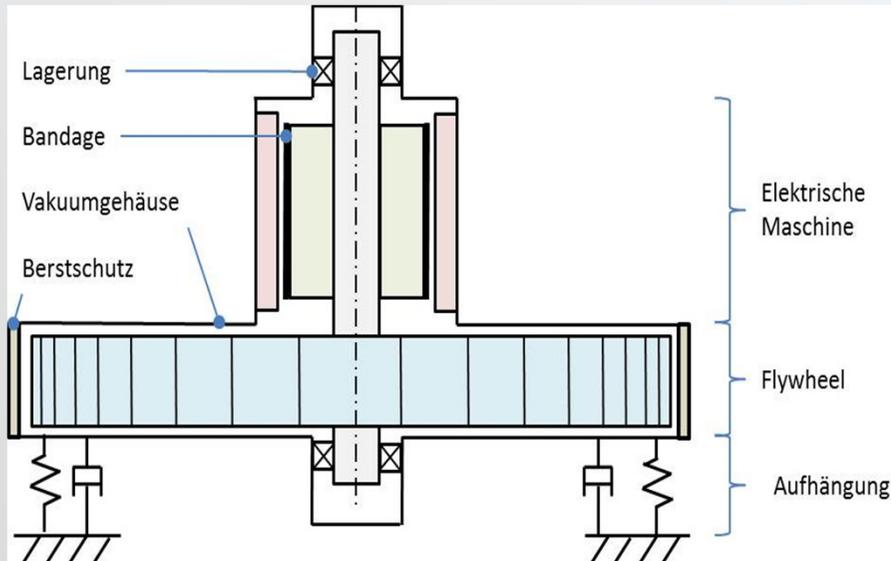
Bandage am Rotor steigert Maximaldrehzahl



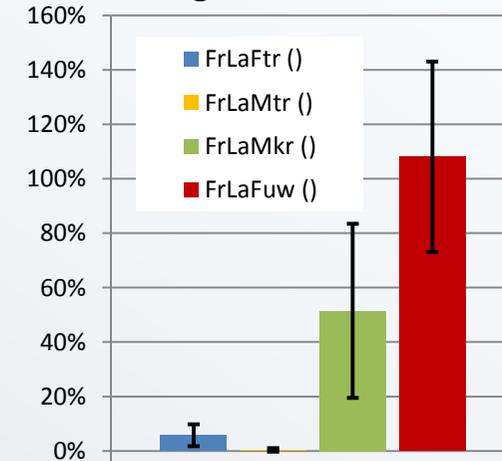
Außenläufer – Reluktanzmaschine:

$n_{\max} = 25.000 \text{ upm}$ ,  $P = 125 \text{ kW}$ ,  $E = 1,5 \text{ kWh}$ ,  $d_{\text{Luftspalt}} = 120 \text{ mm}$   
 C-Faser verstärkter Rotor

## Besonderheiten kinetischer Energiespeicher



Lagerlastanteile



FrLaFtr ... Lagerbelastung durch translatorische Trägheit

FrLaMtr ... Lagerbelastung durch rotatorische Trägheit

FrLaMkr ... Lagerbelastung durch Kreiselmoment

FrLaFuw ... Lagerbelastung durch Unwucht

Flyweelddaten:  $I = 1,4 \text{ kgm}^2$ ,  $n = 9000 \text{ bis } 25000$ , mittlere Drehzahl =  $21000 \text{ upm}$ ,  $m = 83 \text{ kg}$ , Wuchtgüte  $G = 6,3$

Kreiselmoment



nachgiebige Anbindung

Dynam. Belastung durch Unwucht



hohe Wuchtgüte

Energiefreisetzung im Versagensfall



Berstschutz

Strömungsverluste



Evakuierung

Lebensdauerbeschränkend

Lagerschmierung, Betriebsfestigkeit der Bauteile

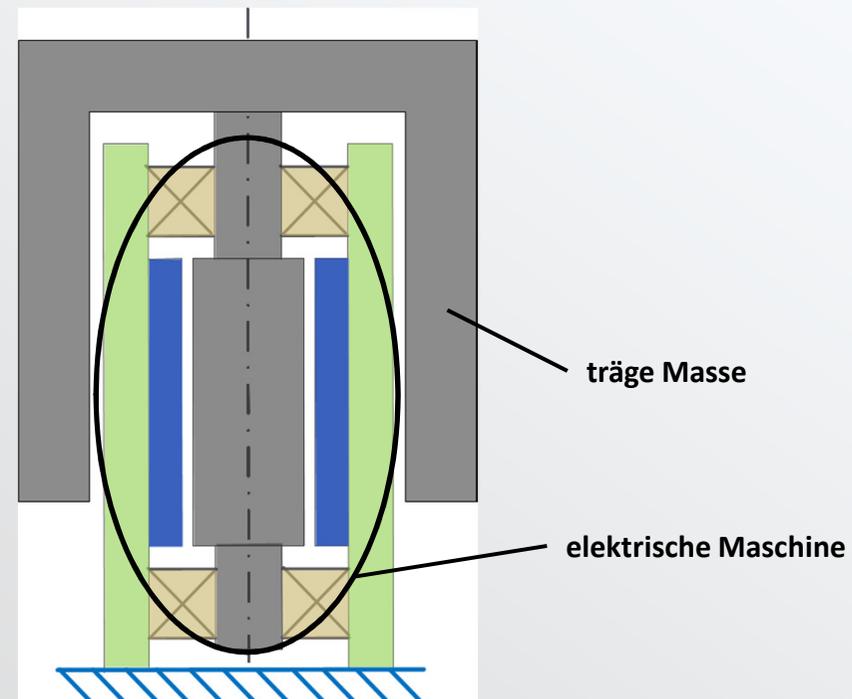
## ***Aufbau des Schwungradspeichers als Hybridläufer***

***Funktionstrennung - Optimierung der Komponenten  
(mechanisch, elektrotechnisch, thermisch,...)***

***Ausführung von elektrischer Maschine und Energiespeicher unabhängig voneinander***

### ***Zu beobachtende Trends:***

- hochdrehenden Ausführungen
- Verbundwerkstoffe
- anwendungsoptimierte Ausführungen



# Simulationstechnischer Vergleich von Energiespeicherkonzepten

## 19 to. Bus im innerstädtischen Einsatz

	A: Schwungrad-Speicher	B: Akkumulator (Li-FePO4)	C: Supercap
Max. Energieinhalt [kWh]	1,5	8,3 (mikrozyklierend)	1,5
Max. Leistung [kW]	165	120	144
Masse [kg]	165	170	150

Leistungsbedarfsgleichung:

$$P = m g v (f_r + K v^2) + \frac{1}{2} \rho_{luft} v^3 A c_w + m_a v \frac{d v}{d t}$$

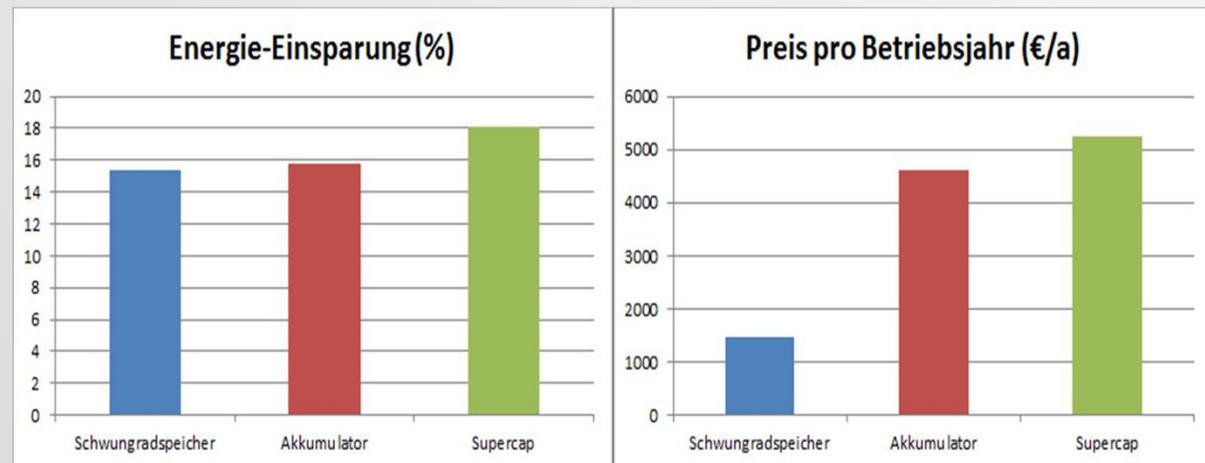
Längsdynamik aus Fahrzyklus:

**Knackpunkte der Konzepte hier:**

**Flywheel:** Selbstentladung

**Batterie:** Lebensdauer → Kosten!

**Supercap:** Anschaffungskosten



## *Technische Daten der Ausführung*

<b>Nenndrehzahl</b>	25.000 U/min
<b>Energieinhalt</b>	1,5 kW/h
<b>Leistung</b>	125 kW Dauerleistung
<b>Rotor</b>	83 kg
<b>Rotordurchmesser</b>	420 mm
<b>Rotorlänge</b>	250 mm
<b>Aufbau</b>	Außenläufer mit Kohlefaserbandage

### ***Auslegung:***

- Ausreichende Leistung, um Lastspitzen abzudecken bzw. zu glätten (motorisch und generatorisch)
- Energieinhalt z.B.: Bus im Stadtverkehr: ~ Beschleunigung von Stillstand auf 60 km/h
- Skalierbar durch Verwendung mehrerer Schwungradeinheiten
- Kritisch bzgl. Wartung: Lagerschmierung
- Hohe Wuchtgüte erforderlich (zeitlich stabil!)

## Realisierte Schwungrad-Hybridfahrzeuge für den öffentlichen Verkehr

	Baujahr	Bezeichnung	Hersteller/Entwickler	Land	Energieinhalt Schwungrad	Max. Drehzahl	Schwungmasse
					[kWh]	[U/min]	[kg]
<b>Straßenfahrzeuge</b>							
1	1953	Gyrobuss	Oerlikon Werke	Schweiz	9,15	3000	1500
2	1961	Gyreacta	Robert Clerk	England	-	15000	100
3	1979	Stockholm City Bus	Volvo	Schweden	-	10000	335
4	1981	M.A.N. Versuchsbus	MAN	Deutschland	1,5	12000	104
5	1985	New York Bus System	Garrett Corp.	USA	16	16000	340
6	1988	Münchner Stadtbusse	MAN/Neoplan/Magent Motor	Deutschland	2 (2,75)	11000	181
7	1995	O-Bus Basel	Neoplan/Magent Motor	-	-	-	-
8	1998	CCM Trolleybus	CCM	Dänemark	2	-	-
9	2004	PHILEAS	CCM	-	-	-	-
10	2006	AutoTram	Fraunhofer Institut	Deutschland	4	23000	300,0
11	2009	Torotracc Flybus	Ricardo Kinergy/Torotracc	England	0,28	-	-
<b>Schienefahrzeuge</b>							
1	1860	Schuberski Lok	Leutnant Z. Schuberski	Russland	31,67	-	5000
2	1948	British Rail Class 70	-	England	-	-	-
3	1974	New York Subway	Garrett Corp.	USA	-	14000	4 x 68
4	1975	Advanced Concept Train	Boeing Vertol Comp	USA	4,5	11000	
5	1992	PPM 50 Railcar	Parry People Movers	England	3,75	2600	720
6	2001	ULEV-TAP I	CCM	-	4	-	-
7	2004	Lirex MDS K5	ALSTOM	Deutschland	2 x 2	12000	-
8	2006	Lirex MDS K6	ALSTOM	Deutschland	2 x 6	21000	-

## **Zusammenfassung**

- **Bedarf an alternativen Antrieben gegeben**
- **Schwungradspeicher für Hybridanwendung ist funktionierende Technologie**
- **Schwungradspeicher bietet hohe Leistung bei mittlerem Energieinhalt**
- **Dynamischer Fahrzyklus mit guter Vorhersagbarkeit des Lastprofils nötig → öffentlicher Nahverkehr**
- **Verbindung von Reichweite und Emissionsreduzierung bzw. emissionsfreie Fahrt → Individualverkehr**
- **Energieeinsparung dabei bis ca. 25% möglich**
- **System skalierbar (Ausführung von Energiespeicher und Maschine, einfach „vervielfältigbar“)**
- **Hohes Potential durch Verbundwerkstoffe**
- **aufwändige Entwicklung / Auslegung**
- **„Exot“, emotionale Barriere?**
- **Übergangstechnologie oder langfristige Alternative**

# Danke für die Aufmerksamkeit

