



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
**Bundesamt für Energie BFE**

**Schlussbericht** 30. Mai 2013

---

# Dampfspeicherfahrzeuge

## Ersatz von Elektro- und Dieselfahrzeugen

---

SWISS EXCELLENCE

**DLM**

Dampflokotiv- und  
Maschinenfabrik DLM AG

Zürcher Hochschule  
für Angewandte Wissenschaften

**zhaw**

**School of  
Engineering**

IEFE Institut für Energiesysteme  
und Fluid-Engineering

**n|w**

**Fachhochschule  
Nordwestschweiz**



**Auftraggeber:**

Bundesamt für Energie BFE  
Forschungsprogramm  
CH-3003 Bern  
[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

**Kofinanzierung:**

Swiss Excellence Stiftung, 8022 Zürich  
DLM AG, Gertrudstrasse 17, 8400 Winterthur

**Auftragnehmer:**

Swiss Excellence Stiftung  
Bahnhofstrasse 48  
8022 Zürich  
[www.swiss-excellence.ch](http://www.swiss-excellence.ch)

**Autor:**

Willy Frank, Swiss Excellence Stiftung,  
[willy-frank@bluewin.ch](mailto:willy-frank@bluewin.ch)

**BFE-Bereichsleiter:** Martin Pulfer

**BFE-Programmleiter:** Michael Spirig

**BFE-Vertrags- und Projektnummer:** SI/500761-01; 8100080

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.



## Abstract

Dieses Projekt befasst sich mit dem Einsatz von schienengebundenen und schienenungebundenen Fahrzeugen mit Dampfspeichertechnik in der Schweiz. Bei Dampfspeicherfahrzeugen wird, im Vergleich zum allgemein bekannten Dampftrieb, der Dampf nicht auf dem Fahrzeug selbst produziert, sondern von einer externen Quelle zugeführt und auf dem Fahrzeug gespeichert. Der Dampfspeicherantrieb ist eine bewährte Technologie durch welche CO<sub>2</sub>-Einsparungen (Substitution von fossilen Brennstoffen) sowie Stromeinsparungen realisiert werden können. Weitere Vorteile des Dampfspeicherantriebs sind der emissionsfreie Betrieb (keine Luftbelastung und geräuscharm) sowie Sicherheitsaspekte (Explosion, Kontamination und Brand nicht möglich).

Im Projekt wurde das CO<sub>2</sub>-Einsparpotenzial erhoben und die Dampfspeichertechnik aus Marktsicht sowie technischer und betriebswirtschaftlicher Perspektive betrachtet.

## Resultate

Aktuell wird schweizweit eine Dampfproduktion von 3'400t/h erzeugt, welche aufgrund der Dampfparameter auch für den Betrieb von Dampfspeicherfahrzeugen eingesetzt werden könnte. Die Dampfproduktion ist stark KVA getrieben (KKW wurden nicht berücksichtigt).

Das aktuell grösste Potential für die Dampfspeichertechnik liegt im Markt für schienengebundene Rangierfahrzeuge, sprich Rangierlokomotiven. Für diese Anwendung konnten 17 konkrete Rangierbetriebe identifiziert werden, welche sich aufgrund der Lage zu Dampfproduzenten für den Einsatz von Dampfspeicherlokomotiven eignen. Würden diese Standorte mit Dampfspeicherfahrzeugen ausgerüstet, könnte eine CO<sub>2</sub>-Einsparung von jährlich 14'300 Tonnen erreicht werden (14'300 Tonnen CO<sub>2</sub> entsprechen der CO<sub>2</sub>-Menge aus dem Verbrauch von 7,7 Mio. Liter Diesel). Diese Einsparung entspricht dem jährlichen CO<sub>2</sub>-Austoss von 4'400 Personenwagen.

Der Grossteil dieser Rangierbahnhöfe wird von der SBB Cargo betrieben. Zur Umsetzung des Rangierbetriebes mit Dampfspeichertechnik und zur Realisierung der CO<sub>2</sub>-Einsparung muss somit die SBB Cargo als Partner gewonnen werden.

## Fazit

Sowohl ökologische als auch ökonomische Faktoren sprechen für einen Einsatz der Dampfspeichertechnik. Die Vorurteile gegenüber dieser „alten“ Technik sind jedoch beträchtlich. Mittels eines Pilotbetriebs im Rangierbetrieb in Suhr sollen diese im Sinn eines „Proof of Concept“ und „Proof of Business“, abgebaut werden. Gespräche sind bereits im Gange.

Die industrielle Umsetzung soll durch ein eigenständiges Unternehmen und/ oder einer Kooperation mit Partnerfirmen erfolgen (potenzielle Projektpartner sind im Gespräch). Dazu sind eventuell Drittmittel durch Investoren oder Kreditgeber erforderlich. Die Aktivitäten konzentrieren sich prioritär auf den Markt für schienengebundene Rangierfahrzeuge.



# Einleitung

Das durch das BFE unterstützte Projekt „Dampfspeicherfahrzeuge“ befasst sich mit dem Einsatz von schienengebundenen und schienenungebundenen Fahrzeugen mit Dampfspeichertechnik in der Schweiz. Bei Dampfspeicherfahrzeugen wird, im Vergleich zum allgemein bekannten Dampftrieb, der Dampf nicht auf dem Fahrzeug selbst hergestellt, sondern von einer externen Quelle zugeführt und auf dem Fahrzeug gespeichert. Der Dampfspeicherantrieb ist eine bewährte Technologie, welche durch die Elektrifizierung der Eisenbahnen und durch die Entwicklung von Verbrennungsmotoren verdrängt wurde. Die aktuellen Bestrebungen zur CO<sub>2</sub>-Einsparung und zur Substitution von fossilen Brennstoffen rückt diese Technologie wieder in den Fokus.

Das Ziel dieses Projektes war es die Einsatzmöglichkeiten dieser Technologie aus Marktsicht sowie technischer Perspektive aufzuzeigen. Die Outputs dieses Projektes wurden grundsätzlich in zwei Phasen erarbeitet, welche im folgenden Abschnitt beschrieben werden.

## Vorgehen

In der ersten Phase des Projektes wurde erhoben, welche CO<sub>2</sub>-Einsparung durch den Einsatz von Dampfspeicherfahrzeugen in der Schweiz erzielt werden könnte. Wie im vorhergehenden Abschnitt beschrieben, braucht es für den Dampfspeicherantrieb eine externe Dampfquelle. Diese potentiellen Dampfproduzenten mussten identifiziert werden (vgl. S.6). Parallel dazu wurde nach Anwendungsbereichen gesucht, in denen der Dampfspeicherantrieb eingesetzt werden kann, bzw. bereits eingesetzt wird. Weiter sind diese Anwendungen, bzw. die dazugehörigen Fahrzeuge nach deren „CO<sub>2</sub>-Sparpotential“ und „Zeitnaher Umsetzbarkeit“ rangiert worden (vgl. S.8).

Aufgrund konkreter „Paarungen“ zwischen Dampfproduzenten und Anwendungen konnte anschliessend das schweizweite CO<sub>2</sub>-Sparpotential ausgewiesen werden (vgl. S.10).

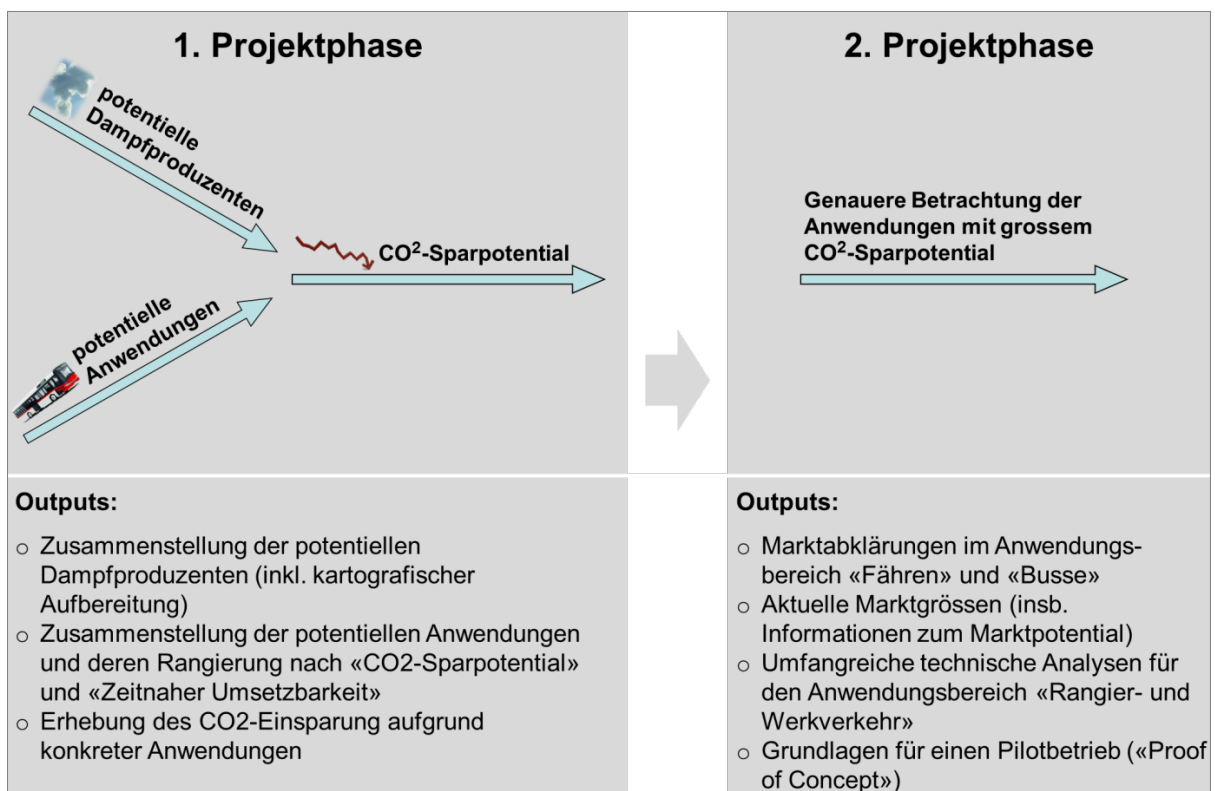


Abbildung 1: Vorgehen im Projekt (exkl. der dritten Phase „Industrielle Umsetzung“)



Aufgrund eines hohen CO<sub>2</sub>-Einsparpotentials wurde auch die zweite Phase des Projektes bearbeitet. In dieser Phase wurden die Anwendungen, welche die grössten CO<sub>2</sub>-Einsparungen versprechen, genauer analysiert. Dazu gehörten Busse und Fähren sowie Lokomotiven für den Rangier- und Werkverkehr. Für die Busse und Fähren wurden erste Marktabklärungen gemacht. Dabei wurde die technologische Entwicklung in diesem Bereich untersucht, d.h. die zukünftigen Konkurrenztechnologien zum Dampfspeicherantrieb. Weiter sind Ansprüche und Vorbehalte von potentiellen Abnehmern, d.h. von Bus- und Fährbetrieben, bezüglich der Dampfspeichertechnik erhoben worden (die Zusammenfassung der Ergebnisse ist ab S.11 ersichtlich). Für die Lokomotiven des Rangier- und Werkverkehrs wurde in der zweiten Projektphase ein umfangreicher Bericht ausgearbeitet, welcher den Einsatz solcher Lokomotiven aus technischer und wirtschaftlicher Sicht beleuchtet (ab S.16 ist ein Auszug aus diesem Bericht ersichtlich; der gesamte Bericht befindet sich im Anhang A).

Aufgrund der Reaktionen von potentiellen Abnehmern der Dampfspeicherfahrzeugen und Marktzahlen wurden weiter die aktuellen Marktverhältnisse dargestellt und daraus die Notwendigkeit eines Pilotbetriebes (als „Proof of Concept“) abgeleitet (vgl. S.15). Die Umsetzung eines Pilotbetriebes wurde ebenfalls im Rahmen des Projektes ausgearbeitet und konkretisiert.

In einer dritten Projektphase (in Abb. 1 nicht vermerkt), welche aktuell bearbeitet wird, werden potentielle industrielle Umsetzungspartner, wie z.B. die Stadler Rail für den Anwendungsbereich „Lokomotiven“, von den Initianten dieses Projekts (Swiss Excellence Stiftung) kontaktiert. Ziel ist es diese Unternehmen als Umsetzungspartner zu gewinnen und so die erhobenen CO<sub>2</sub>-Einsparungen zu realisieren sowie Wertschöpfung für die Schweizer Industrie zu generieren.



# CO<sub>2</sub>-Einsparpotential durch den Dampfspeicherbetrieb

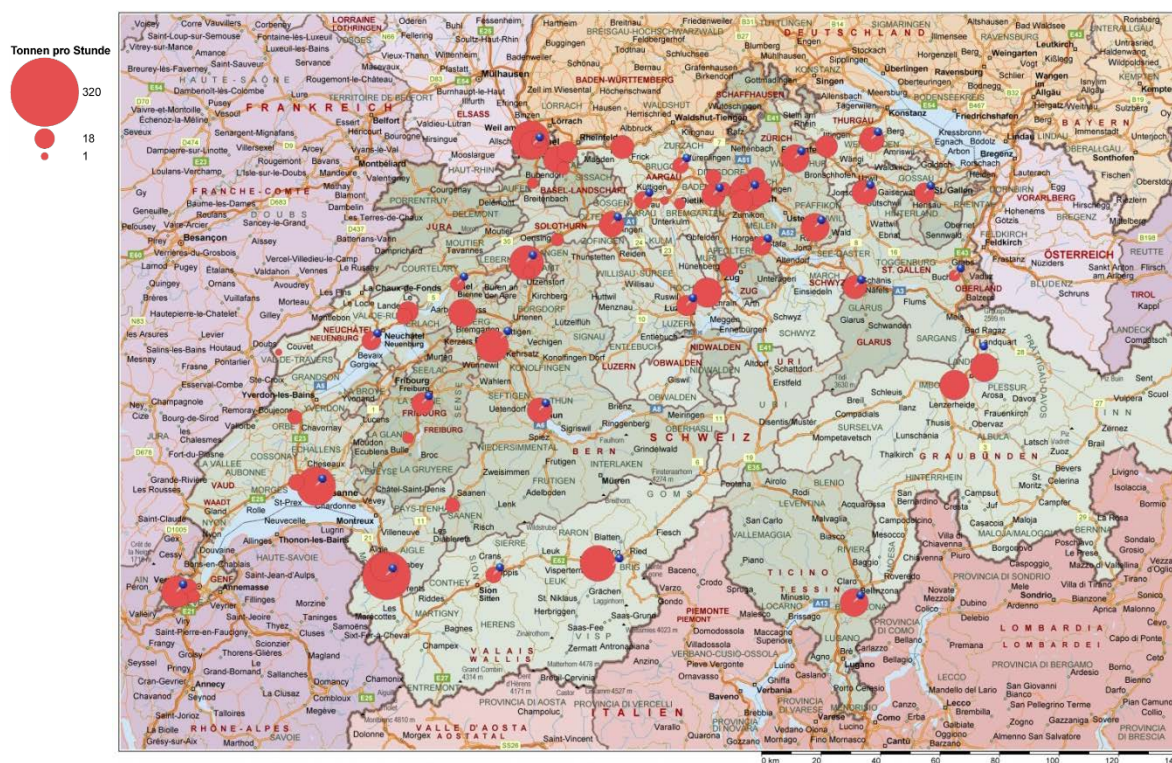
## Potentielle Dampflieferanten in der Schweiz

Zur Dampfproduktion für den Betrieb der Dampfspeicherfahrzeuge sollen bestehende Anlagen genutzt werden. Für den Betrieb von Dampfmaschinen sind Dampfparameter im Bereich von 20bar/280°C ideal. Aufgrund dessen wurden potentielle Dampflieferanten in der Schweiz identifiziert, welche diese Dampfqualität herstellen. Die Dampfproduktion ist getrieben durch die Kehrlichtverbrennungsanlagen (KVA), welche den Dampf aktuell zur Strom- sowie Fernwärme- und Ferndampfproduktion einsetzen. Weiter gibt es Unternehmen, welche Dampf in dieser Qualität in ihren Herstellungsprozessen benötigen und diesen in betriebseigenen Anlagen produzieren.

Die Herstellung des Dampfes in KVA ist im Rahmen dieser Studie von grossem Interesse. Einerseits sind die Dampfparameter der KVA-Anlagen ideal für den Betrieb von Dampfspeicherfahrzeugen und andererseits soll durch den Einsatz dieser Fahrzeuge CO<sub>2</sub> eingespart werden. Diese Einsparung ist bei der Verwendung von KVA-Dampf gegeben, weil ein Teil des Dampfes, auf Grund des biogenen Anteils des Abfalles sowie dem Stoffrecycling nach der thermischen Verwertung, CO<sub>2</sub>-neutral<sup>1</sup> produziert wird.

Die Daten zur Identifizierung der potentiellen Dampfproduzenten wurden in Zusammenarbeit mit dem Kesselinspektorat (Abteilung des SVTI Schweizerischer Verein für technische Inspektionen) erarbeitet. Gemäss deren Angaben besteht aktuell schweizweit eine Produktion<sup>2</sup> von ca. 3'400t/h, welche aufgrund der Parameter auch für den Betrieb von Dampfspeicherfahrzeuge eingesetzt werden könnte.

Auf der nachfolgenden Karte sind die Standorte sowie die Produktionsmengen der potentiellen Dampfproduzenten ersichtlich. Die Standorte von KVA sind mit einer blauen Stecknadel gekennzeichnet (die Karte ist in einer grösseren Ausführung im Anhang B ersichtlich).



<sup>1</sup> Es wird davon ausgegangen, dass die Energieproduktion einer KVA zu 70% CO<sub>2</sub>-neutral ist. Die Betreiber der KVA geben Werte von 50% bis 100% an. Gemäss unabhängigen Experten sind jedoch Werte über 75% äusserst umstritten.

<sup>2</sup> Die Dampfproduktion von Kernkraftwerken wurde nicht berücksichtigt.



## **Anwendungen für den Dampfspeicherbetrieb**

Grundsätzlich eignen sich Fahrzeuge für den Dampfspeicherbetrieb, welche in einem eingeschränkten Radius operieren oder (wie z.B. Linienbusse) eine definierte Route zurücklegen. Fahrzeuge mit Dampfspeicherantrieb müssen abhängig von deren Dampfspeichervolumen und der zurückgelegten Strecke wieder betankt/aufgeladen werden (ähnlich wie batteriebetriebene Fahrzeuge). Somit eignen sich schienenengebundene und schienenungebundene Fahrzeuge, welche definierte Strecken abfahren oder auf Werkarealen operieren. In diesen Fällen können Dampftankstellen“ entlang der Route oder zentral bereitgestellt werden, welche den Betrieb der Dampfspeicherfahrzeuge sicherstellen.



**Tabelle 1: Anwendungen für den Dampfspeicherbetrieb**

Anwendungsbereich	Fahrzeuge	Eignung für Dampfspeicherbetrieb		Rangierung nach CO <sub>2</sub> -Sparpotential	Rangierung nach zeitnaher Umsetzbarkeit
		Pro	Contra		
<b>Intralogistik</b>	Gabelstapler und Pneuschleppfahrzeuge <sup>3</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Schnelle Aufladung (im Vergleich zum Batteriebetrieb)</li> <li>○ Gut geeignet für Kühllhäuser (im Vergleich zum Batteriebetrieb)</li> <li>○ Nicht mehrere Dampftankstellen nötig (Äusserst begrenzter Bewegungsradius)</li> <li>○ Keine Emissionen beim Betrieb in geschlossenen Hallen (insb. im Vergleich zu dieselbetriebenen Pneuschleppfahrzeugen)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Volumen zur Unterbringung des Dampfspeichers ist limitiert (insb. bei kleinen Gabelstaplern)</li> </ul>	5	3
<b>ÖV</b>	Busse <sup>4</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Geräusch- und emissionsloser Antrieb; insb. für Quartierbusse, welche aktuell mit Dieselantrieb laufen</li> <li>○ Keine Explosions- oder Kontaminationsgefahr bei Unfällen</li> <li>○ Gefordertes Beschleunigungsverhalten kann mit dem Dampfantrieb problemlos erzeugt werden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Volumen zur Unterbringung des Dampfspeichers ist limitiert</li> <li>○ Grosser Bewegungsradius (Vielzahl an Dampftankstellen nötig)</li> <li>○ Grossflächiges Dampfnetz müsste aufgebaut werden</li> </ul>	1	4
	Fähren <sup>5</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Kurze Überfahrten und definierte Wartezeiten (ideal zur Betankung mit Dampf)</li> <li>○ Dampfantriebe sind in der Schifffahrt erprobt</li> <li>○ Bei Unfällen treten keine Stoffe (wie z.B. Dieselöl) aus, welche das Wasser verschmutzen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Für den Fall, dass eine Fähre aufgrund schlechter Wasserverhältnisse nicht anlegen kann, muss ein Zusatzsystem bestehen, welches den Dampf auf der Fähre produzieren kann</li> </ul>	3	2
<b>Güterlogistik (Schiene)</b>	Rangierlokomotiven (Schienentraktoren) <sup>6</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Der Dampfantrieb ist eine bewährte Technik für Lokomotiven</li> <li>○ Platz- sowie Gewichtrestriktionen für den Dampfspeicher stellen kein Problem dar</li> <li>○ Keine Luftbelastung beim Rangieren in Werkhallen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Häufigeres Tanken notwendig im Vergleich zu einer Lokomotive mit Dieselantrieb</li> </ul>	2	1
<b>Flughafenlogistik</b>	Flughafenbusse <sup>7</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Keine Explosions- oder Brandgefahr bei Unfällen auf dem Flughafengelände</li> <li>○ Bessere Platzverhältnisse zur Unterbringung des Dampfspeichers als bei Stadtbussen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Keine zentrale Unterbringung der Fahrzeuge (Vielzahl an Dampftankstellen nötig)</li> </ul>	4	4
	Gepäckschlepper und Flugzeugschlepper (Pusher) <sup>8</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Schnelle Aufladung (im Vergleich zum Batteriebetrieb)</li> <li>○ Keine Explosions- oder Brandgefahr bei Unfällen auf dem Flughafengelände</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Keine zentrale Unterbringung der Fahrzeuge (Vielzahl an Dampftankstellen nötig)</li> </ul>	4	3

<sup>3</sup> siehe technischer Bericht (Anhang A, S.24) Kapitel „Pneufahrzeuge mit Speichertechnik“

<sup>4</sup> siehe technischer Bericht (Anhang A, S.27) Kapitel „Busse, Cars und Lastwagen“

<sup>5</sup> siehe technischer Bericht (Anhang A, S.29) Kapitel „Schiffe mit Speichertechnik“

<sup>6</sup> siehe technischer Bericht (Anhang A, S.15) Kapitel „Speicherlokomotiven“

<sup>7</sup> siehe technischer Bericht (Anhang A, S.26) Kapitel „Flughafenbusse“

<sup>8</sup> siehe technischer Bericht (Anhang A, S.26) Kapitel „Flughafenschlepper“



## Erhebung des CO<sub>2</sub>-Einsparpotentials





Zur Erhebung des CO<sub>2</sub>-Einsparpotentials durch den Einsatz von Dampfspeicherfahrzeugen wurden schweizweit konkrete „Paarungen“ von Dampfproduzenten und potentiellen Abnehmern identifiziert. Die Dampfproduzenten und Abnehmer müssen nahe beisammen liegen, damit der Dampftransport über eine Dampfleitung oder idealerweise über das bestehende Ferndampfnetz der Dampfproduzenten erfolgen kann. In einem ersten Schritt wurde zur Identifikation dieser Paarungen die Karte mit den Dampfproduzenten mit den möglichen Anwendungsbereichen (vgl. vorheriges Kapitel) ergänzt. Eingezeichnet wurden grosse Anbieter des Öffentlichen Verkehrs , Fähren , Flughäfen  und Rangierbetriebe  (vgl. Abb. 3 oder in grösserer Ausführung Anhang C).



Abbildung 3: Dampfproduzenten und Anwendungsbereiche

In einem zweiten Schritt sind alle Paarungen von Dampfproduzent und Abnehmer auf deren Umsetzbarkeit überprüft worden. Einige der Paarungen mussten dann verworfen werden, weil Dampfproduzent und Abnehmer zu weit auseinander liegen oder die Dampfproduktion vor Ort nicht CO<sub>2</sub>-neutral ist und somit zu keiner CO<sub>2</sub>-Einsparung geführt hätte.

Es konnten 27 konkrete Paarungen von Dampfproduzenten und potentiellen Abnehmern wie Busbetrieben, Rangierbahnhöfen und Fährbetrieben identifiziert werden. Würden die Fahrzeuge dieser Unternehmen mit der Dampfspeichertechnik ausgerüstet, könnte eine CO<sub>2</sub>-Einsparung von jährlich 42'000 Tonnen erreicht werden. Diese Einsparung entspricht dem jährlichen CO<sub>2</sub>-Austoss von 12'800 Personenwagen – diese PW aufgereicht, ergeben die Strecke von Bern nach Olten. In der nachfolgenden Tabelle sind die zur Berechnung der CO<sub>2</sub>-Einsparung berücksichtigten Paarungen aufgeführt. Bei jeder Paarung ist der aktuelle Dieselmehrverbrauch pro Jahr aufgeführt, welcher durch die durch die Umrüstung der Fahrzeuge auf die Dampfspeichertechnologie eingespart werden könnte. Aufgrund dieser Dieselmehrmenge wurde nachfolgend die einsparbare CO<sub>2</sub>-Menge berechnet (vgl. Tab. 2).



Tabelle 2: Berechnung des CO2-Einsparpotentials aufgrund konkreter Anwendungen

↓ Fahrzeuge (Abnehmer)		Dampfproduzent <sup>9</sup>	Dieserverbrauch pro Jahr [l]	CO2-Einsparung pro Jahr [kg] <sup>10</sup>	
Busse <sup>11</sup>	Luzern / vbl	REAL Entsorgung	1'916'200	3'554'500	
	Aarau / AAR bus+bahn	KVA Buchs AG	794'500	1'473'800	
	Zürich / VBZ	Fernwärme Zürich AG	3'341'600	6'198'700	
	Basel / BVB	Industrielle Werke Basel	2'290'100	4'248'100	
	Lausanne / tl	TRIDEL SA	1'659'100	3'077'700	
	Winterthur / Stadtbus Winterthur	Stadtwerke Winterthur	1'238'500	2'297'400	
	St. Gallen / VBSG	Kehrlichtheizkraftwerk St. Gallen	1'051'600	1'950'700	
	Bern / BERNMOBIL	Energie Wasser Bern	1'168'400	2'167'400	
Zwischentotal Busse =			24'968'300		
Rangierlokomotiven	SBB Rangierbetriebe:				
	Aarau	KVA Buchs AG	7'617'300 <sup>12</sup>	14'130'200	
	Bern	Energie Wasser Bern			
	Biel	Müve Biel-Seeland AG			
	Thun	AVAG Thun			
	Basel	Industrielle Werke Basel			
	Ziegelbrücke	KVA Linthgebiet			
	La Chaux-de-Fonds	Vadec SA			
	Solothurn	KEBAG, Kehrlichtbeseitigungs AG			
	Buchs SG	Verein für Abfallentsorgung, VfA			
	St. Gallen	Entsorgung St. Gallen			
	Lausanne	TRIDEL SA			
	Brig	Gemeindeverband Oberwallis für die Abfallbewirtschaftung			
	Spreitenbach (Zürich)	Limeco			
	Winterthur	Stadtwerke Winterthur			
	Zürich	Fernwärme Zürich AG			
	Private Werkareale:				
	MIGROS Suhr	KVA Buchs AG	20'400	37'800	
	EMS-Chemie AG	Axpo Tegra AG	30'000	55'700	
Zementwerk Untervaz Holcim	GEVAG Untervaz	40'000	74'200		
Zwischentotal Rangierlokomotiven =			14'297'800		
Fähren	Zürichsee-Fähre Horgen-Meilen	Zweckverband für Abfallverwertung (KVA Horgen)	1'500'000	2'782'500	
	Zwischentotal Fähren =			2'782'500	
Total der CO2-Einsparung pro Jahr [kg] ≈				42'000'000	

<sup>9</sup> Bis auf die Axpo Tegra AG sind alle aufgeführten Dampfproduzenten Kehrlichtverbrennungsanlagen. Die Axpo Tegra AG in Ems betreibt ein Biomassekraftwerk.

<sup>10</sup> Bei den Berechnungen der CO2-Einsparungen in diesem Kapitel wurde mit 2.65kg CO2 pro Liter Diesel gerechnet. Weiter wird nur 70% des CO2-Ausstosses als Einsparung ausgewiesen, weil die Dampfproduktion aktuell nicht vollständig CO2-neutral ist (vergleiche Kap. „Identifizierung potentieller Dampflieferanten“).

<sup>11</sup> Unter „Busse“ wird die Substitution von Autobussen (mit Dieselantrieb) durch Busse mit Dampftrieb verstanden. Die Substitution von Trolleybussen ist ausgeschlossen, weil diese vielerorts bereits mit CO2-neutral produziertem Strom betrieben werden.

<sup>12</sup> Aufgrund der Datenlage konnten der Dieserverbrauch der jeweiligen Rangierbahnhöfe der SBB nicht gesondert aufgeführt werden.



# Marktperspektive

Aufgrund des CO<sub>2</sub>-Einsparpotentials der Anwendungen „Busse“ und „Fahren“ wurden diese im Rahmen der zweiten Projektphase (vgl. Abb.1) genauer analysiert. Unter Hilfenahme von Experteninterviews mit Entscheidungsträgern<sup>13</sup> in Bus- und Fährbetrieben, wurden pro Anwendung folgende Informationen erhoben:

1. Aktuelle Situation (bez. Antriebssystemen)
2. Zukünftige Antriebslösungen (Konkurrenztechnologien)
3. Anforderungen an Dampfspeicherantrieb („Lastenheft“)
4. Stolpersteine (für den Einsatz der Dampfspeichertechnologie)
5. Fazit (positive und negative Aspekte für den Einsatz der Dampfspeichertechnologie)

Diese Informationen sind in den folgenden zwei Unterkapiteln zusammenfassend dargestellt.

Die Fakten rund um die Anwendung „Rangierlokomotive“ wurde gesondert mit der Unterstützung des Projektpartners „Dampflokotiv- und Maschinenfabrik DLM AG“ ausgearbeitet. Wie bereits zu Beginn des Projektes festgehalten wurde (vgl. Tab. 1, S.8), verfügt diese Anwendung einerseits über ein grosses Potential bez. CO<sub>2</sub>-Einsparung und kann andererseits aufgrund des vorhandenen Knowhows im Bereich der Dampfspeicherlokomotiven rasch umgesetzt werden. Aufgrund dessen wird dieser Anwendung ein gesamtes Kapitel (vgl. S.16) gewidmet. Dieses Kapitel stellt einen Auszug aus dem technischen Bericht dar, welcher vollumfänglich im Anhang A ersichtlich ist.

Im dritten Unterkapitel „Marktgrössen & Proof of Concept“ (S.14) wird festgehalten, wie zusammenfassend das aktuelle Marktpotential der Dampfspeicherfahrzeuge zu beurteilen ist und mit welcher Massnahme dieses positiv beeinflusst werden kann.

## Anwendung „Busse“

### 1. Aktuelle Situation:

- Busbetreiber suchen nach Möglichkeiten zur CO<sub>2</sub>-Einsparung; prüfen Möglichkeiten um den Anteil an Dieselnissen in ihrer Flotte zu senken (auch aufgrund Lärmemission)
- Dieselnistromaggregate werden bei Trolleybussen durch Batteriepakete ersetzt
- Oberleitungsnetz zurückbauen → Gründe: hohe Unterhaltskosten und stark ansteigende Kosten für den Ausbau
- Lebensdauer der aktuellen Motoren: 10-12 J
- Treibstoffverbrauch der Dieselnisse (im Mittel): 45l/100km

### 2. Zukünftige Antriebslösungen (Konkurrenztechnologien):

- Grundsatz: Einsatz von Elektromotoren
- Energieversorgung der Motoren über neuartige Speicher mit grosser Speicherkapazität und kurzer Ladezeit:
  - Superkondensatoren (sog. Supercaps)
  - Kombination von Superkondensatoren mit Batteriepaket

---

<sup>13</sup> Die Entscheidungsträger möchten im öffentlichen Bericht nicht namentlich erwähnt werden.



### 3. Anforderungen an Dampfspeicherantrieb („Lastenheft“):

- 1. Priorität: Gewährleistung der Fahrplansicherheit (keine technisch bedingte Wartezeiten!)
- Betriebstauglichkeit; insb. bei Störfällen im Verkehrs- und Liniennetz (Verspätungen, Unfälle, Staus, Baustellen, Umleitungen, ...)
- Vergleichbare Fahreigenschaften wie mit Diesel-/Elektroantrieb (insb. Beschleunigungsverhalten)
- Keine Veränderung der „Silhouette“ des Busses

### 4. Stolpersteine (aus der Perspektive der Entscheidungsträger):

- Kein Dampfnetz vorhanden (im Gegensatz zum Stromnetz); würde hohe Investitionen nach sich ziehen
- Verschiedene Antriebssysteme in der Flotte erhöhen den Aufwand für den Unterhalt
- Keine durch das BAV abgenommenen Fahrzeuge mit Dampfspeicherantrieb, würde langwierigen Prozess nach sich ziehen
- Keine modernen Referenzfahrzeuge mit Dampfantrieb → zu grosses Risiko!

### 5. Fazit:

#### Pro

- Busbetreiber suchen/brauchen Lösungen zur CO<sub>2</sub>-Einsparung
- Sind offen gegenüber „neuen“ Lösungen
- Dampfantrieb hat ähnliche Eigenschaften wie Elektroantrieb (leise, emissionsarm, wartungsarm)
- Sicherheit der Dampfspeicher bei allfälligen Beschädigungen

#### Contra

- Starke Konkurrenztechnologien, welche intensiv getestet werden (insb. Supercaps)
- Busbetreiber sind fokussiert auf Elektroantrieb in Kombination mit neuen Speicher- und Ladetechnologien
- Volumen für Dampfspeicher sehr begrenzt<sup>14</sup>
- **Kein «Proof of Concept» vorhanden** (keine modernen Dampffahrzeuge)



ohne Proof of Concept sehr geringe Marktchancen

## Anwendung „Fähren“

### 1. Aktuelle Situation:

- Aktuell werden Fähren mit Dieselmotoren betrieben
  - Pro Fähre gibt es oftmals zwei Motoren (für jede Fahrtrichtung)
  - Kosten pro Motor ca. 200'000 CHF
  - Lebensdauer: 4-5 Jahre
- Es bestehen aktuell keine Mineralölsteuern für Fährbetriebe, würde dieser Steuerregelung geändert, würde dies zu einer extremen Erhöhung der Betriebskosten führen → Risiko bez. Betriebskostenentwicklung

<sup>14</sup> Für diesen Negativpunkt wurde im Rahmen dieses Projektes bereits nach eine Lösung gesucht (siehe technischer Bericht, Anhang A, S.27, Kapitel „Busse, Cars und Lastwagen“)



## 2. Zukünftige Antriebslösungen (Konkurrenztechnologien):

- Einsatz von Elektromotoren
- Energieversorgung der Motoren über neuartige Speicher mit grosser Speicherkapazität und kurzer Ladezeit:
  - Superkondensatoren (sog. Supercaps)
  - Kombination von Superkondensatoren mit Batteriepaket

## 3. Anforderungen an Dampfspeicherantrieb („Lastenheft“):

- 1. Priorität: Gewährleistung der Fahrplansicherheit
- Betriebstauglichkeit (insb. bei schlechten Witterungsverhältnissen → Längere Überfahrt)
- Analoge Bedienung wie im aktuellen Betrieb
- Kompatibilität mit aktuellem Antriebsstrang (Getriebe und Antrieb)
- Die Dauer für den Aus-/Einlade-Vorgang der Fähre ist strikt limitiert. In dieser Zeit muss die Fähre mit Dampf betankt werden können
- Die Betankung muss automatisch erfolgen (die Fährenbesatzung ist beim Ein-/ Ausladevorgang voll ausgelastet)

## 4. Stolpersteine (aus der Perspektive der Entscheidungsträger):

- Die Kosten für die Revaporisierung eines Schiffes sind sehr schwer zu kalkulieren
- Keine modernen Referenzfahrzeuge mit Dampfantrieb → zu grosses Risiko!

## 5. Fazit:

### Pro

- Fährenbetreiber suchen nach Alternativen zum Dieselantrieb (aufgrund Risiko der Dieselpreisentwicklung)
- Sind offen gegenüber „neuen“ Lösungen
- Dampfantrieb hat ähnliche Eigenschaften wie Elektroantrieb (leise, emissionsarm, wartungsarm)
- Bei Unfällen treten keine Stoffe (wie z.B. Dieselöl) aus, welche das Wasser verschmutzen

### Contra

- Starke Konkurrenztechnologien (insb. Supercaps)
- Betankung müsste automatisch erfolgen → noch keine technische Lösung vorhanden
- **Kein «Proof of Concept»** (insb. keine modernen Dampfschiffe)



ohne Proof of Concept sehr geringe Marktchancen



## Marktgrößen & Proof of Concept

Ein Projektziel bestand darin, Marktgrößen für die Dampfspeicherfahrzeuge, bzw. die Anwendungen welche mit Dampfspeicherantrieb ausgestattet werden könnten, zu erheben. Als Marktkapazität können alle Anwendungen angesehen werden, welche in der ersten Projektphase für den Einsatz mit Dampfspeicherantrieb identifiziert wurden (vgl. Tab.1 und Abb.5).

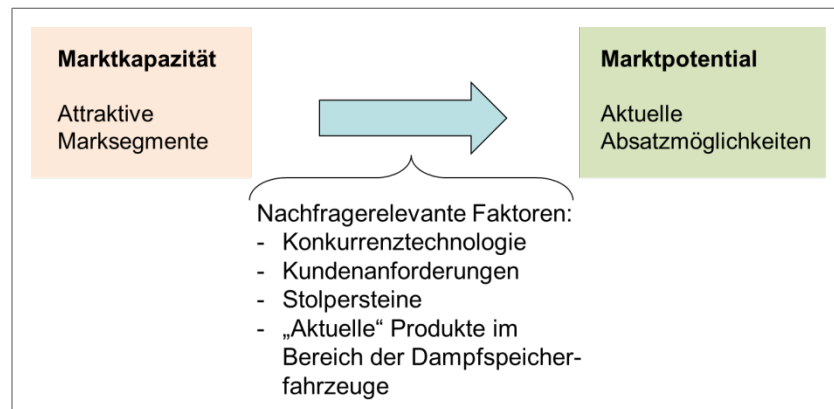


Abbildung 4: Marktgrößen

Aufgrund der Erfahrungen aus diesem Projekt bezüglich nachfragerrelevanter Faktoren für den Einsatz von Dampfspeicherfahrzeugen wird jedoch davon abgesehen, aktuell Marktpotential auszuweisen. Die Gründe hierzu sind folgende:

- Die Dampfspeichertechnologie wird in der Wahrnehmung potentieller Kunden nicht mit attraktiven Betriebs- und Energiekosten in Verbindung gebracht. Der Dampftrieb gilt (fälschlicherweise) als „nostalgische“ Antriebsart, welche sich für Touristenattraktionen eignet, jedoch nicht für den „richtigen“ Einsatz.
- Aktuell bestehen keine modernen Dampfspeicherfahrzeuge, welche bezüglich der Optik sowie der Bedienelemente mit den aktuellen Konkurrenzprodukten vergleichbar sind.
- In der Schweiz sind aktuell keine Dampfspeicherfahrzeuge in Betrieb, anhand derer der kostengünstige sowie CO<sub>2</sub>-sparende Betrieb dieser Fahrzeuge aufgezeigt werden könnte.

Damit die Dampfspeichertechnologie im Markt Fuss fassen kann, müssen aktuell vorherrschende Vorurteile wie „nicht wirtschaftlich“, „nur für Freizeitwendungen“, „antiquierte Technik“ usw., abgebaut werden. Dazu soll im Sinne eines „Proof of Concept“ ein Pilotbetrieb eingerichtet werden. Damit soll der betriebswirtschaftlich vorteilhafte sowie technisch unkomplizierte Betrieb aufgezeigt werden, wodurch das Marktpotential für Dampfspeicherfahrzeuge eröffnet werden soll.





Abbildung 5: Proof of Concept zur Eröffnung des Marktpotentials für Dampfspeicherfahrzeuge

Im Rahmen dieses Projektes wurde bereits nach potentiellen Orten für einen Pilotbetrieb gesucht und vor Ort Abklärungen getroffen. Favorisiert wird der Einsatz einer Rangierlokomotive auf dem Migros-Areal in Suhr. Dort besteht ein Ferndampfnetz mit idealen Dampfparametern (22 bar/280°C) für den Dampfspeicherbetrieb. Weiter verlaufen dort oberirdische Dampfleitungen parallel zu den Gleisen (vgl. Abb.6 rote Markierung). Dort könnte mit verhältnismässig kleinem Aufwand eine „Dampftankstelle“ installiert werden.

Betreiber des Dampfnetzes ist die Fernwärme Wynenfeld AG. Gespeist wird das Netz von der KVA Buchs. Mit den Verantwortlichen seitens Dampfproduktion wurde bereits Kontakt aufgenommen. Das Interesse an der Umsetzung des Pilotbetriebs eines Dampfspeicherfahrzeuges ist vorhanden.

Auch der potentielle Einsatzort, d.h. die Migros-Verteilzentrale, wurde bereits im Rahmen dieses Projektes besucht. Im technischen Bericht befinden sich Angaben zum Schienennetz sowie zum Rangierbetrieb (vgl. technischer Bericht, Anhang A, S.36).

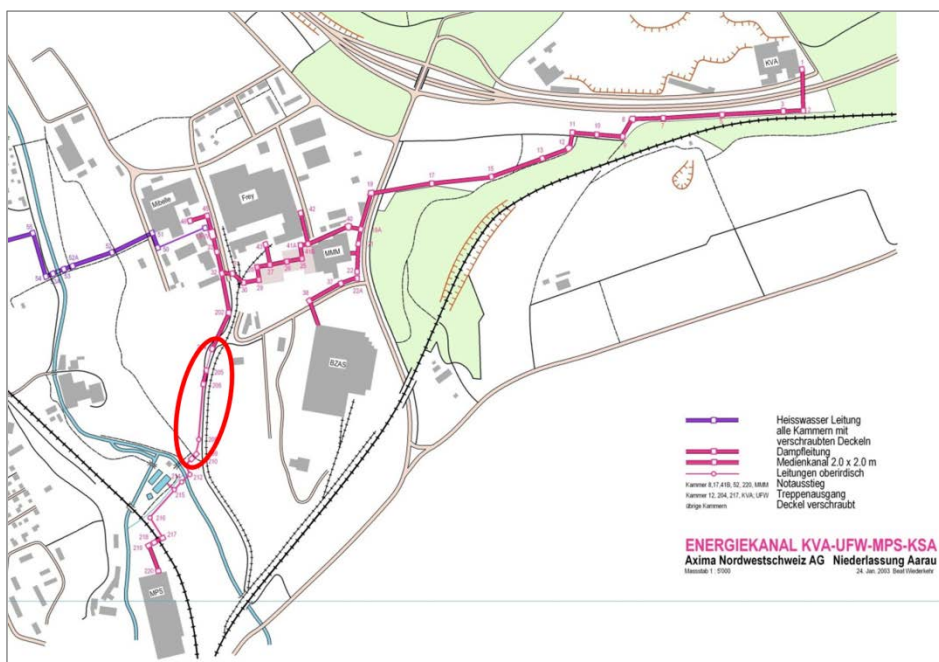


Abbildung 6: Ferndampfnetz in Suhr der Fernwärme Wynenfeld AG  
(Quelle: [www.kva-buchs.ch/de/fewag/Fernwaermenetz.php](http://www.kva-buchs.ch/de/fewag/Fernwaermenetz.php))



## Lokomotiven für den Rangier- und Werkverkehr

Weltweit werden im Rangierdienst der Eisenbahnen Diesellokomotiven eingesetzt, weil die meisten Rangierbahnhöfe und Industrieareale aus Kosten- und Sicherheitsgründen keine Fahrleitungen haben. Weil die Dieselmotoren bei niederen Drehzahlen zu wenig Drehmoment entwickeln, benötigen sie entweder eine elektrische (Generator/Motor) oder eine hydraulische (hydrostatische oder hydrodynamische) Kupplung. Erfahrungsgemäss laufen die Motoren von Diesel-Rangierlokomotiven zu 75% der Betriebszeit im Leerlauf und emittieren unnötig Abgase und Lärm. Durch ihre Komplexität sind Diesellokomotiven teuer in der Anschaffung und im Unterhalt. Nicht zuletzt stellen die vielen Diesellokomotiven eine grosse Belastung für die Umwelt dar. Diesellokomotiven benötigen teures Dieselöl als Treibstoff.

Die bewährte, aber in Vergessenheit geratene Speichertechnik könnte in nützlicher Frist eine Alternative im Werk- und Nahverkehr bieten. Bei der Speichertechnik wird die Fähigkeit von Wasser genutzt, grosse Energiemengen zu speichern. Heisswasserspeicher kennt man als Elektroboiler im Haushalt. Im Werkverkehr waren und sind die feuerlosen Dampflokomotiven (Speicherlokomotiven) ab etwa 1880 bis heute im Einsatz. Auch bei Trambahnen wurden Speicherlokomotiven erfolgreich eingesetzt. Allein in Deutschland wurden rund 3500 Speicherlokomotiven gebaut. Als die Eisenbahnen mit dem Traktionswandel vom Dampf- auf den angeblich wirtschaftlicheren Diesel- und Elektrobetrieb umstellten, wurde auch die Produktion von Speicherlokomotiven eingestellt.

Die Zeiten ändern sich und im Rückblick wird manche Entwicklung anders beurteilt. Zeitgleich mit dem Traktionswandel der Bahnen fand eine ebenfalls von den USA ausgehende Kampagne gegen die „veralteten“ Strassenbahnen statt. Autos und Busse galten fortan als „modern“ und „dynamisch“ und in der Folge wurden in vielen Städten gut funktionierende Tramnetze durch Busse ersetzt, die später im zunehmenden Autoverkehr stecken blieben. Seit einigen Jahren feiert das Tram eine Renaissance. Mit grossem finanziellem Aufwand werden Tramlinien neu gebaut, die einige Jahrzehnte früher zerstört worden sind.

Auch die Speichertechnik wird zu Unrecht als „veraltet“ klassiert. Die nachfolgenden Kapitel sollen das Potential dieser Technik bei unvoreingenommener Betrachtung und unter Berücksichtigung der heutigen technischen Möglichkeiten abklären, speziell im Transport.

### Prinzip

Die Dampfspeichertechnik nützt die **Fähigkeit des Wassers** aus, unter Druck **grosse Energiemengen** zu **speichern**. Dabei wird der grösste Teil der Energie nicht im Dampf, sondern im Heisswasser gespeichert. Dampfspeicher werden deshalb auch als Heisswasserspeicher bezeichnet. Meistens wird aber der Dampf genutzt, um Arbeit zu verrichten, sodass der Begriff Dampfspeicher zutreffender ist.



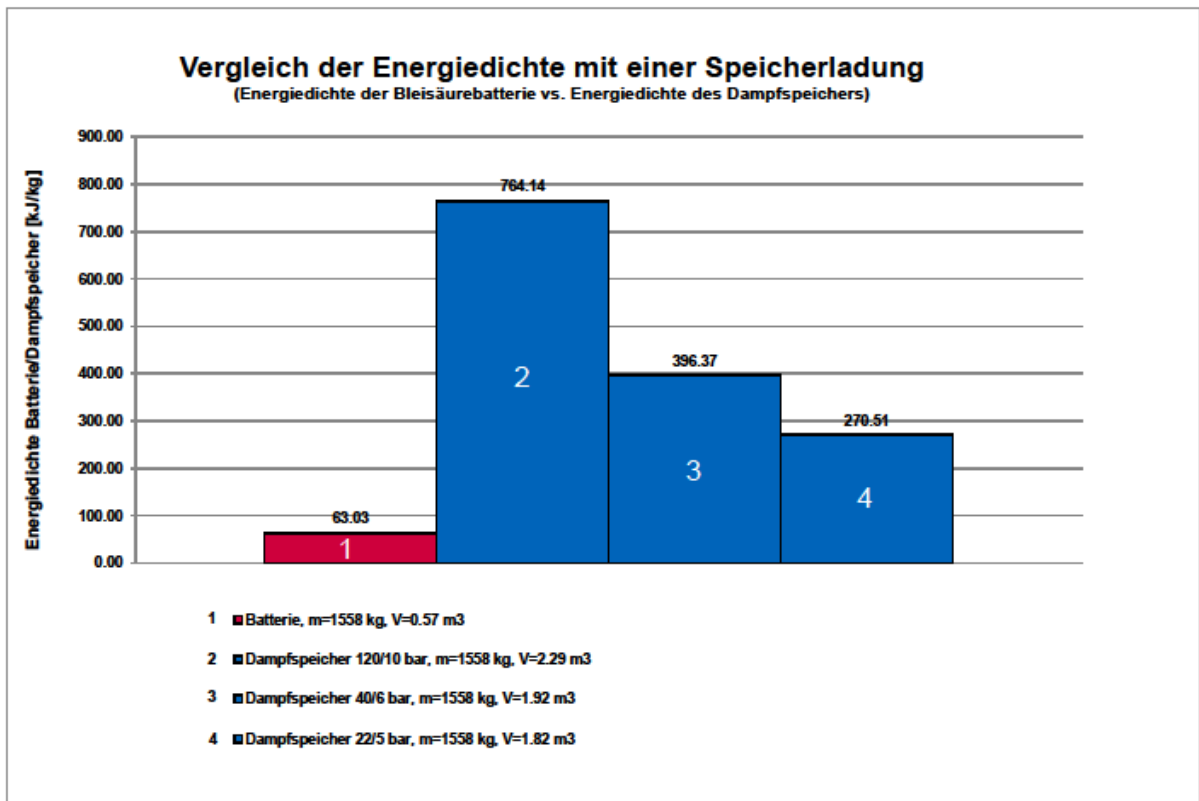


Abbildung 7: Vergleich der nutzbaren Energie einer Bleibatterie mit jener von Heisswasserspeichern bei gleichem Gewicht. Grafik: Martin Schneider ZHAW

Die obenstehende Grafik illustriert die grosse Speicherkapazität anschaulich. Zwar gäbe es leistungsfähigere elektrische Batterien, z.B. Lithium-Ionen, jedoch nicht für diese Grössen und Kapazitäten. Zudem ist Wasser billig! Die Speicherbehälter sind praktisch wartungsfrei und haben eine ungleich längere Lebensdauer als Batterien.

## Eigenheiten des Rangier- und Werkverkehrs

**Der Rangier- und Werksverkehr unterscheidet sich grundsätzlich vom übrigen Zugsbetrieb, weshalb es bei der Eisenbahn spezielle Rangierlokomotiven gibt.** Von der früheren Gepflogenheit, auch alte Streckenlokomotiven gegen Ende der Lebensdauer im Rangierdienst einzusetzen, ist man weitgehend abgekommen.

### Charakteristik des Rangierbetriebs

Der Betrieb in Rangierbahnhöfen und im Werkverkehr ist wie folgt geprägt:

- Intermittierende Aktivitäten
- Lange Warte- und Stillstandzeiten
- Extreme Lastwechsel
- Häufiges anfahren mit hoher Beschleunigung
- Häufiges ausrollen lassen
- Häufiges verzögern und abbremsen in den Stillstand
- Häufige Leerfahrten mit der Lok allein
- Häufiges wechseln der Fahrtrichtung
- Niedrige Geschwindigkeiten
- Vergleichsweise geringe Fahrleistungen



## Anforderungen an Rangierfahrzeuge

Aus den oben genannten Eigenheiten des Rangierbetriebs ergeben sich die folgenden Anforderungen an Rangierfahrzeuge:

- maximales Drehmoment beim anfahren
- grosse Zugkraft (Leistung ist weniger wichtig als bei Streckenlokomotiven)
- gutes Beschleunigungsvermögen
- gutes Bremsvermögen
- schnelle Fahrtrichtungswechsel
- robuste Bauweise
- einfache Bedienung
- niedrige Dauergeschwindigkeit (bei Diesel-hydraulischen Lokomotiven besteht die Gefahr der Überhitzung des Wandleröls)

## Energieverbrauch und Wirkungsgrad

Auf dem Prüfstand und bei konstanter Last haben die Dieselmotoren einen sehr guten thermischen Wirkungsgrad. Die Annahme, dass dies im Rangierbetrieb genauso sei, ist nicht korrekt. Der intermittierende Betrieb mit den häufigen Lastwechseln und den langen Stillstandzeiten mit 75% Leerlaufanteil, führt zu erheblich schlechteren Werten. **Beim Entladen von Wagen mit Schuttgütern sinkt der Wirkungsgrad unter 2%!**

Im Transport hat der Wirkungsgrad allgemein wenig Aussagekraft. Massgebend ist der Verbrauch pro Tonnenkilometer oder pro Rangierstunde. Im Strassenverkehr spricht auch niemand vom Wirkungsgrad, sondern vom gemessenen Verbrauch in Abhängigkeit der Fahrleistung, üblicherweise in l/100km.

## Bauart und Ausrüstung von Rangierlokomotiven

Unabhängig von der Art des Antriebs (Dampf, Diesel oder elektrisch) unterscheiden sich die Rangierlokomotiven in der Bauart und in der Ausrüstung von jenen der Streckenlokomotiven.

Beim **Fahrwerk** unterscheidet man zwischen Rahmen- und Drehgestellbauart. Bei **Rahmenlokomotiven** gibt es 2- bis 5-achsige Ausführungen. Heute sind aber nur noch 2- oder 3-achsige Rahmenlokomotiven üblich. Sind mehr als drei Triebachsen notwendig, werden **Drehgestelllokomotiven** mit zwei 2- oder 3-achsigen Drehgestellen bevorzugt.

Rangierlokomotiven haben grundsätzlich nur einen **Führerstand**, der je nach Bauart mittig oder einseitig angeordnet ist. Üblicherweise sind die Führerstände für beidseitige Bedienung eingerichtet, oft sogar je für beide Fahrtrichtungen (ergibt vier Bedienpulte).

## Speicherlokomotiven

Speicherlokomotiven werden auch als **feuerlose Lokomotiven** bezeichnet, weil die **Dampferzeugung extern** in einer **stationären Anlage** erfolgt. Die Speicherlokomotiven werden dort eingesetzt, wo stationäre Kessel oder Wärmetauscher vorhanden sind, also in Kraftwerken, Brauereien, Papierfabriken, Raffinerien, Stahlwerken und in der chemischen Industrie. In letzteren kommt zudem der Vorteil zum Tragen, dass feuerlose Lokomotiven **explosions-**



**geschützt** sind, während der Explosionsschutz bei Diesellokomotiven umfangreicher Massnahmen bedarf.

Dampfspeicherlokomotiven sind **einfach** gebaut und daher **kostengünstig** in der Anschaffung und im Unterhalt. Sie sind sehr **umweltfreundlich**, da sie nur Abdampf emittieren und auch bei Höchstleistung **leise** arbeiten (im Gegensatz zu den gefeuerten Dampflokomotiven brauchen sie keinen Saugzug). Wird der Abdampf kondensiert, ist das Fahrzeug vollkommen emissionsfrei, als einziges "Abfallprodukt" entsteht warmes Wasser.

Speicherlokomotiven erfordern keinen Heizer und werden im Einmann-Betrieb gefahren. Sie sind einfach zu bedienen.

Ein wesentlicher Vorteil der Speicherlokomotiven ist, dass sie nur Energie verbrauchen, wenn sie Leistung abgeben. Dies im Gegensatz zu Diesellokomotiven, deren Motor ständig läuft. Messungen des ORE (Forschungs- und Versuchsamts des Internationalen Eisenbahnverbandes) und des US Department of Energy zufolge betragen die Leerlaufzeiten von Diesellokomotiven im Rangierbetrieb satte 75%! Der Energiespeicher lässt **fast unbegrenzte Leistungen** zu, da die Dampfentnahmemenge nicht begrenzt ist. Deshalb kann den Zylindern kurzzeitig beliebig viel Dampf zugeführt werden.

Nach dem **zulässigen Druck im Speicher** wird unterschieden zwischen:

- **Niederdruckspeicherlokomotiven:** 8 bis 20 bar Ladedruck
- **Hochdruckspeicherlokomotiven:** 40 bis 140 bar Ladedruck

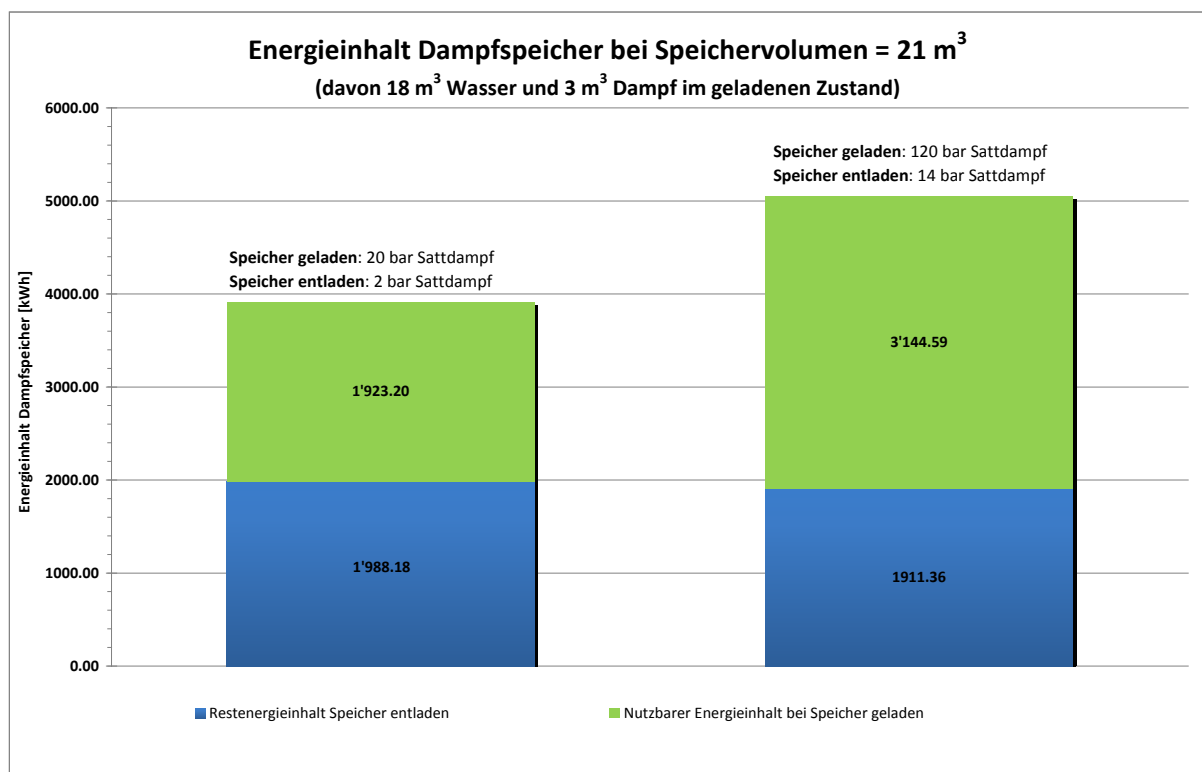


Abbildung 8: Vergleich der Speicherkapazität von Niederdruck- und Hochdruckspeicherlokomotiven am Beispiel einer dreiaxsignen Rangierlokomotive.



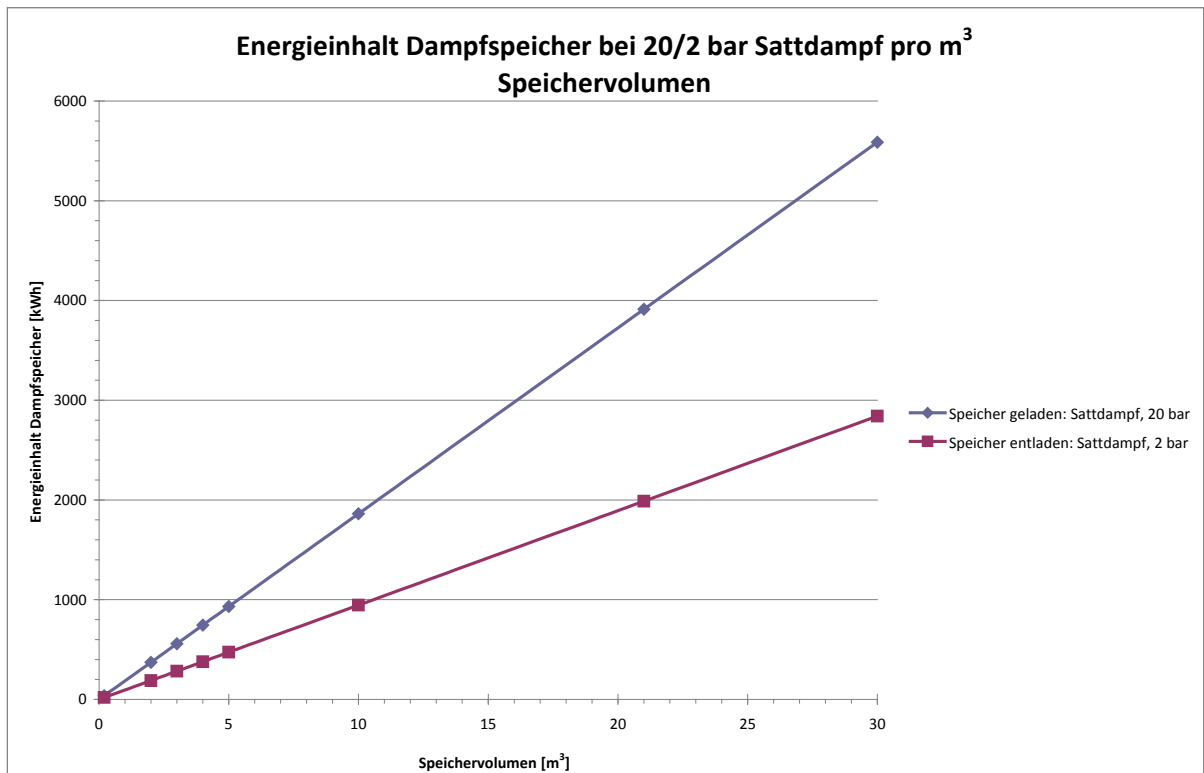


Abbildung 9: Nutzbarer Energieinhalt von Niederdruckspeichern. Grafik: Martin Schneider ZHAW

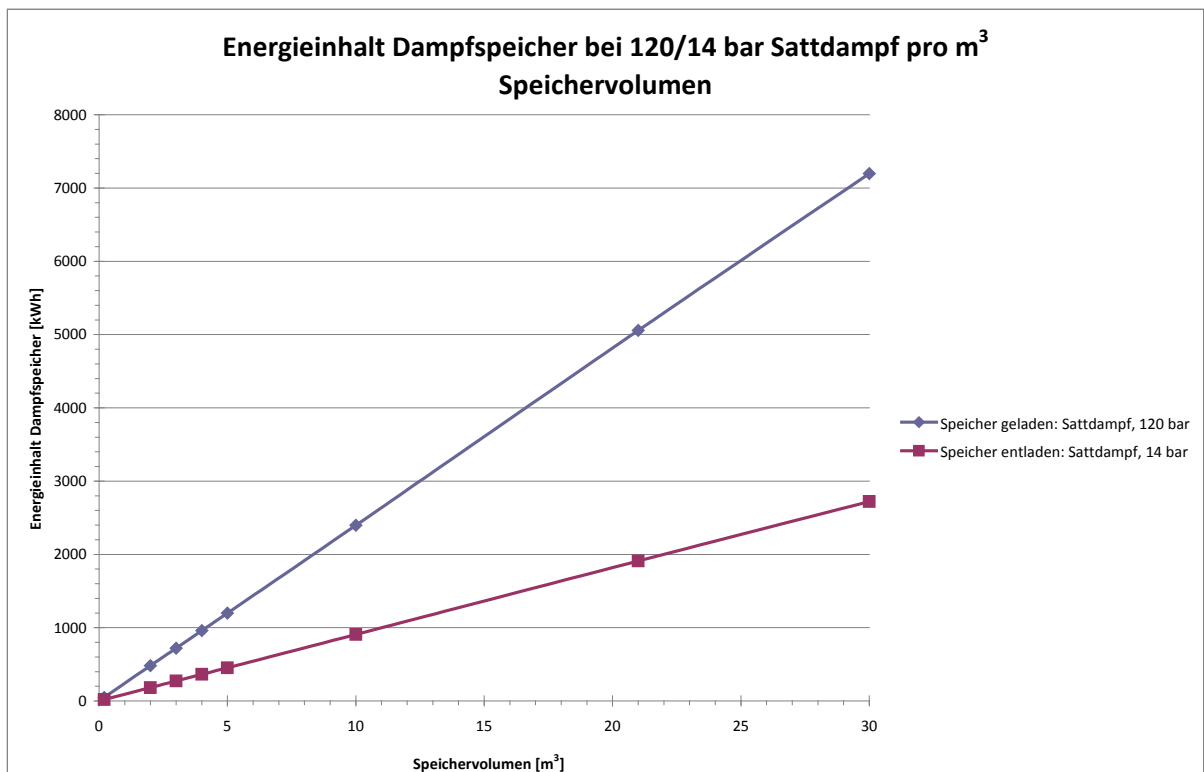


Abbildung 10: Nutzbarer Energieinhalt von Hochdruckspeichern. Grafik: Martin Schneider ZHAW



## Diesellokomotiven

Nahezu alle heute eingesetzten Rangierlokomotiven sind Diesellokomotiven. Dies obwohl der Drehmomentverlauf von Verbrennungsmotoren für Rangierzwecke denkbar ungünstig ist. Verbrennungsmotoren lassen sich unter Last nicht starten und benötigen deshalb zur Kraftübertragung Kupplungen. Mechanische Kupplungen, wie sie bei Strassenfahrzeugen gebräuchlich sind, kommen bei Lokomotiven wegen der grossen zu übertragenden Kräfte nicht in Frage. Bei Rangierlokomotiven sind folgende Systeme gebräuchlich:

**Hydrostatische** Kupplungen, bestehend aus Hydraulikpumpe und Hydraulikmotor(en)

**Hydrodynamische** Kupplungen, bestehend aus einem Wandler (Flüssigkeitsgetriebe)

**Elektrische** Übertragung, bestehend aus Generator und Elektromotor(en)

## Elektrische Rangierlokomotiven

Aus Kosten- und Sicherheitsgründen sind international nur wenige Industrieareale und Rangierbahnhöfe elektrifiziert. Entsprechend gering ist die Verbreitung der elektrischen Rangierlokomotiven. Wegen der kleinen Stückzahlen sind die Beschaffungskosten höher als bei vergleichbaren Diesellokomotiven, sodass die Diesellokomotiven selbst dann vorgezogen werden, wenn sie ausschliesslich unter der Fahrleitung verkehren.

Die Schweiz bildet insofern eine Ausnahme, als noch etliche Anschlussgleise und Rangierbahnhöfe elektrifiziert sind. Deren Zahl nimmt jedoch laufend ab und so reduziert sich auch der Bedarf an elektrischen Rangierlokomotiven.

## Wirtschaftlichkeit

### Energiekosten

Dampf ist einer der kostengünstigsten Energieträger, weil er mit billiger Energie erzeugt werden kann. Deshalb wird er in der Industrieproduktion bevorzugt verwendet. Die Möglichkeit, die Dampfenenergie für die Mobilität zu verwenden, ergibt ein signifikantes Sparpotential, denn sowohl Strom wie Dieselöl sind erheblich teurer:

Dieselöl:	0.18 CHF/kWh
Strom Industrie:	0.16 CHF/kWh
Strom SBB:	0.10 CHF/kWh
Dampf:	0.04 CHF/kWh



## Kostenvergleich verschiedener Rangierlokomotiven

Tabelle 3: Kostenvergleich Dampfspeicher-/Diesel-/Hybridlokomotive

### Kostenvergleich Dampfspeicher-/Diesel-/Hybridlokomotive

gemäss Fahrprofil Suhr

#### Grundlagen

Fahr-km p.a.

Dieserverbrauch in lt. p.a.

Heisswasserverbrauch in t p.a.

Amortisation der Lokomotive p.a.

zusätzliche Infrastrukturkosten inkl. Amortisation

Betriebsdauer Dieselmotor (Jahre)

**Jahreskosten** in CHF

	Kaufpreis	Betriebs- Jahre	Amortisation	Unterhalt	Energie	Infra- struktur	Total p.a.	CO2 in t
<b>Dampf</b>	1'500'000	50	30'000	80'000	31'000	10'000	151'000	0*
<b>Diesel</b>	1'800'000	30	60'000	160'000	45'000		265'000	54
<b>Hybrid</b>	3'000'000	40	75'000	200'000	32'000		307'000	29**

\* bester Fall, bei Dampfzentralen ohne Berücksichtigung  
der Verbrennung von Materialien aus fossilen Quellen

\*\* bei 50% Betrieb mit Hilfsdieselmotor



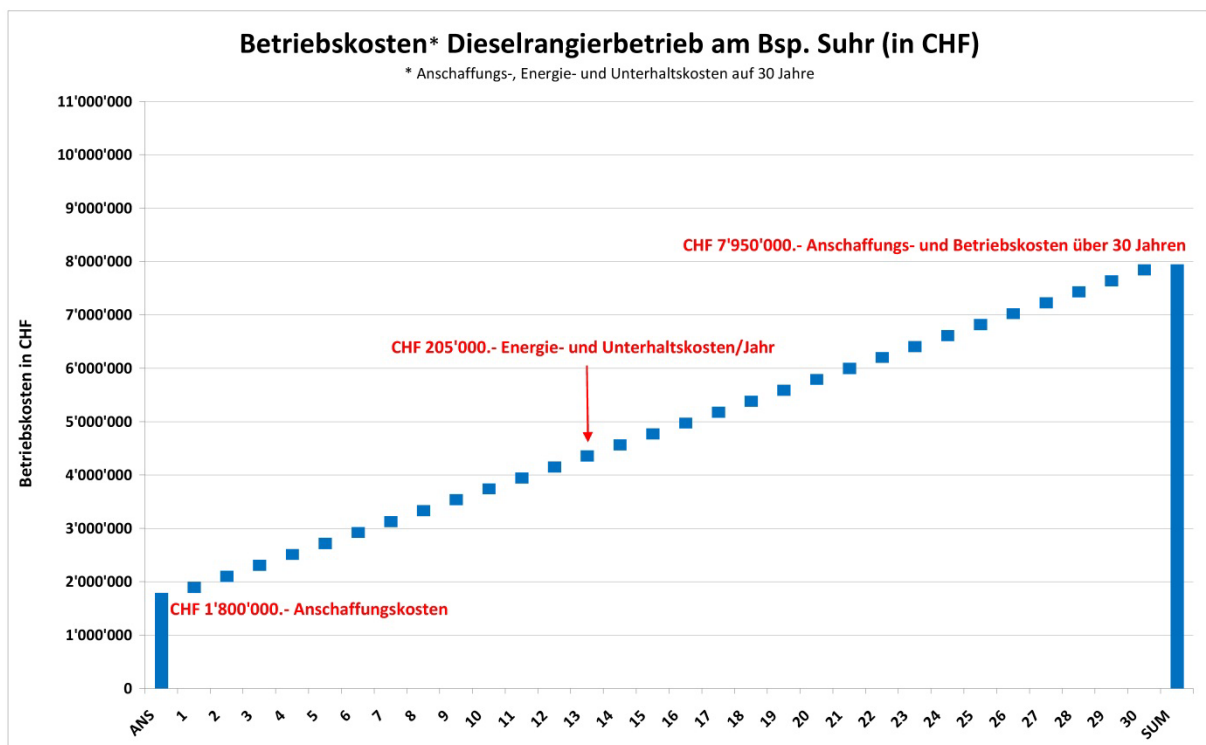


Abbildung 11: Betriebskosten von Diesellokomotiven für den Einsatz bei SBB Cargo in Suhr. Grafik: Martin Schneider, ZHAW

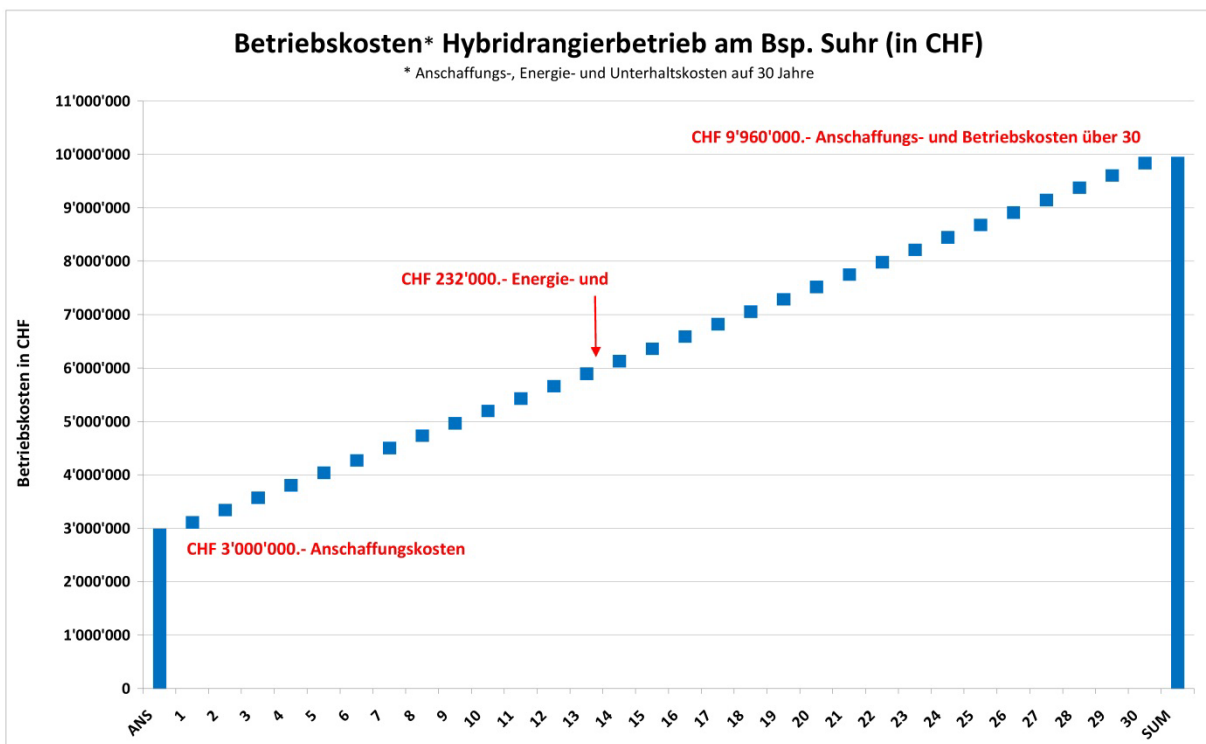


Abbildung 12: Betriebskosten von Hybridlokomotiven für den Einsatz bei SBB Cargo in Suhr. Grafik: Martin Schneider, ZHAW



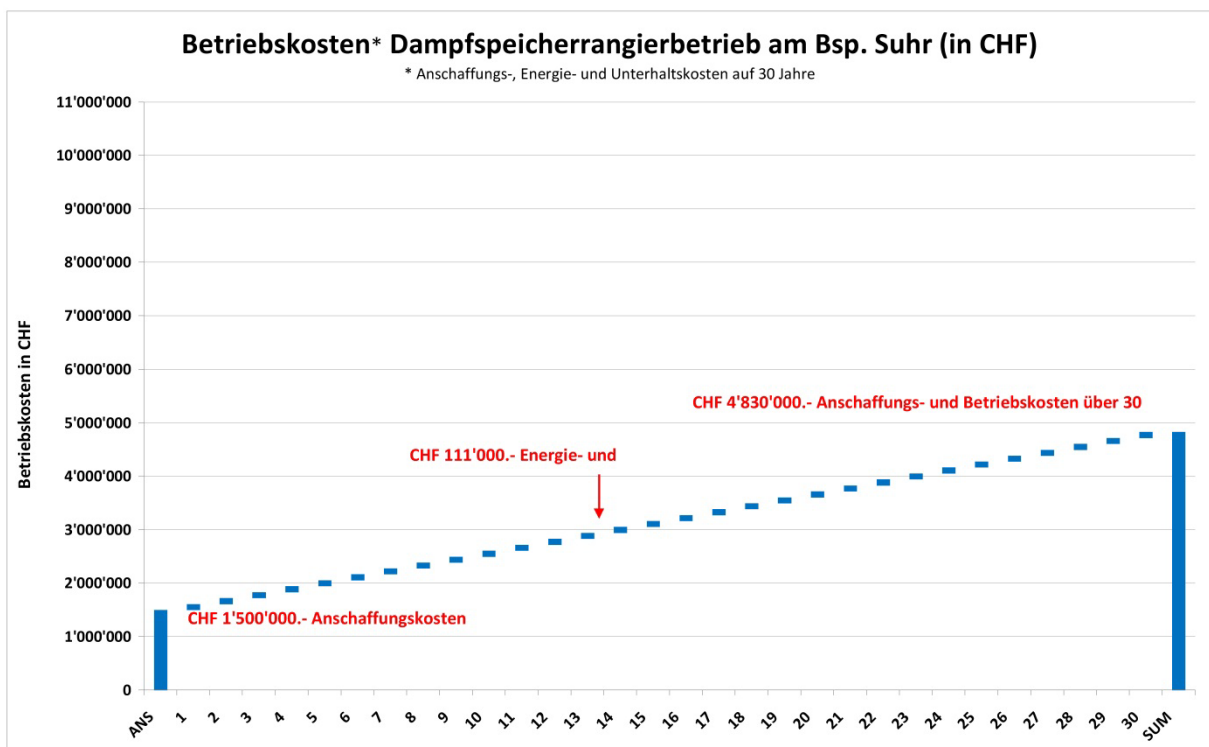


Abbildung 13: Betriebskosten von Speicherlokomotiven für den Einsatz bei SBB Cargo in Suhr. Grafik: Martin Schneider, ZHAW



## Anhang A – Technischer Bericht

Technischer Bericht Nr. D163  
Datum: 21. Mai 2013  
Verfasser: Dipl.-Ing. ETH Roger Waller  
Tel.: +41 52 368 21 01  
Mitarbeit: Ruedi Korrodi FHNW  
Martin Schneider ZHAW  
Auftrag: Bundesamt für Energie BFE  
Stiftung Swiss Excellence



Dampflokotiv- und  
Maschinenfabrik DLM AG

### Dampfspeicherfahrzeuge

Ersatz von Elektro- und Dieselfahrzeugen (Rangierlokomotiven, Pneu-Schleppfahrzeugen) auf Werkarealen durch Dampfspeicherfahrzeuge

#### Verteiler:

- Bundesamt für Energie BFE
- Fachhochschule Nordwestschweiz FHNW
- Stiftung Swiss Excellence
- Zürcher Hochschule Winterthur ZHAW
- Archiv DLM

#### Stichworte:

- Energieeffizienz
- Substitution von Öl im Transport
- Abwärmenutzung
- CO<sub>2</sub>-Reduktion
- Lärminderung





# INHALTSVERZEICHNIS

<b>1. Ausgangslage</b>	<b>4</b>
<b>2. Eigenheiten des Rangier- und Werkverkehrs</b>	<b>5</b>
2.1 Charakteristik des Rangierbetriebs	5
2.2 Anforderungen an Rangierfahrzeuge	5
2.3 Energieverbrauch und Wirkungsgrad	5
<b>3. Stand der Technik bei Rangierfahrzeugen</b>	<b>6</b>
3.1 Klassifizierung	6
3.2 Bauart und Ausrüstung von Rangierlokomotiven	6
3.3 Diesellokomotiven	7
3.4 Zweiwege-Fahrzeuge für Schiene und Strasse	11
3.5 Elektrische Rangierlokomotiven	12
3.6 Zweikraft-Rangierfahrzeuge (Hybrid)	14
<b>4. Dampfspeichertechnik</b>	<b>15</b>
4.1 Prinzip	15
4.2 Speicherlokomotiven	15
4.3 Pneufahrzeuge mit Speichertechnik	24
4.4 Schiffe mit Speichertechnik	29
<b>5. Analyse des Rangier- und Werkverkehrs</b>	<b>31</b>
5.1 EMS Chemie AG	31
5.2 Migros Suhr	36
<b>6. Dampferzeugung</b>	<b>41</b>
6.1 Abwärme	41
6.2 Geothermie	43
6.3 Solarthermie	43
6.4 Windenergie	45
6.5 Kraft-Wärme-Koppelung	46
<b>7. Energiebilanz</b>	<b>48</b>
<b>8. Vergleich der Energiekosten</b>	<b>49</b>
<b>9. Modernisierung der Speicherlokomotiven FLC 03</b>	<b>50</b>
9.1 Stangenlager	50
9.2 Spurkranzschmierung	50
9.3 Führerstand, Rangiertritte und -plattformen	50
9.4 Servo-Bedienung der Steuerung, Funkfernsteuerung	50
9.5 Thermodynamische Verbesserungen	50



<b>10. Neubau von Speicherlokomotiven</b>	<b>52</b>
10.1 Rahmenlokomotiven für den Rangierdienst	52
10.2 Rahmenlokomotiven für den Nahverkehr	53
10.2 Rahmenlokomotiven für den Nahverkehr	54
10.3 Rahmenlokomotiven für den Güter- und Fernverkehr mit Schlepptender	55
10.4 Drehgestell-Lokomotiven für den Rangier- oder Nahverkehr	56
<b>11. Wirtschaftlichkeit</b>	<b>57</b>
11.1 SBB Cargo Suhr	58
<b>Literatur und Quellen</b>	<b>60</b>
<b>Anhang</b>	<b>61</b>
Anhang I: Gleisplan der EMS Chemie AG	61
Anhang II: Protokoll der Rangierleistungen bei der EMS Chemie AG	61
Anhang III: Gleispläne von Suhr	65
Anhang IV: Dampf- und Fernwärmeleitungsnetz von Suhr	66
Anhang V: Protokoll Rangierdienst Migros Suhr, Dienstag, 19. Februar 2013	67



## 1. Ausgangslage

Weltweit werden im Rangierdienst der Eisenbahnen **Diesellokomotiven** eingesetzt, weil die meisten Rangierbahnhöfe und Industrieareale aus Kosten- und Sicherheitsgründen keine Fahrleitungen haben. Weil die Dieselmotoren bei niederen Drehzahlen zu wenig Drehmoment entwickeln, benötigen sie entweder eine elektrische (Generator/Motor) oder eine hydraulische (hydrostatische oder hydrodynamische) Kupplung. Erfahrungsgemäss laufen die Motoren von Diesel-Rangierlokomotiven zu **75% der Betriebszeit im Leerlauf** [1], [2] und emittieren unnötig **Abgase** und **Lärm**. Durch ihre Komplexität sind Diesellokomotiven teuer in der Anschaffung und im Unterhalt. Nicht zuletzt stellen die vielen Diesellokomotiven eine grosse **Belastung für die Umwelt** dar.

Diesellokomotiven benötigen teures **Dieselöl** als Treibstoff. Im Rangier- und Werksverkehr muss der volle Dieselölpreis bezahlt werden, nachdem die Zollbestimmungen vor einigen Jahren geändert wurden (Zollrückerstattung wird nur noch im fahrplanmässigen öffentlichen Verkehr gewährt). An Alternativen wie LNG und CNG wird geforscht, ein Durchbruch ist bisher nicht gelungen. Die Versuche mit Flüssigkohle wurden eingestellt, da die Abrasivität zu hoch war.

Weil Benzin und Dieselöl die höchste Energiedichte haben und praktisch anzuwenden sind, haben sie im Transport ein faktisches Monopol. Es gibt zurzeit keine Alternativen. **Weltweit basieren 99%, in der Schweiz 96% der Transportleistungen auf Öl, eine bedenkliche und für die Weltwirtschaft gefährliche Abhängigkeit.**

Die bewährte, aber in Vergessenheit geratene **Speichertechnik** könnte in nützlicher Frist eine Alternative im Werk- und Nahverkehr bieten. Bei der Speichertechnik wird die Fähigkeit von Wasser genutzt, unter Druck grosse Energiemengen zu speichern. Heisswasserspeicher kennt man als Elektroboiler im Haushalt. Im Werkverkehr waren und sind die feuerlosen Dampflokomotiven (Speicherlokomotiven) ab etwa 1880 bis heute im Einsatz [3]. Auch bei Trambahnen wurden Speicherlokomotiven erfolgreich eingesetzt. Allein in Deutschland wurden rund 3500 Speicherlokomotiven gebaut. Als die Bahnen mit dem Traktionswandel vom Dampf- auf den angeblich wirtschaftlicheren Diesel- und Elektrobetrieb umstellten, wurde auch die Produktion von Speicherlokomotiven eingestellt.

Die Zeiten ändern sich und im Rückblick wird manche Entwicklung anders beurteilt. Zeitgleich mit dem Traktionswandel der Bahnen fand eine ebenfalls von den USA ausgehende Kampagne gegen die „veralteten“ Strassenbahnen statt. Autos und Busse galten fortan als „modern“ und „dynamisch“ und in der Folge wurden in vielen Städten gut funktionierende Tramnetze durch Busse ersetzt, die später im zunehmenden Autoverkehr stecken blieben. Nun erleben die Trambahnen eine Renaissance. Mit grossem finanziellem Aufwand werden Tramlinien neu gebaut, die einige Jahrzehnte früher zerstört worden sind.

Auch die Speichertechnik wird zu Unrecht als „veraltet“ klassiert. Kommt dazu, dass die Dampftechnik nicht nur in der Industrie, sondern auch im Transport laufend weiter entwickelt und somit verbessert wird. In den 90-er Jahren begann die Schweizerische Lokomotiv- und Maschinenfabrik SLM in Winterthur, ab 2000 fortgeführt durch die Dampflokomotiv- und Maschinenfabrik DLM [17], unter dem Begriff **modern steam** wieder mit dem Bau neuer wirtschaftlicher und ökologischer Dampflokomotiven und Schiffsdampfmaschinen. Diese Studie soll das Potential der Speichertechnik bei unvoreingenommener Betrachtung und unter Berücksichtigung der heutigen technischen Möglichkeiten speziell im Transport abklären.



## **2. Eigenheiten des Rangier- und Werkverkehrs**

**Der Rangier- und Werksverkehr unterscheidet sich grundsätzlich vom übrigen Zugsbetrieb, weshalb es bei der Eisenbahn spezielle Rangierlokomotiven gibt.** Von der früheren Gepflogenheit, auch alte Streckenlokomotiven gegen Ende ihrer Lebensdauer im Rangierdienst einzusetzen, ist man weitgehend abgekommen.

### **2.1 Charakteristik des Rangierbetriebs**

Der Betrieb in Rangierbahnhöfen und im Werkverkehr ist wie folgt geprägt:

- Intermittierende Aktivitäten
- Lange Warte- und Stillstandszeiten
- Extreme Lastwechsel
- Häufiges anfahren mit hoher Beschleunigung
- Häufiges ausrollen lassen
- Häufiges verzögern und abbremsen in den Stillstand
- Häufige Leerfahrten mit der Lok allein
- Häufiges wechseln der Fahrtrichtung
- Niedrige Geschwindigkeiten
- Vergleichsweise geringe Fahrleistungen
- Gefährliche Arbeit

Für den Laien ist ein Vergleich mit dem Militärdienst angebracht: warten, rennen, warten, Action, Pause, rennen usw.

### **2.2 Anforderungen an Rangierfahrzeuge**

Aus den oben genannten Eigenheiten des Rangierbetriebs ergeben sich die folgenden Anforderungen an Rangierfahrzeuge:

- maximales Drehmoment beim Anfahren
- grosse Zugkraft (die Leistung ist weniger wichtig als bei Streckenlokomotiven)
- gutes Beschleunigungsvermögen
- gutes Bremsvermögen
- schnelle Fahrtrichtungswechsel
- robuste Bauweise
- einfache Bedienung
- niedrige Dauergeschwindigkeit (bei Diesel-hydraulischen Lokomotiven besteht die Gefahr der Überhitzung des Wandleröls)

### **2.3 Energieverbrauch und Wirkungsgrad**

Auf dem Prüfstand und bei konstanten Lastbedingungen haben die Dieselmotoren einen guten thermischen Wirkungsgrad. Die Annahme, dass dies im Rangierbetrieb genauso sei, ist falsch. Der intermittierende Betrieb mit den häufigen Lastwechseln und den langen Stillstandszeiten mit 75% Leerlaufanteil [1], [2] führt zu erheblich schlechteren Werten.

**Beim entladen von Wagen mit Schuttgütern sinkt der Wirkungsgrad unter 2%!**

Im Transport hat der Wirkungsgrad wenig Aussagekraft. Massgebend ist der Verbrauch pro Tonnenkilometer oder pro Rangierstunde. Im Strassenverkehr spricht auch niemand vom Wirkungsgrad, sondern vom gemessenen Verbrauch in Abhängigkeit der Fahrleistung, üblicherweise in l/100 km. Siehe auch Kapitel 7. Energiebilanz.



### 3. Stand der Technik bei Rangierfahrzeugen

#### 3.1 Klassifizierung

Bei den meisten Eisenbahnen wird zwischen Rangier**lokomotiven** und kleineren Rangier**traktoren** unterschieden. Letztere sind in untergeordneten Diensten im Einsatz und ihre Bedienung kann durch weniger qualifiziertes Personal erfolgen. Die Grenzen sind aber fließend, weshalb nachfolgend auf diese Unterscheidung verzichtet wird.

Eine eigene Kategorie bilden die sogenannten **Zweiwegefahrzeuge**. Das sind meistens handelsübliche Strassen-Dienstfahrzeuge (z.B. Unimog), die mit einer zusätzlichen, ablenkbaren Spurführungseinrichtung schienenengängig gemacht werden. Nebst dem günstigen Preis liegt der Hauptvorteil darin, dass die zu rangierenden Wagen bei Bedarf auf der Strasse umfahren werden können. Zweiwegefahrzeuge werden für gelegentlichen, leichten Rangierdienst verwendet. Bei diesen handelsüblichen, nur wenig angepassten Serienprodukten wäre ein Umbau auf Speichertechnik unverhältnismässig. Zweiwegefahrzeuge werden nachfolgend nur der Vollständigkeit halber erwähnt.

#### 3.2 Bauart und Ausrüstung von Rangierlokomotiven

Unabhängig von der Art des Antriebs (Dampf, Diesel oder elektrisch) unterscheiden sich die Rangierlokomotiven in der Bauart und in der Ausrüstung von jenen der Streckenlokomotiven. Zum besseren Verständnis wird im Folgenden auf einige wichtige Aspekte hingewiesen; ohne Anspruch auf Vollständigkeit.

Beim **Fahrwerk** unterscheidet man zwischen Rahmen- und Drehgestellbauart. Bei **Rahmenlokomotiven** gibt es 2- bis 5-achsige Ausführungen, heute sind aber nur noch 2- oder 3-achsige Rahmenlokomotiven üblich. Sind mehr als drei Triebachsen notwendig, werden **Drehgestelllokomotiven** mit zwei 2- oder 3-achsigen Drehgestellen bevorzugt.

Beim **Antrieb** unterscheidet man zwischen gekuppeltem Antrieb und Einzelachsantrieb. Beim **gekuppeltem Antrieb** sind alle Triebachsen miteinander mechanisch gekuppelt, sei es durch **Kuppelstangen** oder **Kardanwellen in Kombination mit Achsgetrieben**. Beim **Einzelachsantrieb** sind die Achsen wie der Name sagt einzeln angetrieben, zum Beispiel durch Elektromotoren. Einzelachsantriebe sind im Rangierdienst kein Vorteil, da sie eher zum schleudern (durchdrehen der Räder) neigen als gekuppelte Antriebe. **Sander**, **Schleuderschutz** und **Schleuderbremsen** sorgen für Verbesserung.

Rangierlokomotiven haben immer **mechanische Bremsen** und in der Regel zusätzlich eine verschleissfreie, **Betriebsbremse** (elektrisch oder hydraulisch). Die mechanischen Bremsen sind **Druckluftbremsen**:

- die direkt wirkende **Rangierbremse** bremst die Lokomotive allein
- die indirekt wirkende **Zugsbremse** bremst den ganzen Zug

Wenn die Bremszylinder nicht als Federspeicher gebaut sind, gibt es zusätzlich eine **Handbremse**. Der oder die Bremszylinder betätigen die auf die Räder wirkenden **Klotzbremsen** oder die **Scheibenbremsen** einzeln oder über ein Bremsgestänge in Gruppen.

Rangierlokomotiven haben grundsätzlich nur einen **Führerstand**, der je nach Bauart mittig oder einseitig angeordnet ist. Üblicherweise sind die Führerstände für beidseitige Bedienung eingerichtet, oft sogar je für beide Fahrtrichtungen (ergibt vier Bedienpulte!)



Heutige Rangierlokomotiven haben beidseitig **Rangierplattformen**, die dem Rangierpersonal ein gefahrloses Mitfahren ohne Störung des Lokführers und einen bequemen Wechsel der Fahrzeugseiten ermöglichen.

Rangierlokomotiven sind grundsätzlich für den **Einmannbetrieb** zugelassen, dies gilt auch für die Speicherlokomotiven. Zur Einsparung von Rangierpersonal bei kleineren Rangierbetrieben sind neuere Rangierlokomotiven oft mit einer **Funkfernsteuerung** ausgerüstet. Der Lokomotivführer kann die Lokomotive von aussen mittels eines Bauchladens über Joysticks fern bedienen und so die Arbeit des Rangierarbeiters (an- und abkuppeln, Bremsprobe usw.) übernehmen.

Zur Arbeitserleichterung sind einige der Rangierlokomotiven mit einer **automatischen Rangierkupplung** ausgerüstet. Diese erlaubt es, den Zug vom Führerstand aus an- und abzukuppeln.

**Im Folgenden wird aus der Vielzahl der im Fahrzeugmarkt angebotenen Rangierlokomotiven eine für den Stand der Technik repräsentative Auswahl getroffen.**

### **3.3 Diesellokomotiven**

Nahezu alle heute eingesetzten Rangierlokomotiven sind Diesellokomotiven. Dies obwohl der Drehmomentverlauf von Verbrennungsmotoren für Rangierzwecke denkbar ungünstig ist. Verbrennungsmotoren lassen sich unter Last nicht starten und benötigen deshalb zur Kraftübertragung Kupplungen. Mechanische Kupplungen, wie sie bei Strassenfahrzeugen gebräuchlich sind, kommen bei Lokomotiven wegen der grossen zu übertragenden Kräfte nicht in Frage. Bei Rangierlokomotiven sind folgende Systeme gebräuchlich:

- **Hydrostatische** Kupplungen, bestehend aus Hydraulikpumpe und Hydraulikmotor(en)
- **Hydrodynamische** Kupplungen, bestehend aus einem Wandler (Flüssigkeitsgetriebe)
- **Elektrische** Übertragung, bestehend aus Generator und Elektromotor(en)

Jede Bauart hat ihre spezifischen Vor- und Nachteile. Sie eignen sich aus technischen und wirtschaftlichen Gründen für die folgenden Leistungsbereiche:

- Hydrostatische Kraftübertragung für kleine Leistungen
- Hydrodynamische Kraftübertragung für kleine bis mittlere Leistungen
- Elektrische Kraftübertragung für mittlere bis grosse Leistungen

Durch die Notwendigkeit, den Dieselmotor bereits vor dem ausüben von Traktion starten zu müssen, wird der Leerlaufanteil im Rangierdienst sehr hoch. Umfangreiche Messungen des ORE (Forschungs- und Versuchsamts des Internationalen Eisenbahnverbandes) [1] und des US Department of Energy [2] ergaben **Leerlaufzeiten von 75%**. Bei reinem Entladebetrieb, wie er typischerweise in Kohlekraftwerken vorkommt, betragen die Leerlaufzeiten bis zu 95%! Es versteht sich von selbst, dass dadurch unnötig Energie verbraucht und sinnlos Lärm produziert wird. Daran ändern auch Russpartikelfilter und Katalysatoren nichts, sie verbessern nur die Abgaswerte.



### 3.3.1 Beispiel einer 2-achsigen diesel-hydraulischen Rangierlokomotive

Diese kleine Rangierlokomotive wird seit 2003 von der deutschen Firma Vossloh gebaut. Sie ist bei mehreren Staats- und Privatbahnen im Einsatz.

Die Leistungsübertragung erfolgt vom Dieselmotor über ein hydraulisches Turbo-Wendegetriebe auf Kardanwellen, welche mittels Achsgetrieben die beiden Achsen antreiben. Es handelt sich also um einen gekuppelten Antrieb.



**Bild 1: Diesellokomotive des Typs G 400 B der VSFT Vossloh Schienenfahrzeugtechnik GmbH auf einer Demonstrationsfahrt im Bahnhof Basel SBB P.**

Foto: Thomas Stutz

#### Technische Daten:

Länge über Puffer:	9400 mm
Achsformel:	B
Radstand fest:	4000 mm
Raddurchmesser:	1100 mm
Höchstgeschwindigkeit:	70 km/h
Dauerleistung am Rad:	390 kW
Anfahrzugkraft:	130 kN
Dienstmasse:	40,0 t

#### Preisinformation aus Pressemitteilungen:

Nicht verfügbar.



### 3.3.2 Beispiel einer 3-achsigen diesel-hydraulischen Rangierlokomotive

Diese Lokomotive wurde von Vossloh auf der Basis von Vorgängermodellen entwickelt und wird seit 2008 hergestellt.

Die Leistungsübertragung erfolgt vom Dieselmotor über ein hydraulisches Turbo-Wendegetriebe auf Kardanwellen, welche mittels Achsgetrieben die drei Achsen antreiben. Es handelt sich also um einen gekuppelten Antrieb.



**Bild 2: Diesellokomotive des Typs G 6 der VSFT Vossloh Schienenfahrzeugtechnik GmbH.** Foto aus dem Internet

#### Technische Daten:

Länge über Puffer:	10'350 mm
Achsformel:	C
Radstand fest:	4000 mm
Raddurchmesser:	1100 mm
Höchstgeschwindigkeit:	35 km/h (auf Wunsch 80 km/h)
Dauerleistung am Rad:	650 kW
Anfahrzugkraft:	200 kN
Dienstmasse:	60 - 67.5 t

#### Preisinformation aus Pressemitteilungen:

„Vossloh Locomotives in Kiel hat von den Verkehrsbetrieben Peine-Salzgitter (VPS) einen Auftrag über 18 Diesellokomotiven vom Typ G 6 erhalten. Der Auftragswert liegt in der Größenordnung von 25 Mio. €. Die ersten Fahrzeuge werden Anfang 2011 ausgeliefert.“



### 3.3.3 Beispiel einer 4-achsigen diesel- hydraulischen Rangierlokomotive

SBB Cargo und SBB Infra bestellten beim deutschen Hersteller Vossloh total 73 Rangierlokomotiven des neuen Typs Am 843. Diese wurden von 2003 bis 2007 abgeliefert.

Die Leistungsübertragung erfolgt vom Dieselmotor über ein zwischen den Drehgestellen platziertes hydraulisches Turbo-Wendegetriebe auf beidseitige Kardanwellen auf die zwei Drehgestelle und über Achsgetriebe auf die Achsen. Es handelt sich also um einen gekuppelten Antrieb.



**Bild 3: Am 843 013-4 der SBB in MuttENZ.** Foto aus: railfaneurope.net

#### Technische Daten:

Länge über Puffer:	15200 mm
Achsformel:	B' B'
Drehzapfenabstand:	7700 mm
Radstand im Drehgestell:	2400 mm
Raddurchmesser:	1000 mm
Höchstgeschwindigkeit:	100 km/h
Dauerleistung am Rad:	1500 kW
Anfahrzugkraft:	249 kN
Dienstmasse:	80,0 t

#### Preisinformation aus Pressemitteilungen:

„Die Schweizer Bundesbahnen SBB haben nach einer europaweiten Ausschreibung die Vossloh Schienenfahrzeugtechnik GmbH (Kiel) mit der Lieferung von 59 diesel-hydraulischen Lokomotiven der erfolgreichen MaK-Baureihe G1206/G1700 im Gesamtwert von knapp 100 Mio. € beauftragt und sich eine Option über weitere 37 Fahrzeuge gesichert.“



### **3.4 Zweiwege-Fahrzeuge für Schiene und Strasse**

Zweiwegefahrzeuge haben den Vorteil, dass sie sowohl auf der Strasse als auch auf der Schiene eingesetzt werden können. Bei kleineren Betrieben, die nicht über umfangreiche Gleisanlagen verfügen, die ein umfahren der Wagen erlauben, bieten sie den grossen Nutzen, dass die Eisenbahnwagen auf der Strasse umfahren werden können.



**Bild 4: Typisches Zweiwegefahrzeug (Unimog U 400) für den leichten Rangierdienst. Der Abstand der Pneuräder muss in etwa der Spurweite der Bahn entsprechen. Die Spurführung auf der Schiene erfolgt durch je eine vordere und hintere Laufachse. Für den Bahnbetrieb werden die Laufachsen auf das Gleisniveau abgesenkt wie im Bild ersichtlich, im Strassenverkehr werden die Laufachsen angehoben.**

Foto: LosHawlos Wikipedia

#### **Technische Daten Unimog U 400:**

Länge über Puffer:	6800 mm
Höchstgeschwindigkeit:	50 km/h (Strasse: 80 km/h)
Dauerleistung:	170 kW
Anhängelast:	400t in der Ebene (0‰)
Dienstmasse:	13 t

Da es sich weitgehend um handelsübliche und in entsprechend grossen Stückzahlen hergestellte Serieprodukte handelt, sind sie preislich deutlich günstiger als klassische Rangierlokomotiven. Wegen der kleinen Leistung eignen sich die Zweiwegefahrzeuge nur für den leichten Rangierdienst. Das Potential zur CO<sub>2</sub>- Reduktion ist daher gering. Aus diesen Gründen sind die Zweiwegefahrzeuge für die Speichertechnik weniger geeignet und werden im Folgenden nicht weiter behandelt.



### **3.5 Elektrische Rangierlokomotiven**

Aus Kosten- und Sicherheitsgründen sind international nur wenige Industrieareale und Rangierbahnhöfe elektrifiziert. Entsprechend gering ist die Verbreitung der elektrischen Rangierlokomotiven. Wegen der kleinen Stückzahlen sind die Beschaffungskosten höher als bei vergleichbaren Diesellokomotiven, sodass die Diesellokomotiven selbst dann vorgezogen werden, wenn sie ausschliesslich unter der Fahrleitung verkehren.

Die Schweiz bildet insofern eine Ausnahme, als noch etliche Anschlussgleise und Rangierbahnhöfe elektrifiziert sind. Deren Zahl nimmt jedoch laufend ab und so reduziert sich auch der Bedarf an elektrischen Rangierlokomotiven.

#### **3.5.1 Beispiel einer kleinen elektrischen Rangierlokomotive: Ee 922 der SBB**

Als Ersatz für die alten Ee 3/3 Rangierlokomotiven beschaffte die SBB (Personenverkehr) vor allem aus ökologischen Gründen (Lärmschutz, lokale Abgasfreiheit) im Jahr 2007 21 neue elektrische Rangierlokomotiven des Typs Ee 922.



**Bild 5: Ee 922 004-7 der SBB im Bahnhof Basel SBB.**

Foto aus: Wikipedia

#### **Technische Daten:**

Länge über Puffer:	8800 mm
Achsformel:	Bo
Radstand fest:	4000 mm
Raddurchmesser:	1100 mm
Höchstgeschwindigkeit:	100 km/h
Dauerleistung am Rad:	600 kW (kurzzeitig maximal 750 kW)
Anfahrzugkraft:	120 kN
Dienstmasse:	40,0 t / 44,0 t (mit Ballastgewichten)

#### **Preisinformation aus Pressemitteilungen:**

„Diese 2-achsigen Fahrzeuge wurden von 2009 bis 2010 von Stadlerrail Winterthur an die SBB geliefert. Der Auftrag belief sich auf 44.2 Mio. CHF, also rund 2.1 Mio. CHF pro Stück, wobei in diesem Preis keine Zugsicherung inbegriffen war“.



### 3.5.2 Beispiel einer grossen elektrischen Rangierlokomotive Reihe 1163 der ÖBB

Die Österreichischen Bundesbahnen ÖBB haben mit der Baureihe 1163 einige neuere elektrische Rangierlokomotiven (in Österreich: Verschublokomotiven) im Einsatz. Die Bauart unterscheidet sich wesentlich von jener der vorgenannten kleinen SBB Rangierlokomotiven. Sie wird deshalb hier erwähnt, obwohl ihre Konstruktion schon zwanzigjährig ist.



**Bild 6: Elektrische Rangierlokomotive 1163 016-7 am Wiener Westbahnhof.** Foto: Herbert Ortner, Wien

#### Technische Daten:

Länge über Puffer:	16400 mm
Achsformel:	Bo' Bo'
Drehzapfenabstand:	8100 mm
Radstand im Drehgestell:	2800 mm
Raddurchmesser:	1145 mm
Höchstgeschwindigkeit:	100 km/h (120 km/h)
Dauerleistung am Rad:	1600 kW
Anfahrzugkraft:	260 kN
Dienstmasse:	90,0 t

Die 20 elektrischen Rangierlokomotiven der Reihe 1163 wurden 1994 von den beiden österreichischen Firmen Simmering-Graz-Pauker SGP (mechanischer Teil) und Asea-Brown-Boveri ABB (elektrischer Teil) gebaut.

#### Preisinformation aus Pressemitteilungen:

Nicht verfügbar.

#### SBB Ee 6/6 II:

Die SBB beschafften 1980 zehn konzeptionell ähnliche sechssachsige Rangierlokomotiven des Typs Ee 6/6 II. Von diesen Lokomotiven sind 2013 nur noch 5 in Betrieb.



### 3.6 Zweikraft-Rangierfahrzeuge (Hybrid)

Die Bedienung von nicht elektrifizierten Anschlussgleisen muss mit thermischen Fahrzeugen erfolgen. Wegen der Schliessung zahlreicher Rangierbahnhöfe sind die meisten Zustell- und Verteilfahrten wesentlich länger als früher. Die Diesellokomotiven müssen über grosse Strecken unter der Fahrleitung fahren, nur weil die ersten bzw. letzten paar Hundert Meter Gleis nicht elektrifiziert sind. Zur Verbesserung dieser Situation erinnerten sich die SBB Cargo der **Zweikrafttraktoren mit elektrischer und thermischer Traktion**. Diese alte Technik wird jetzt als Hybrid bezeichnet. Da die neuen Fahrzeuge für eine streckentaugliche Höchstgeschwindigkeit konstruiert worden sind, können die Zustell- und Verteilfahrten grösstenteils elektrisch durchgeführt werden, mit einem kleinen Anteil an thermischer Traktion auf den Anschlussgleisen. Rechnerisch können so grosse CO<sub>2</sub>-Einsparungen ausgewiesen werden. Diese sind umso höher, je grösser die Umwege sind, die durch den Wegfall der Rangieranlagen ausgelöst werden! Siehe dazu auch Kapitel 7.

#### 3.6.1 Beispiel einer kleinen Zweikraft-Rangierlokomotive: Eem 923 der SBB



**Bild 7: Eem 923 001-2 der SBB.**

Foto: Stadlerrail

#### Technische Daten:

Länge über Puffer:	9100 mm
Achsformel:	Bo
Radstand fest:	4000 mm
Raddurchmesser:	1100 mm
Höchstgeschwindigkeit:	100 km/h
Dauerleistung am Rad:	1500 kW (mit Dieselbetrieb 290 kW)
Anfahrzugkraft:	150 kN
Dienstmasse:	41 t bis 45 t, je nach Ausrüstung

#### Preisinformation aus Pressemitteilungen:

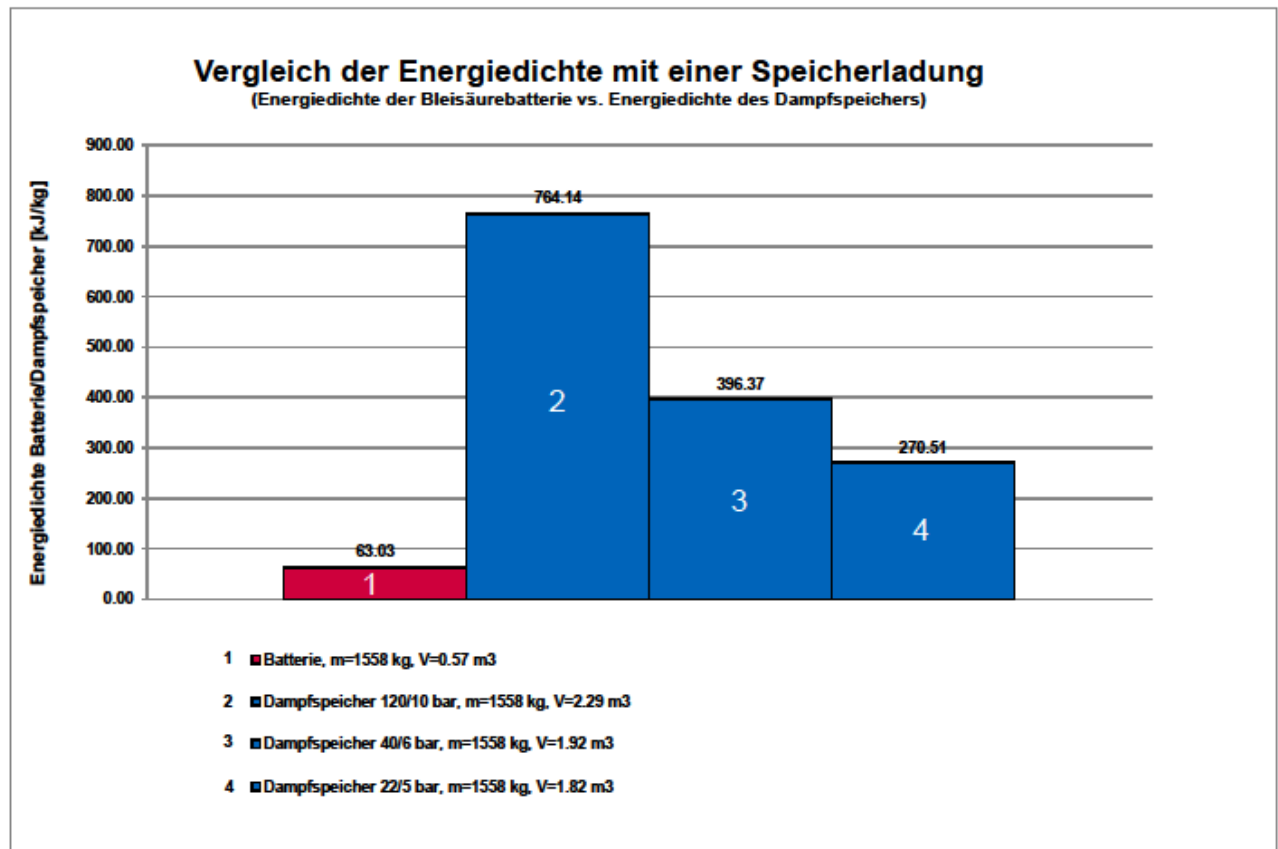
„Der Preis der 30 Lokomotiven inklusive Ersatzteilen beträgt rund 88 Millionen Franken, also rund 3 Mio. CHF pro Stück.“



## 4. Dampfspeichertechnik

### 4.1 Prinzip

Die Dampfspeichertechnik nützt die **Fähigkeit des Wassers** aus, unter Druck **grosse Energiemengen** zu **speichern**. Dabei wird der grösste Teil der Energie nicht im Dampf, sondern im Heisswasser gespeichert. Dampfspeicher werden deshalb auch als Heisswasserspeicher bezeichnet. Meistens wird aber der Dampf genutzt, um Arbeit zu verrichten, sodass der Begriff Dampfspeicher zutreffender ist.



**Bild 8: Vergleich der nutzbaren Energie einer Bleibatterie mit jener von Heisswasserspeichern bei gleichem Gewicht.** Grafik: Martin Schneider ZHAW

Die obenstehende Grafik illustriert die grosse Speicherfähigkeit anschaulich. Zwar gäbe es leistungsfähigere elektrische Batterien, z.B. Lithium-Ionen, jedoch nicht für diese Grössen und Kapazitäten. Zudem ist Wasser billig! Die Speicherbehälter sind praktisch wartungsfrei und haben eine vielfach längere Lebensdauer als Batterien.

### 4.2 Speicherlokomotiven

Speicherlokomotiven werden auch als **feuerlose Lokomotiven** bezeichnet, weil die **Dampferzeugung extern** in einer **stationären Anlage** erfolgt. Die Speicherlokomotiven werden dort eingesetzt, wo stationäre Kessel oder Wärmetauscher vorhanden sind, also in Kraftwerken, Brauereien, Papierfabriken, Raffinerien, Stahlwerken und in der chemischen Industrie. In letzteren kommt zudem der Vorteil zum Tragen, dass feuerlose Lokomotiven **explosionsgeschützt** sind, während der Explosionsschutz bei Diesellokomotiven umfangreicher Massnahmen bedarf.

Speicherlokomotiven erfordern keinen Heizer und werden immer im **Einmann-Betrieb** gefahren. Sie sind einfach zu bedienen.



Dampfspeicherlokomotiven sind **einfach** gebaut und daher **kostengünstig** in der Anschaffung und im Unterhalt. Sie sind sehr **umweltfreundlich**, da sie nur Abdampf emittieren und auch bei Höchstleistung **leise** arbeiten (im Gegensatz zu den gefeuerten Dampflokomotiven brauchen sie keinen Saugzug). Wird der Abdampf kondensiert, ist das Fahrzeug vollkommen emissionsfrei, als einziges "Abfallprodukt" entsteht warmes Wasser.

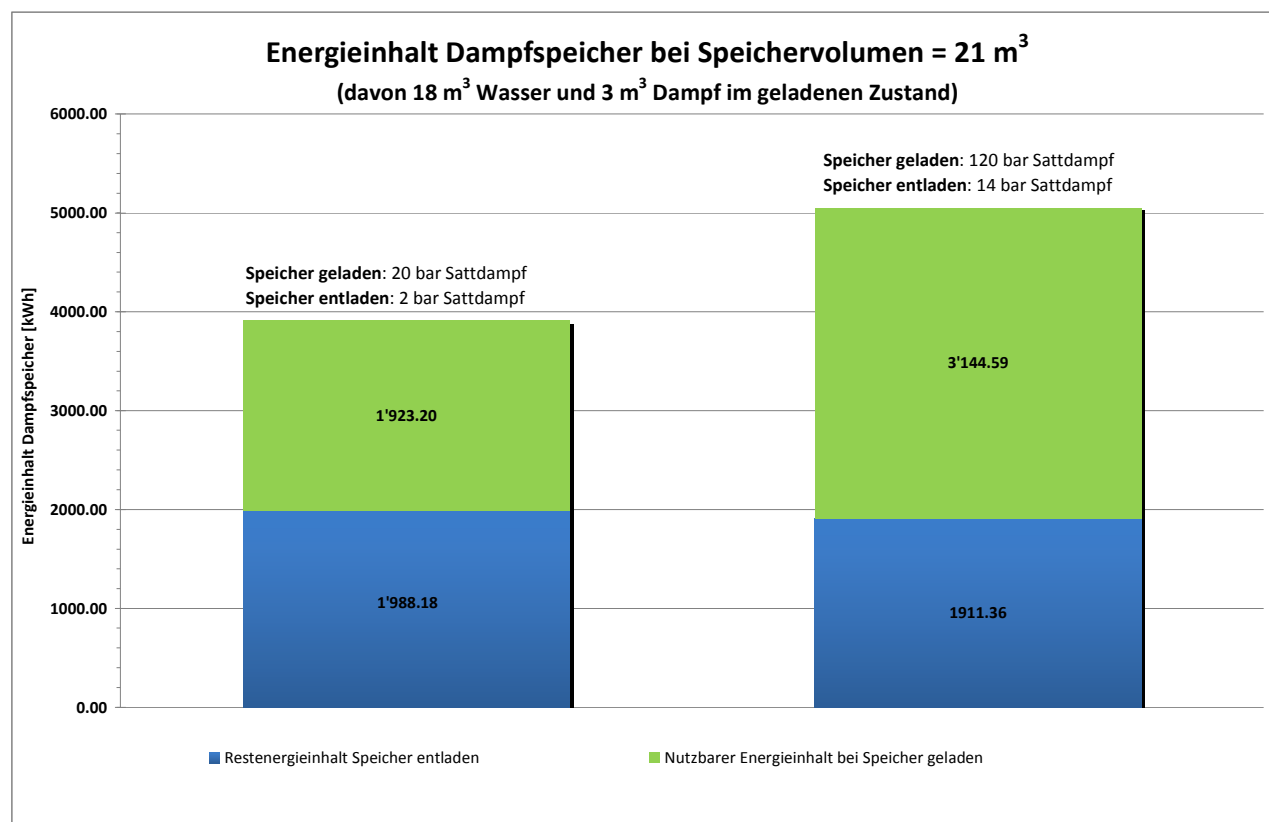
Ein wesentlicher Vorteil der Speicherlokomotiven ist, dass sie nur Energie verbrauchen, wenn sie Leistung abgeben. Dies im Gegensatz zu Diesellokomotiven, deren Motor ständig läuft. Messungen des ORE (Forschungs- und Versuchsamt des Internationalen Eisenbahnverbandes) und des US Department of Energy zufolge betragen die Leerlaufzeiten von Diesellokomotiven im Rangierbetrieb satte 75%! [1], [2]

Der Energiespeicher lässt theoretisch **fast unbegrenzte Leistungen** zu, da die Dampfentnahmemenge nicht begrenzt ist. Deshalb kann den Zylindern beliebig viel Dampf zugeführt werden.

Nach dem **zulässigen Druck im Speicher** wird unterschieden zwischen:

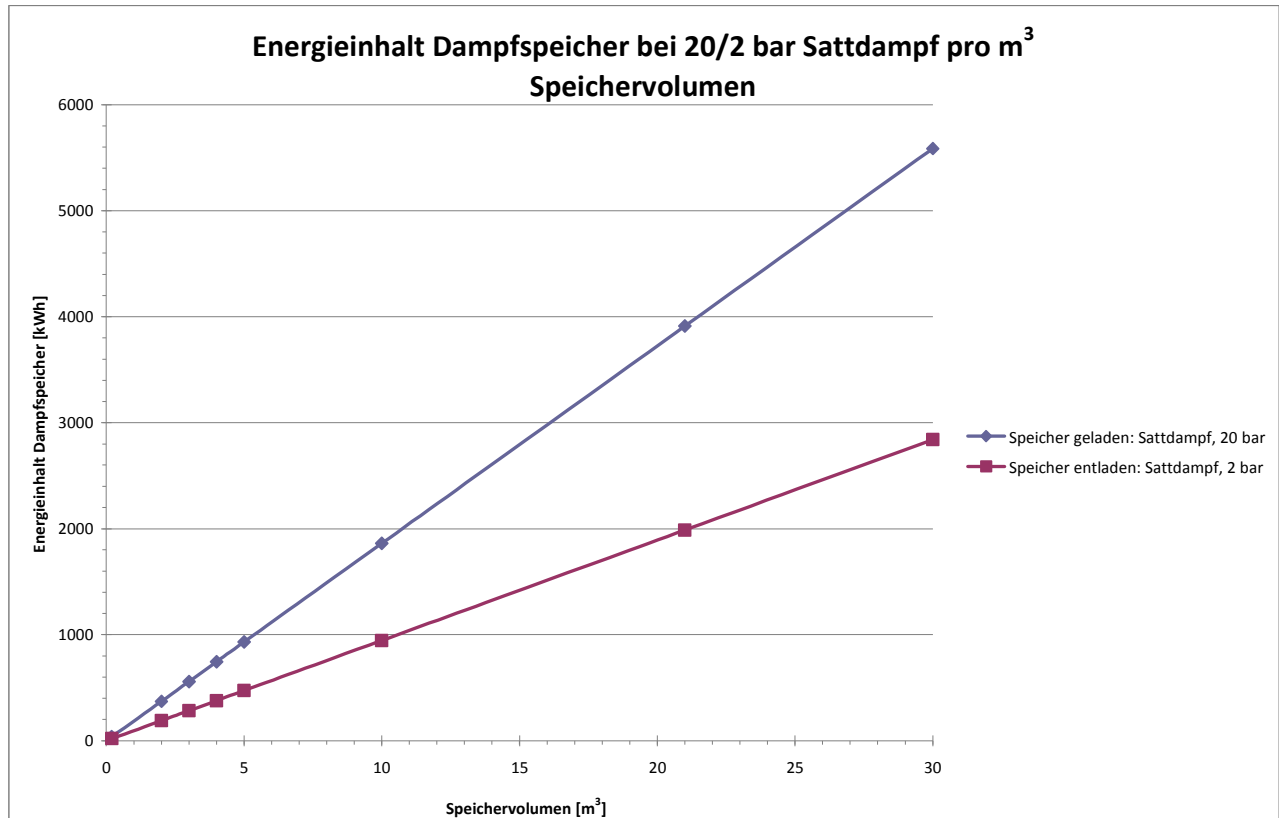
- **Niederdruckspeicherlokomotiven:** **8 bis 20 bar Ladedruck**
- **Hochdruckspeicherlokomotiven:** **40 bis 140 bar Ladedruck**

Die vor allem in deutschen Industriebetrieben verbreiteten **Speicherlokomotiven** sind **ideale Rangierfahrzeuge**: einfach, robust, zuverlässig, maximales Drehmoment beim Anfahren, gute Beschleunigung, keine Abgase, sehr niedriger Geräuschpegel bei Last, absolut ruhig im Stillstand und im Leerlauf. Speicherlokomotiven sind u.a. im Grosskraftwerk Mannheim, im Sasol Werk Herne und im Sodawerk Stassfurt regulär im Einsatz.

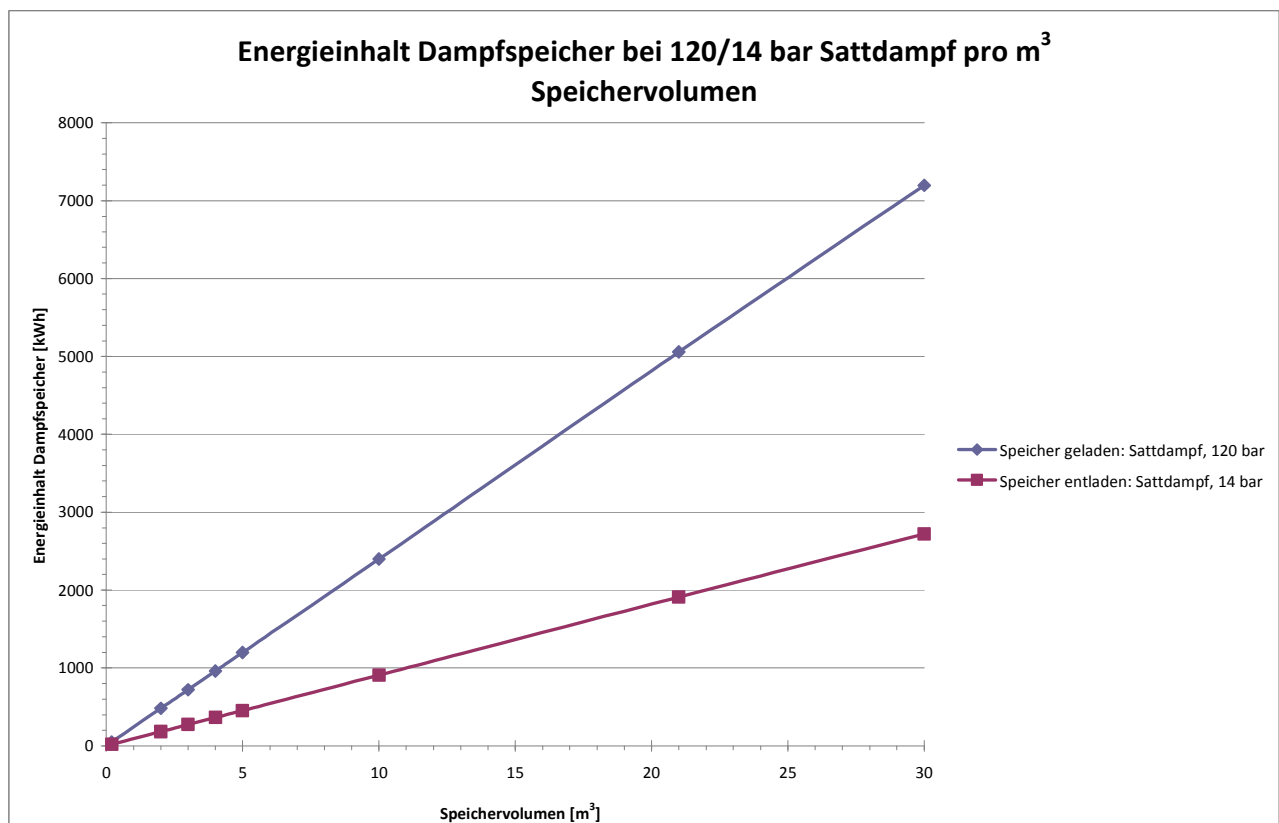


**Bild 9: Vergleich der Speicherkapazität von Niederdruck- und Hochdruckspeicherlokomotiven am Beispiele einer dreiachsigen Rangierlokomotive.** Grafik: Martin Schneider ZHAW





**Bild 10: Nutzbarer Energieinhalt von Niederdruckspeichern.** Grafik: Martin Schneider ZHAW

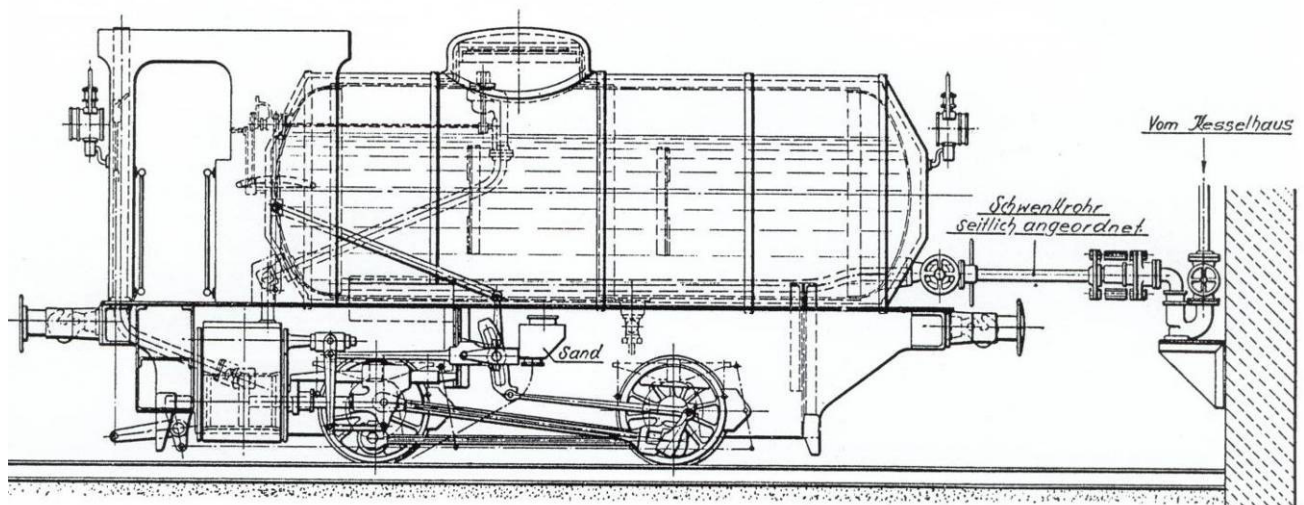


**Bild 11: Nutzbarer Energieinhalt von Hochdruckspeichern.** Grafik: Martin Schneider ZHAW



#### 4.2.1 Niederdruckspeicherlokomotiven

**Niederdruckspeicherlokomotiven** arbeiten im Bereich ihres maximalen Ladedruckes von 8 bis 20 bar bis etwa 2 bar. Damit die Zugkraft nicht mit dem Speicherdruck abnimmt, sondern in einem weiten Arbeitsbereich konstant gehalten werden kann, legt man die Zylinder wesentlich grösser aus. Damit kann auch bei Teilentladung noch die volle, durch das Reibungsgewicht der Lokomotive begrenzte, Zugkraft entwickelt werden. Eine Speicherlokomotive mit 20 bar Ladedruck kann in der Regel bis zu 8 bar die volle Zugkraft erbringen. Solange der Speicherdruck über dem maximalen Arbeitsdruck der Zylinder liegt, muss mit gedrosseltem Dampf gearbeitet werden. Danach nimmt die Zugkraft dem Druckabfall entsprechend ab. Mit 2 bar kann noch zur Ladestation gefahren werden.



**Bild 12: Schnitt durch eine Niederdruckspeicherlokomotive an der Ladestation. Man beachte den extrem einfachen Aufbau.** Grafik aus [3]

Der Lokomotivführer musste die klassische Speicherlokomotive mit Geschick fahren, weil die Zugkraft und die Leistung vom Speicherdruck, von der Regler- und von der Steuerungsstellung abhängig sind. Heute könnte man dafür Regeltechnik einsetzen.

**Niederdruckspeicherlokomotiven arbeiten mit Sattedampf.** Deshalb und wegen der übergrossen Zylinder liegt ihr **spezifischer Dampfverbrauch** mit 18 bis 27 kg/PSh bzw. **24.5 bis 37 kg/kWh** relativ hoch. Zum Vergleich: der spezifische Dampfverbrauch der neuen Zahnradampflokomotiven beträgt lediglich 6 kg/kWh. [4]

Die Niederdruckspeicherlokomotiven haben sich im Werkverkehr sehr gut bewährt. Allein in **Deutschland** wurden rund **3500 Speicherlokomotiven** gebaut. [3]

In der **Schweiz** waren rund **20 zweiachsige Speicherlokomotiven** im Einsatz. Bekannt sind: BBC Baden, Brauerei Salmen Rheinfelden, Cellulose Attisholz (4), Chemische Fabrik Schweizerhalle, Gaswerke in Lausanne, Winterthur und Schlieren, Papierfabriken in Biberist und Perlen (2), Saurer Arbon, Stickerei Arbon, Viscose Emmenbrücke und Heerbrugg, Lonza Visp (2). [5]





**Bild 13: Niederdruckspeicherlokomotive im täglichen Einsatz beim Grosskraftwerk Mannheim**  
Foto: Roger Waller



**Bild 14: Ladevorrichtung für Dampfnachfüllung beim Grosskraftwerk Mannheim. Das Laden erfolgt unbeaufsichtigt. Der Dampfstrom stoppt automatisch, sobald im Druckbehälter der gleiche Druck erreicht worden ist wie in der Zuleitung.** Foto: Roger Waller



### Beispiel einer Niederdruck-Speicherlokomotive: FLC 03

Die Speicherlokomotive FLC 03 ist besonders ökonomisch und betriebstechnisch für den leichten und mittleren Rangierdienst geeignet. Sie zeichnet sich aus durch:

- Wirtschaftlichkeit
- Geringe Unterhaltungskosten
- Umweltfreundlichkeit
- Sicherheit gegen Feuergefahr

202 Speicherlokomotiven dieses Typs wurden 1983 bis 1988 vom RAW Meiningen in der DDR gebaut. Es handelt sich um Nachbauten der zuvor von LKM in noch grösseren Stückzahlen produzierten bewährten Speicherlokomotive Typ C. Als einzige technische Verbesserung erhielten die Achsen der neuen Serie Rollenlager.



**Bild 15: Speicherlokomotive des Typs FLC 03 der Dampflokomotiv- und Maschinenfabrik DLM AG bei einer Demonstrationsfahrt im Bahnhof Schaffhausen. Foto: Roger Waller**

### Technische Daten

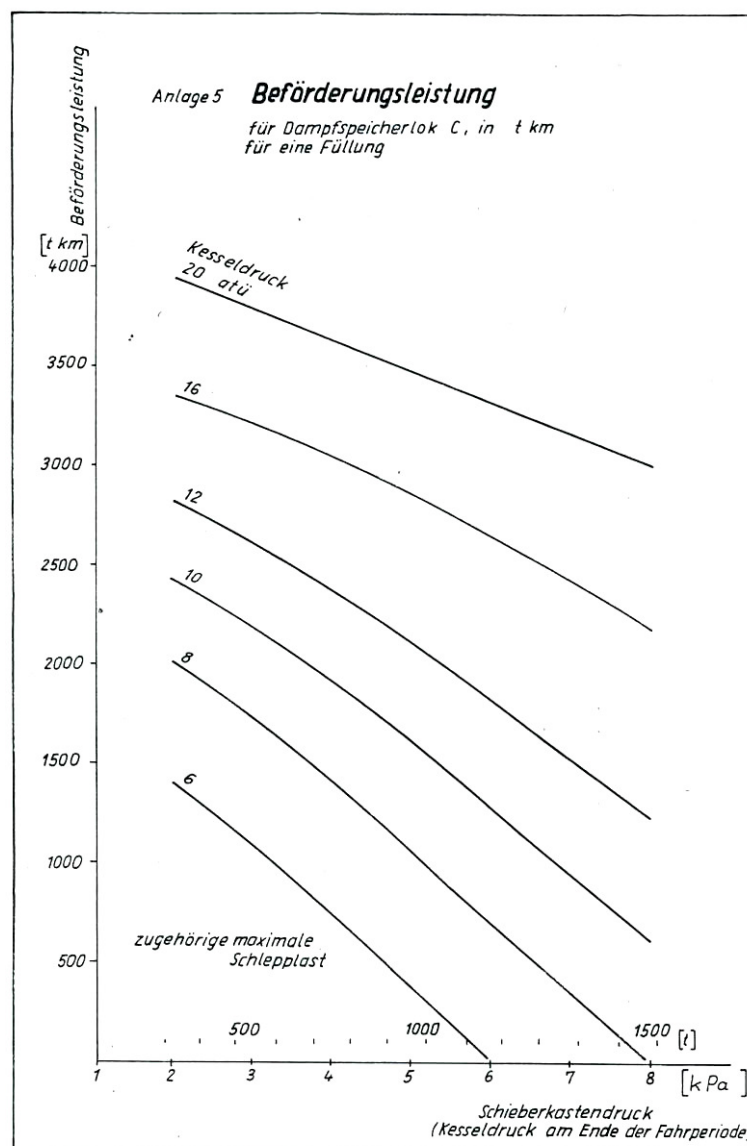
Gesamtinhalt des Druckgefäßes:	21.0 m <sup>3</sup>
Wasserinhalt des Druckgefäßes:	17.8 m <sup>3</sup>
Dampfinhalt des Druckgefäßes:	3.2 m <sup>3</sup>
Max. Dampfdruck des Druckgefäßes:	20 bar
Max. Zugkraft aus Reibungsgewicht:	94.1 kN (9600 kp)
Dienstmasse:	50 t
Leermasse:	34 t
Spurweite:	1435 mm
Kleinster Bogenhalbmesser:	80 m
Raddurchmesser:	1050 mm
Höchstgeschwindigkeit:	30 km/h
Richtwert für Rangierarbeit mit einer Füllung:	4000 tkm



## Leistungstabelle und Beförderungsleistung der FLC 03

Schieber- kasten- druck	Zugkraft  kN	Schlepplast am Zughaken der Lokomotive in t auf der geraden Steigung von:							zu durchfahrende Strecke in km beim Anfangsdruck	
		1:00 0 ‰	1:500 2 ‰	1:200 5 ‰	1:100 10 ‰	1:50 20 ‰	1:40 25 ‰	1:25 40 ‰	2,0 MPa	1,0 MPa
MPa										
0,760	94,14	1520	1130	805	540	314	256	156	2,0	0,5
0,6	69,8	1160	860	612	406	293	187	110	3,0	1,2
0,5	57,4	956	707	500	329	184	147	83	4,0	1,8
0,4	44,9	750	550	387	250	135	106	56	5,5	2,9
0,3	32,5	542	396	274	173	88	66	29	8,2	4,9
0,2	20,1	335	240	161	95	40	26	-	13,8	9

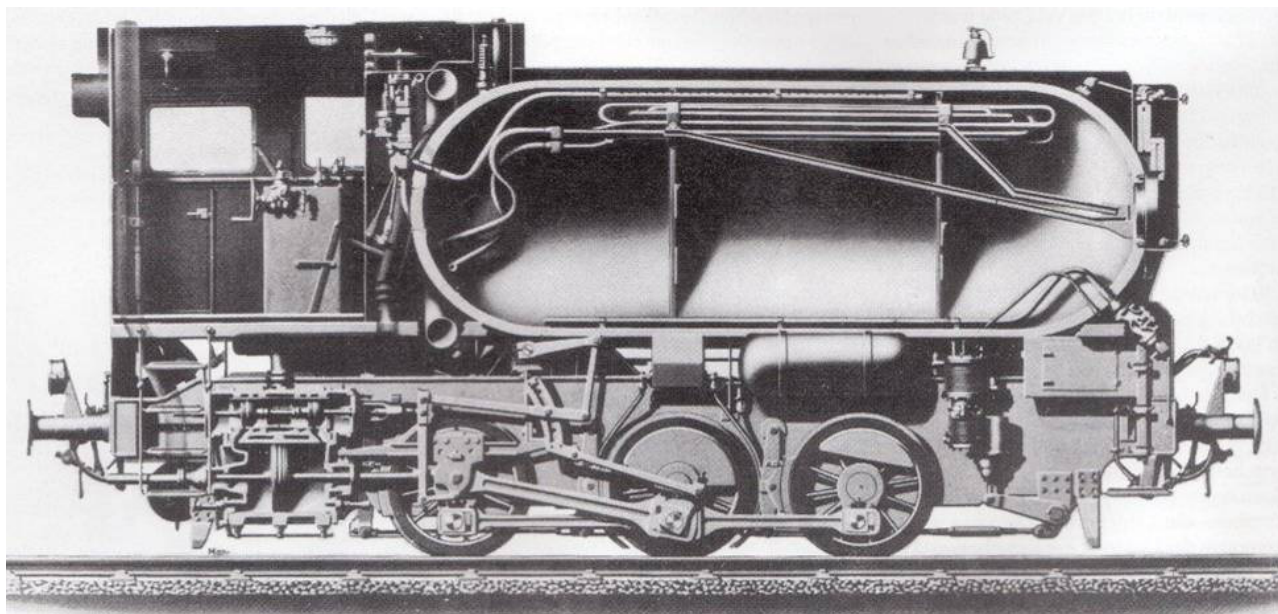
Für die vorstehenden Angaben ist Voraussetzung, daß die Fahrt mit 2,0 MPa bzw. 1,0 MPa Anfangsdruck im Druckgefäß begonnen und ununterbrochen durchgeführt wird. Durch häufiges Anfahren und längere Betriebspausen wird die zu durchfahrende Strecke verkürzt. Bei der Berechnung ist der Laufwiderstand der Lokomotive mit 100 N/t, der der Wagen mit 60 N/t und der Dampfverbrauch mit 25,8 kg/kWh zugrunde gelegt worden.





#### 4.2.2 Hochdruckspeicherlokomotiven

Bei **Hochdruckspeicherlokomotiven** liegt der Speicherdruck deutlich über dem Arbeitsdruck, womit sich übergrosse Zylinder vermeiden lassen. Die Zugkraft bleibt unabhängig vom Speicherdruck, da Hochdruckspeicherlokomotiven in der Regel nicht unter den Arbeitsdruck gefahren werden. Zudem lässt sich der Dampf überhitzen.



**Bild 16: Schnitt durch eine Hochdruckspeicherlokomotive. Der Arbeitsdampf wird nach der Drosselung am Regler in den im Speicher oben liegenden Überhitzerschlangen überhitzt.**

Prof. Dr. Gilli entwickelte das Prinzip der Überhitzung bei Speicherlokomotiven. Dabei wird der Umstand genutzt, dass die Dampftemperatur entsprechend der Sattedampfkurve bei höherem Druck zunimmt. Beim Arbeitsdruck der Dampfmaschine von 16 bar beträgt die Sattedampftemperatur 204 °C, beim Speicherdruck von 85 bar aber 300 °C. Lässt man den Arbeitsdampf nach erfolgter Drosselung am Regler in Überhitzerschlangen durch den Speicher strömen, erreicht man überhitzten Dampf von rund 300 °C bei 16 bar.

Die meisten **Hochdruckspeicherlokomotiven arbeiten mit Heissdampf**. Ihr **spezifischer Dampfverbrauch** liegt bei 9 bis 12 kg/PS<sub>h</sub> bzw. **12 bis 16 kg/kWh**. Das Arbeitsvermögen von Hochdruckspeicherlokomotiven ist dank der Kombination von höherer Energiedichte des Speichers mit einer effizienteren Dampfmaschine etwa dreimal so hoch wie bei Niederdruckspeicherlokomotiven. Mit heutiger Technik (**modern steam**) sind weitere Verbesserungen möglich.

Die Ladeanlagen waren in der Regel so ausgelegt, dass eine Füllung ca. 15 - 20 Minuten dauerte. Die Ladung von Speicherlokomotiven wurde oft in die Mittagszeit gelegt, da dann der Rangierbetrieb ruhte. Da oft auch die Produktion heruntergefahren wurde, war der Dampfbedarf für die Speicherlokomotive(n) als Ausgleich der Kesselleistung durchaus erwünscht.

Für eine Renaissance der ökonomisch und ökologisch überzeugenden Speichertechnik ist eine grundlegende Modernisierung der Speicherlokomotiven mit der **modern steam Technik** [17] der **Dampflokomotiv- und Maschinenfabrik DLM AG** notwendig, um sie den heutigen Anforderungen anzupassen.



## Beispiel einer Hochdruck-Speicherlokomotive: C 60.85



**Bild 17: Moderne Hochdruck-Dampfspeicherlokomotive des Typs C 60.85 mit 85 bar Ladedruck und Überhitzung. Vier baugleiche Lokomotiven wurden von 1961 bis 1973 gebaut. Die DLM AG verfügt über einen vollständigen Satz von Fabrikationszeichnungen dieser Lokomotive. Foto: Roger Waller**

### Technische Daten:

Länge über Puffer:	9'750 mm
Achsformel:	C
Radstand fest:	3200 mm
Raddurchmesser:	1050 mm
Höchstgeschwindigkeit:	40 km/h
Speicherdruck, max.	85 bar
Heisswasserinhalt	13.1 m <sup>3</sup>
Zylinderdurchmesser	450 mm
Kolbenhub	550 mm
Anfahrzugkraft:	13.5 t
Dienstmasse:	60 t

Die Hochdruck-Speicherlokomotiven C 60.85 haben sich in der Raffinerie Schwechat der OMV (Österreichische Mineralölverwaltung) jahrzehntelang sehr gut bewährt. Dem damaligen Management-Modetrend „outsourcing“ folgend, wurden die Rangierarbeiten 1998 an die Österreichischen Bundesbahnen (ÖBB) ausgelagert. Die ÖBB ersetzten die umweltfreundlichen Speicherlokomotiven durch laute, stinkende Diesellokomotiven und bestätigten so die Regel, dass nicht jede Neuerung ein Fortschritt ist!



#### **4.3 Pneufahrzeuge mit Speichertechnik**

Im Strassenverkehr gibt es zwar keinen mit dem Rangierbetrieb der Bahn vergleichbaren Einsatz, aber viele Fahrzeuge bewegen sich nur in einem begrenzten Gebiet, z.B. Fahrzeuge für den internen Werkverkehr, auf Flughäfen, in Bahnhöfen, Postverteilzentren, Containerterminals usw. Auch Fahrzeuge, die regelmässig an den gleichen Ausgangspunkt zurückkehren wie Linienbusse oder Taxis, kommen für Speichertechnik in Frage.

Die Idee, die Speichertechnik bei Strassen- und Wasserfahrzeugen anzuwenden, wurde 2005 patentiert: **Wärmebetriebenes Fahrzeug mit externer Energieerzeugung.** [6]

##### **4.3.1 Demo-Mobil I und II**

Um die Tauglichkeit des Dampfspeicherprinzips bei Strassenfahrzeugen zu zeigen, baute die Dampflokomotiv- und Maschinenfabrik DLM AG ein Elektromobil der Firma Horlacher um. Das minimale Budget erlaubte nur die Verwendung vorhandener Komponenten, z.B. einer 100-jährigen Dampfmaschine mit entsprechend schlechtem Wirkungsgrad. Einzig das Leichtbaufahrzeug war modern.



**Bild 18: Demo-Mobil II: Dampfmaschinen bringen ihr maximales Drehmoment aus dem Stand heraus und benötigen weder Kupplung noch Getriebe. Rückwärts könnte ebenso schnell gefahren werden wie vorwärts. Das Demo-Mobil II wog betriebsbereit 600 kg. Foto: Roger Waller**

Beim Demo-Mobil I wurden zwei 100 l-Druckbehälter auf der Ladefläche platziert, weil die Glasfaserkarosserie nicht verändert werden durfte. Der in Versuchen ermittelte Aktionsradius betrug bei gleichmässiger Fahrt auf ebener Strecke rund 8 km. Die Messfahrten dauerten rund 40 min., was einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 10.5 km/h entspricht. Die Übersetzung wurde so gewählt, weil die Höchstgeschwindigkeit in autofreien Orten nur 15 km/h beträgt. Mit einer anderen Übersetzung könnte deutlich schneller gefahren werden. Das Demo-Mobil II hatte nur noch einen 100 l-Behälter.

Die Demo-Mobile bewiesen die Tauglichkeit der Speichertechnik für Strassenfahrzeuge in begrenztem Einsatzgebiet. Bedingt durch die alte Dampfmaschine und den Ladedruck von nur 10 bar konnte nur der technische Stand von älteren Niederdruckspeicherlokomotiven erreicht werden. Entsprechend gross wäre das Potential mit **modern steam** Technik.



#### 4.3.2 Demo-Mobil III

Es wurde übersehen, dass Fahrzeuge in den autofreien Orten nicht wie Autos aussehen sollen. Zudem ist dieser Markt klein und die autofreien Orte verfügen kaum über Dampfproduktionsanlagen. Aussichtsreicher sind Servicefahrzeuge in Industriearealen.

Mit erneut kleinem Budget baute die DLM AG ein Elektromobil zum Dampfspeicherfahrzeug um, mit derselben alten Dampfmaschine. Immerhin konnten neue Druckbehälter für 40 bar gekauft und eingebaut werden. Bei den Probefahrten konnte dieses Potential noch nicht genutzt werden, weil die Kessel der Brauerei nur Dampf von 9 bar liefern.



**Bild 19: Demo-Mobil III:** Dampfmaschine und Druckbehälter sind Unterflur platziert, sodass die ganze Ladefläche genutzt werden kann. Sollte der aus reinem Wasserdampf bestehende Abdampf stören, könnte er kondensiert werden.  
Foto: Roger Waller

#### 4.3.3 Thermomobil

Das Thermomobil wäre eine Weiterentwicklung der Dampfspeichertechnik für Strassenfahrzeuge, mit rechnerisch optimierten, neu konstruierten und neu gebauten Komponenten nach dem heutigen Stand der Technik:

- Leichtbau der Fahrzeuge
- Hochdruckspeichertechnik mit Überhitzung gemäss System von Prof. Gilli
- Neue thermodynamisch und strömungstechnisch optimierte Dampfmaschine
- Wartungsfreie dauergeschmierte Wälzlager für die Dampfmaschine und den Antrieb
- Schmierlostechik für die (ölfreie) Dampfmaschine
- Optimale Isolierung von Speicher, Leitungen und Dampfmaschine
- Soweit möglich Verwendung handelsüblicher Komponenten
- Option: Kondensation des Abdampfes für den Betrieb in Lagerhallen, Kühlräumen usw.
- Option: Sichtbarer Antrieb (als Zusatzattraktion z.B. für Taxi)

Auch wenn die Entwicklung der Speichertechnik weit weniger Aufwand erfordern würde als diejenige anderer alternativer Antriebe, so kann doch nicht erwartet werden, dass mit 50'000.- CHF ähnliche Resultate erzielt werden können, wie bei der Elektromobilität, die weltweit mit mehreren Hundert Mio. CHF gefördert wird.

**Der Beweis, dass die Speichertechnik auch bei Strassenfahrzeugen angewendet werden kann, ist erbracht.**



#### **4.3.4 Arbeitsgeräte für internen Werksverkehr mit Speichertechnik**

Die meisten Fahrzeuge und Arbeitsgeräte, die nur im Werkareal benützt werden, eignen sich für den Speicherbetrieb. Die Treibstoffkosten von Flugzeugschleppern und Bussen liegen bei etwa 50'000.- Euro pro Fahrzeug und Jahr. 2011 verbrauchte der Flughafen Frankfurt 16 Mio. l Dieselöl und 1 Mio. l Benzin. [7] Bei jährlichen Treibstoffkosten von rund 30 Mio. CHF können sich Investitionen zu deren Reduktion schnell amortisieren. Beim kleineren Flughafen von Zürich sind es immerhin 3 Mio. l Diesel pro Jahr.

##### 4.3.4.1 Flughafenschlepper



**Bild 20: Flugzeugschlepper (Stangenschlepper)** Foto: aus Internet

##### 4.3.4.2 Flughafenbusse



**Bild 21: Flugzeugbus Typ Cobus 2000** Foto: aus Internet



#### 4.3.5 Busse, Cars und Lastwagen

In Frage kommen in erster Linie Busse des öffentlichen Verkehrs in Städten und Agglomerationen. Postautos sind für Speicherbetrieb weniger geeignet, da sie in der Regel grosse Distanzen zurücklegen, bevor sie an den Ausgangspunkt zurückkehren. Cars und Lastwagen verkehren normalerweise nicht im Liniendienst und kämen erst in Betracht, wenn ein flächendeckendes Dampftankstellennetz vorhanden wäre.

Üblicherweise verkehrt ein Bus im öffentlichen Verkehr jeweils den ganzen Tag auf einer Linie. An den Endpunkten sind kurze Pausen von 5 bis 10 Minuten geplant (Fahrplanstabilität, WC- und Rauchpause für Chauffeure, Grob-Reinigung usw.). In dieser Zeit müsste, falls erforderlich, das Nachladen mit Dampf erfolgen, will man keine betrieblichen Nachteile in Kauf nehmen.

Busse werden in Serien hergestellt und sind entsprechend kostengünstig. Diesen Vorteil will man nicht preisgeben. Es ist daher sinnvoll, die für die Speichertechnik notwendigen Anpassungen auf ein Minimum zu begrenzen. Teure Einzelanfertigungen und Spezialkonstruktionen sind zu vermeiden.

Aus diesen Gründen ist ein **Anhängerkonzept** sinnvoll. Der Energievorrat wird in einem zwei- oder dreiachsigen Anhänger mitgeführt. Die Anpassung am Bus beschränkt sich auf den Ersatz von Dieselmotor und Getriebe durch eine Dampfmaschine bzw. einen Dampfmotor. Am Fahrwerk und an der Karosserie sind nur minimale Änderungen notwendig, das Interieur bleibt unverändert.

Dem damaligen Zeitgeist entsprechend wurden in den 50-er Jahren auch im Kanton Zug „alte“ elektrische Strassenbahnen durch „moderne“ Dieselsebusse ersetzt. Von 1953 bis 1989 kamen auf der Linie von Zug nach Oberägeri aus Kapazitätsgründen sogenannte Dreiwagenzüge zum Einsatz, siehe Bilder 22 und 24. Der hellgraue Gepäckanhänger gibt eine Idee, wie ein Energiespeicher-Anhänger aussehen könnte.



**Bild 22: Solche Anhängerzüge waren bei der Zugerland Verkehrsbetriebe AG von 1953 bis 1989 fahrplanmässig im Einsatz. Foto: Roland Stirnemann, 13.08.1986**



**Bild 23: Der neueste Gepäckanhänger des Typs APG 3 wurde von einigen Mitgliedern des „Vereins Zuger Depot Technikgeschichte ZDT“ vorbildlich restauriert. Er ist im Museum in Neuheim ausgestellt. Foto: www.zdt.ch**

**Technische Daten:**

Typ: Gepäckanhänger AGP 3  
 Erbauer: Moser Ramseier/Jenzer AG  
 Baujahre: 1953 und 1955  
 Länge inkl. Deichsel: 6'000 mm  
 Kastenlänge: 4'000 mm  
 Breite: 2'100 mm  
 Höhe: 2'750 mm  
 Achsstand: 2'600 mm



Die zulässige Achslast im Schweizer Strassenverkehr beträgt 10 Tonnen. Ein zweiachsiger Anhänger könnte einen Heisswasserspeicher mit 10 bis 12 m<sup>3</sup> Inhalt mitführen, ein dreiachsiger 15 bis 20 m<sup>3</sup>. Mehrstündige Fahrten sind so möglich.

Mit dem Anhängerkonzept vereinfacht sich die Logistik des Betankens. Das nachfüllen eines zweiten Energiespeichers kann während der Einsatzzeit des Busses mit dem anderen Speicher erfolgen, sodass sich keine Wartezeiten für den Bus ergeben. An den Endhaltestellen wird dann bei Bedarf der erschöpfte durch den vollen Speicher getauscht.



**Bild 24: So ähnlich könnte ein speicherbetriebener Bus aussehen: Gelenkbus mit direkt gekoppeltem Energieanhänger. Foto: Guido Nussbaumer, Mai 1989**



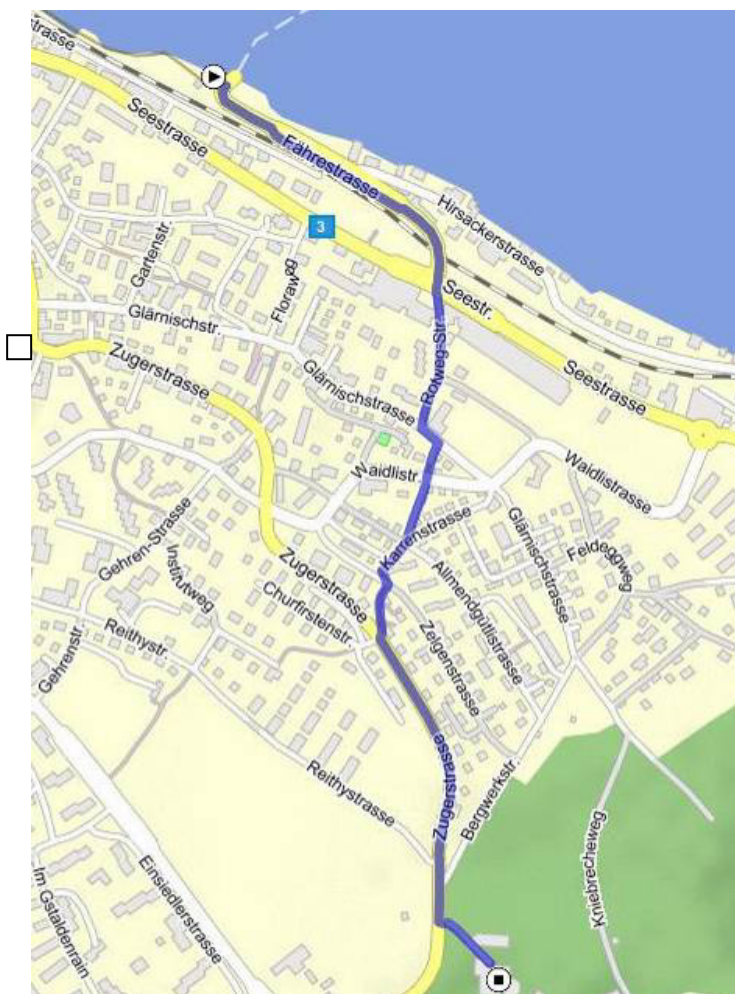
## 4.4 Schiffe mit Speichertechnik

### 4.4.1 Fähren

Fähren eignen sich bestens für Speicherbetrieb. Sie fahren immer zwischen zwei Anlegestellen, teilweise sehr intensiv. Entsprechend gross ist das Potential zur Einsparung von Dieselöl und CO<sub>2</sub>. Als Beispiel dienen hier die Zürichseefähren von Meilen nach Horgen. Die fünf Fähren verbrauchen 1.5 Mio. Liter Dieselöl pro Jahr, was, trotz Zollrückerstattung im öffentlichen Verkehr, Energiekosten von 1,6 Mio. CHF ergibt [8].



**Bild 25: Zwei Fähren begegnen dem Raddampfer "Stadt Zürich". Für den Speicherdampfbetrieb der Fähren ist kein Schaufelradantrieb geplant, sondern Dampfmaschinen anstelle der kurzlebigen, wartungsintensiven Dieselmotoren. Foto: aus Internet**



**Bild 26:**  
Die Kehrlichtverbrennungsanlage von Horgen könnte mittels einer ca. 1.4 km langen Dampfleitung den Dampf für die Fähren liefern. Für Dampfleitungen ist dies keine grosse Distanz, vergleiche dazu das Leitungsnetz der FEWAG Fernwärme Wynenfeld AG im Anhang V. Bild: aus Internet



Aus betrieblichen und wirtschaftlichen Gründen muss das nachladen ohne Zeitverlust und ohne Zusatzfahrten erfolgen, das heisst ohne Leerfahrten zur „Dampftankstelle“. Es genügt, wenn in Horgen betankt wird, aber die Speicher sollen bei jeder Fahrt nachgefüllt werden, damit die Betankung gleichzeitig mit dem Ent- und Beladen der Fähre und innerhalb der durch den Fahrzeugwechsel zur Verfügung stehenden Zeit erfolgen kann. Es versteht sich von selbst, dass der Dampfbetankungsvorgang automatisch und ohne zusätzliche Handarbeit ablaufen muss. Weil die Fähren beim Be- und Entladen aber ohnehin gesichert werden, hält sich die technische Herausforderung für die Entwicklung von solchen automatischen Kupplungen in Grenzen.

#### **4.4.2 Wassertaxis (z.B. Vaporetti in Venedig)**

Auch Wassertaxis bewegen sich in einem eng begrenzten Aktionsfeld und im Liniendienst. Bei den heutigen Vaporetti in Venedig erinnert nur noch der Name an den früheren Dampfantrieb. Mit der Speichertechnik wäre eine sinnvolle und umweltfreundliche Renaissance möglich, die zur Rettung der historischen Stadt beitragen würde.



**Bild 27: Venedig leidet unter den Abgasen und dem Lärm der heutigen, mit Dieselmotoren betriebenen Vaporetti. Speicherdampfschiffe würden Abhilfe schaffen.** Foto: aus Internet

Auch wenn solche Wassertaxis vorwiegend im Ausland zirkulieren, gäbe es für die Schweizer Wirtschaft ein neues Exportprodukt. Zudem ist die CO<sub>2</sub>-Belastung ein global zu lösendes Problem.



## 5. Analyse des Rangier- und Werkverkehrs

In zwei Unternehmen wurde der bestehende Rangierbetrieb analysiert, um abzuklären, ob eine Umstellung auf Speicherbetrieb technisch und betrieblich möglich ist. Als Beispiele wurden Unternehmen gewählt, die über Dampfquellen in unmittelbarer Nähe verfügen:

- EMS Chemie AG in Ems
- Migros Verteilzentrum in Suhr

### 5.1 EMS Chemie AG

#### 5.1.1 Schienennetz

Die EMS Chemie AG verfügt über ein ausgedehntes, nicht elektrifiziertes Normalspur-Industriegleisnetz. Erschlossen wird es von Chur her mittels Dreischienengleis, weil die übrigen Strecken im Bündnerland von der meterspurigen Rhätischen Bahn (RhB) betrieben werden. Ein Anschluss in Meterspur existiert ebenfalls. Der Gleisplan ist im Anhang I dargestellt.

Speziell ist, dass die Gleisanlage in Fahrtrichtung zum Areal fast nur Linkskurven hat. Zum Ausgleich der Spurkranzabnutzung wird die Diesellokomotive ab und zu gewendet.

Das Werkareal ist für den Strassenverkehr erschlossen und hat viele Bahnübergänge. Der kleinste Kurvenradius beträgt 120 m. Die grösste Steigung wird mit 16‰ angegeben. Sie ist so kurz, dass sie wenig relevant ist, weil bei schweren Zügen nie der ganze Zug in der Steigung ist. Die zulässige Achslast beträgt 22 t. Die Geschwindigkeit ist innerhalb des Werks auf 10 km/h und auf den SBB-Zubringergleisen auf 20 km/h begrenzt.

#### 5.1.2 Rangierlokomotiven

Der Rangierdienst wird hauptsächlich mit der 2-achsigen Diesellokomotive Typ T 239 S abgewickelt. Diese Lokomotive wurde von der tschechischen CKD erbaut und gebraucht erworben. Als Reserve ist eine Lok des französischen Herstellers Moyse vorhanden.



**Bild 28: Zweiachsige Dieselerangierlokomotive Typ T 239 S der Ems Chemie AG.**  
Foto: Roger Waller



Dank zwei Fahrpulten kann die Bedienung beidseitig erfolgen. Weil das Werkareal fast nur Linkskurven hat, wird die Lok grundsätzlich vom kurveninneren Fahrpult bedient. Bei Alleinfahrt oder mit einem gezogenen Zug sind die Sichtverhältnisse dank grosser Fensterscheiben sehr gut (siehe Bild 29). Der Vorbau ist klein und stört kaum.

Bei geschobenen Zügen verdecken die Wagen die Sicht nach vorne (siehe Bild 30). Dies ist im Rangierdienst bedeutungslos, weil der Rangierleiter beim geschobenen Zug die Sicht nach vorn durch Mitfahrt auf dem vordersten Wagen übernimmt. Er übermittelt die Fahrbefehle per Funk in den Führerstand. Dabei muss der Rangierleiter den Kontrollton einschalten, bei dessen Ausfall der Lokomotivführer sofort anhalten muss.



**Bild 29: Sicht bei Fahrt ohne Zug bzw. gezogenen Wagen.** Foto: Roger Waller



**Bild 30: Sicht bei Fahrt mit geschobenen Wagen.** Foto: Roger Waller



### 5.1.3 Rangierbetrieb

Zur Analyse des Rangierbetriebs fuhr Roger Waller am 19. Dezember 2008 einen halben Tag lang auf der Diesellokomotive mit. An diesem Freitag war nach Angaben des Personals relativ wenig Betrieb. Abgesehen von der Tonnage waren die Rangierfahrten und der Rangierablauf dennoch typisch und daher aussagefähig. [9]

Um zu prüfen, ob die Rangierarbeit von einer Speicherlokomotive erbracht werden könnte, ohne dass häufig nachgetankt werden müsste, wurde die Rangierarbeit in Tonnen (t) x Kilometer (km) ermittelt, wobei das Lokomotivgewicht mitgerechnet wurde. Die detaillierten Ergebnisse sind im Anhang II protokolliert und in 5.1.4 zusammengefasst.

Der Rangierbetrieb machte einen guten Eindruck. Das Team besteht aus Rangierleiter und Rangierlokführer, die sich abwechseln. Dies ist sinnvoll und könnte beim Betrieb mit Speicherlokomotive beibehalten werden. Eine Funkfernsteuerung wird nicht benötigt.

### 5.1.4 Zusammenfassung der Ergebnisse der Mitfahrt im Rangierdienst

Nach Angaben des Rangierpersonals laufen die Rangierdienste immer ziemlich ähnlich ab. Hingegen gibt es bei den Verkehrsmengen grosse Schwankungen.

Die Wagenzufuhr erfolgt mit zwei SBB-Güterzügen. Diese treffen um ca. 7:15 und 8:40 in Ems ein. Diese Wagen gilt es im Werkareal an die Bestimmungsorte zu rangieren. Die Abfuhr der Wagen erfolgt um ca. 12:15 und 16:00. Bis zu diesem Zeitpunkt müssen die abfuhrbereiten Wagen zum SBB-Übergabegleis rangiert werden. Naturgemäss fallen so die meisten Rangierarbeiten in die Morgenschicht, die von 6:45 bis 12:00 dauert. Anlässlich der Mitfahrt wurden alle Rangierbewegungen notiert:

- zurückgelegte Distanz:	ca. 15 km
- Rangierarbeit:	ca. 1350 tkm
- Einsatzdauer:	3 h 25 min
- Fahrzeit:	1 h 25 min
- Laufzeit Motor:	3 h 05 min (mit aufwärmen: 4 h 15 min)

Die Zahlen sind typisch und bestätigen, dass Dieselmotoren von Rangierlokomotiven die meiste Zeit im Leerlauf verbringen und unnötig Lärm und Abgase produzieren. Eine Speicherlokomotive benötigt nur Energie, wenn sie tatsächlich Arbeit verrichtet.

Die Kapazität der Speicherlokomotive FLC 03 liegt bei rund 4000 tkm, dem dreifachen der gemessenen Rangierarbeit. Dabei ist noch nicht berücksichtigt, dass sich die 4000 tkm auf kontinuierlichen Betrieb beziehen, also ohne das beim Rangieren häufige Ausrollen. Daraus folgt, dass **eine Füllung pro Tag genügt**.

Angaben zum voraussichtlichen Dampfbedarf:

- Dampfbedarf für eine Erstfüllung bis 20 bar:	4.7 t Sattdampf 20 bar
- Maximaler Dampfbedarf im Betrieb bei 4'000 tkm:	2.0 t Sattdampf 20 bar
- Dampfbedarf entsprechend dem Rangierbetrieb am 19.12.09:	0.7 t Sattdampf 20 bar

Eine Tonne Dampf kostet 30.- CHF. Die Energiekosten betragen je nach Intensität des Rangierbetriebs 20.- bis 60.-CHF pro Tag. Das ist deutlich weniger als beim Dieselmotorenbetrieb. Ein genauerer Vergleich ist leider nicht möglich, weil die Firma EMS Chemie ihre betriebsinternen Zahlen nicht bekanntgeben wollte.



### 5.1.5 Dampfquelle: Axpo Tegra AG

Die TEGRA Holz & Energie AG produziert seit 2006 Strom, Wärme und Prozessdampf mit Biomasse (Kraft-/Wärmekoppelung). Das Werk ist ideal erschlossen durch die Bahn mit Normalspur der SBB und Meterspur der RhB. Der Autobahnanschluss liegt sehr nah. Das inzwischen der Axpo AG gehörende Werk liefert **Strom** ins öffentliche Netz und **Prozesswärme**, vor allem an die EMS Chemie AG.



**Bild 31: Die Anforderungen an die Biomasse-Brennstoffe sind bei Dampfanlagen minimal; was brennt, kann verfeuert werden. Bei Biogas ist dies wesentlich heikler.** Bild aus dem Internet

Die Kraftwerksanlage verfügt über drei Blöcke mit einer gesamten installierten Leistung von 82 MW. Sie ist eine der grössten ihrer Art in Europa, die mit naturbelassener hölzerner Biomasse arbeitet. Sie kann aus 220'000 t Holzschnitzel und 30'000 t Altholz maximal rund 128'000 MWh Strom und 220'000 MWh Heizenergie produzieren [10].

Der Kesseldruck in allen drei Blöcken beträgt 70 bar. Die Dampfdaten am Eintritt der Gegendruckturbinen betragen 64 bar und 480 °C. Für die Versorgung mit Dampf gibt es zwei Druckstufen:

- Hochdruck: 70 bar
- Niederdruck: 25 bar (bei TEGRA als Mitteldrucknetz bezeichnet)

Für Speicherfahrzeuge sind Hochdruck- und Mitteldrucknetz verwendbar. Für Mitteldruckdampf existiert ein umfangreiches Verteilnetz im Werk der EMS Chemie, sodass sich eine Ladestation für die Speicherlokomotive fast überall rasch und günstig installieren liesse. Für Hochdruckdampf wäre der Aufwand etwas höher.





**Bild 32: Pneulader für den werksinternen Verkehr. Solche das Werkareal nie verlassenden, grossen Arbeitsgeräte sind prädestiniert für die Speichertechnik, zumal sie an Ort und Stelle mit Abfalldampf aus der Kraft-Wärme-Koppelung aufgeladen werden können. Bild aus dem Internet**



**Bild 33: Der Einsatz von Dieselfahrzeugen in Hallen, Tunnels usw. ist wegen der Abgase immer problematisch. Die abgasfreie Dampfspeichertechnik wäre hier die Lösung. Bild aus dem Internet**

Das **Bundesamt für Energie BfE** verlieh der Axpo Tegra AG 2008 den **Prix Watt d'Or** in den Kategorien **Energietechnologien** und **Erneuerbare Energien**.

Aufgrund des Erfolges der Anlage in Ems plant die Axpo ein weiteres Holzkraftwerk mit Kraft-Wärme-Koppelung in Kaiseraugst (AG). Die definitive Baubewilligung liegt vor.

**Die Voraussetzungen für den Einsatz von Speicherlokomotiven und Speicherverfahrzeugen sind bei der EMS Chemie AG und der AXPO TEGRA AG dank der unmittelbaren Nähe der mit Biomasse und Kraft-Wärme-Koppelung betriebenen Dampfzentrale ideal.**



## **5.2 Migros Suhr**

### **5.2.1 Schienennetz**

SBB Cargo bedienen von Suhr aus die Werkareale in Suhr und in Lenzburg. Beide Bahnhöfe und die Bahnlinie dazwischen sind elektrifiziert, die Anschlussgleise nicht. Der Bericht konzentriert sich auf Suhr. Die Gleispläne von Suhr sind im Anhang IV zu finden.

### **5.2.2 Zusammenfassung der Ergebnisse der Mitfahrt im Rangierdienst**

Am Dienstag, den 19. Februar 2013 fuhren Martin Schneider (ZHAW) und Roger Waller (DLM) während einer Rangiertour im **Wynenfeld** auf den Eem 923 010 und 002 mit. Wir wurden freundlich begrüsst und erhielten eine kurze Instruktion zur Sicherheit.

Der Rangierbetrieb machte einen guten Eindruck. Das Team bestehend aus Rangierleiter und Rangierlokführer ist gut eingespielt. Zuerst wurden 12 Kühlwagen mit Dieselöl betankt; eine typische Rangieraufgabe: Ersten Wagen betanken, Zug um einen Wagen vorziehen, zweiten Wagen betanken, Zug um einen Wagen vorziehen usw., 12-mal. Bei Diesellokomotiven entstehen so die Stillstandsverluste, weil die Dieselmotoren jeweils durchlaufen. In Suhr konnten die ersten acht Wagen elektrisch vorgezogen werden. Danach musste der Dieselmotor gestartet werden, weil das zu befahrende Auszugsgleis nicht elektrifiziert ist. Das umstellen von elektrischer Traktion auf Dieselbetrieb erfolgt weitgehend automatisch und ist während der Fahrt möglich. Der Lokomotivführer muss aber daran denken, den Stromabnehmer zu senken, bevor die Fahrleitung zu Ende ist. Weil pro Stunde mehrmals umgeschaltet wird, kann das schon mal vergessen werden.

Es folgten Zustell- und Abfuhrfahrten vom Bahnhof zum Wynenfeld, wobei mehrmals in die Halle der Migros-Verteilzentrale gefahren wurde. Meistens werden 11 bis 12 Wagen in die Halle geschoben bzw. aus der Halle gezogen. Die detaillierten Rangierbewegungen sind im Anhang III tabellarisch aufgeführt.

Die Fahrzeuge sind standardmässig mit einer Funkfernsteuerung ausgerüstet, die aber weder in Suhr noch in Lenzburg verwendet wird.





**Bild 35: Blick aus dem Führerstand auf das Rangierareal Wynenfeld. Links die Migros-Verteilzentrale mit den orangefarbenen, automatischen Einfahrtstoren. Die drei gelben Tafeln mit den schwarzen Balken rechts im Bild markieren das Ende der Fahrleitung. Foto: Roger Waller**

Die Eem 923 haben einen Bordcomputer, der die ab Fahrdrabt bezogene Energie misst. Unser Lokführer hat die Daten an mehreren Tagen über je eine Dienstschicht notiert:

<b>Datum</b>	<b>27.02.2013</b>	<b>28.02.2013</b>	<b>01.03.2013</b>	<b>02.03.2013</b>
Dauer	14:00 – 21:00	14:00 – 21:00	14:00 – 20:00	12:00 – 18:00
<b>Strombezug</b>	<b>204 kWh</b>	<b>189 kWh</b>	<b>174 kWh</b>	<b>149 kWh</b>
Hilfsenergie	-35 kWh	-35 kWh	-30 kWh	-30 kWh
Traktionsenergie	169 kWh	154 kWh	124 kWh	119 kWh
<b>Arbeit am Rad</b>	<b>135 kWh</b>	<b>123 kWh</b>	<b>99 kWh</b>	<b>95 kWh</b>
<b>Dieselvebrauch</b>	<b>? l</b>	<b>34 l</b>	<b>17 l</b>	<b>13 l</b>
<b>Motorlaufzeit</b>	<b>2 h</b>	<b>3 h</b>	<b>3 h</b>	<b>1 h</b>
<b>Parcours</b>	<b>34 km</b>	<b>34 km</b>	<b>28 km</b>	<b>23 km</b>

Der Energieverbrauch ab Fahrleitung enthält auch den Strombedarf aller Hilfsenergien wie Druckluft-Kompressor, Kühlung des Transformators, der beiden Stromrichter, der beiden Fahrmotoren, Klimaanlage mit Heizung und Lüftung, Bordcomputer, Batterieladung, Zugsicherung, Beleuchtung usw. Für diese Hilfsenergie muss mit ca. 3 bis 8 kWh pro Stunde gerechnet werden. Der Traktionswirkungsgrad von der Fahrleitung zum Rad wird vom Hersteller mit ca. 80% angegeben.

Daraus folgt, dass **eine Füllung pro Schicht für die Speicherlokomotive genügt.**



### 5.2.3 Rangierlokomotiven

Entgegen den Erwartungen und von sich aus äusserte sich das Personal einhellig negativ zu den neuen Hybridlokomotiven. Die Kritik war sachlich und berechtigt. Die Beurteilung einzelner Lokomotivtypen ist aber nicht Teil der Studie. Es werden daher nur jene Punkte erwähnt, die für das Pflichtenheft der Speicherlokomotive wichtig sind.

**a) Mangelhaftes Adhäsions- und Bremsvermögen.** Dies war die Hauptkritik des Lokpersonals und ist sicherheitsrelevant. Ein Vergleich mit den zuvor eingesetzten Rangierlokomotiven zeigt das Problem:

Lokomotivtyp	Achsformel	Dienstmasse	Anfahrzugkraft	Reibwert	Leistung
Am 843	B' B'	80 t	249 kN	0.317	1500 kW
Em 3/3 841	C	54 t	175 kN	0.330	750 kW
Eem 923	Bo	45 t	150 kN	0.340	1500 kW

Die Am 843 und die Em 3/3 841 haben verkuppelte Antriebe, d.h. die Achsantriebe sind mechanisch verbunden. Das ist bei Rangierlokomotiven üblich, weil verkuppelte Antriebe weniger zum Schleudern neigen als Einzelachsenantriebe. Um beim Einzelachsenantrieb eine vergleichbar gute Zugkraftübertragung zu erreichen, braucht es eine ausgeklügelte Regeltechnik, speziell wenn man bei der Auslegung mit dem Reibwert an die absolute Grenze geht. Selbst dann kann die maximale Anfahrzugkraft von 150 kN nur bei idealen Reibungsverhältnissen übertragen werden. Dasselbe gilt für die Leistung. Bei schlechtem Wetter, nassen oder schmierigen Schienen lassen sich die angegebenen Werte nicht, bzw. nur mit dauerndem Sanden (im Weichenbereich verboten) auf die Schienen übertragen.

**b) Schlechte Sicht.** Das Lokpersonal moniert die schlechte Sicht beim Anfahren an den Zug. Von etwa vier Metern an bis zum Pufferkontakt ist der Rangierer vom Führerstand aus nicht mehr zu sehen. Bei der Eem 923 wird die zulässige Breite ausgenützt und es gibt keinen Umlauf. Auch der Aufstieg zum Führerstand mit der stark zurückgesetzten untersten Stufe ist gewöhnungsbedürftig (siehe Bild 7).

**c) Häufiges Umstellen der Traktionsart.** Dieser Punkt wurde vom Lokpersonal (noch) nicht kritisiert, aber der ständige Wechsel der Traktionsart kann auf Dauer nicht befriedigen und wird zu erhöhten Unterhaltskosten führen. Es mag sinnvoll sein, elektrisch nach Lenzburg zu fahren, die Anschlussgleise im Dieselbetrieb zu bedienen und wieder elektrisch zurück zu fahren, aber die kurzen Fahrten zu den Anschlussgleisen im Wynenfeld erfordern ein (zu) häufiges umstellen. Bei jedem Wechsel auf Dieselbetrieb wird der elektrische Hauptschalter ausgeschaltet, der Dieselmotor gestartet und der Stromabnehmer gesenkt, beim Wechsel auf elektrische Traktion erfolgt dasselbe in umgekehrter Reihenfolge.

Insgesamt erachten wir die Hybridtechnik wegen ihrer Komplexität für den rauen Rangierbetrieb als wenig geeignet. **Die Geschichte komplexer Fahrzeuge lehrt, dass die Einsparungen bei den Betriebskosten in der Regel durch höhere Unterhaltskosten zunichte gemacht werden.**



### 5.2.5 Dampfquelle: KVA Buchs (AG)

Die KVA verfügt über zwei Ofenlinien, von denen hier nur die Ofenlinie 1 betrachtet wird. Die Fernwärme wird von der Fernwärme Wylerfeld AG an verschiedene Verbraucher verteilt, siehe Schema im Bild 37. Bemerkenswert ist, dass mit Ausnahme des Kantons-  
spitals alle Industrieverbraucher an die Dampfleitung und nicht nur an die Heisswasser-  
leitung angeschlossen sind. Wie aus den technischen Daten ersichtlich ist, wird die  
Dampfleitung mit 22 bar und 280 °C gespeist, ideal für die Speicherlokomotive.



**Bild 36:** Die Kehrichtverbrennungsanlage in 5022 Buchs [www.kva-buchs.ch](http://www.kva-buchs.ch) im Kanton Aargau ist nicht zu verwechseln mit der KVA in 9470 Buchs im Kanton St. Gallen. Bild aus dem Internet

#### Technische Daten:

##### **Verbrennungsanlage    Ofenlinie 1**

Kehrichtdurchsatz	8,0 t/h
Dampfleistung	32 t/h
Dampfdaten	40 bar, 400 °C
Gesamtkapazität	120'000 Tonnen/Jahr

##### **Fernwärmeversorgung**

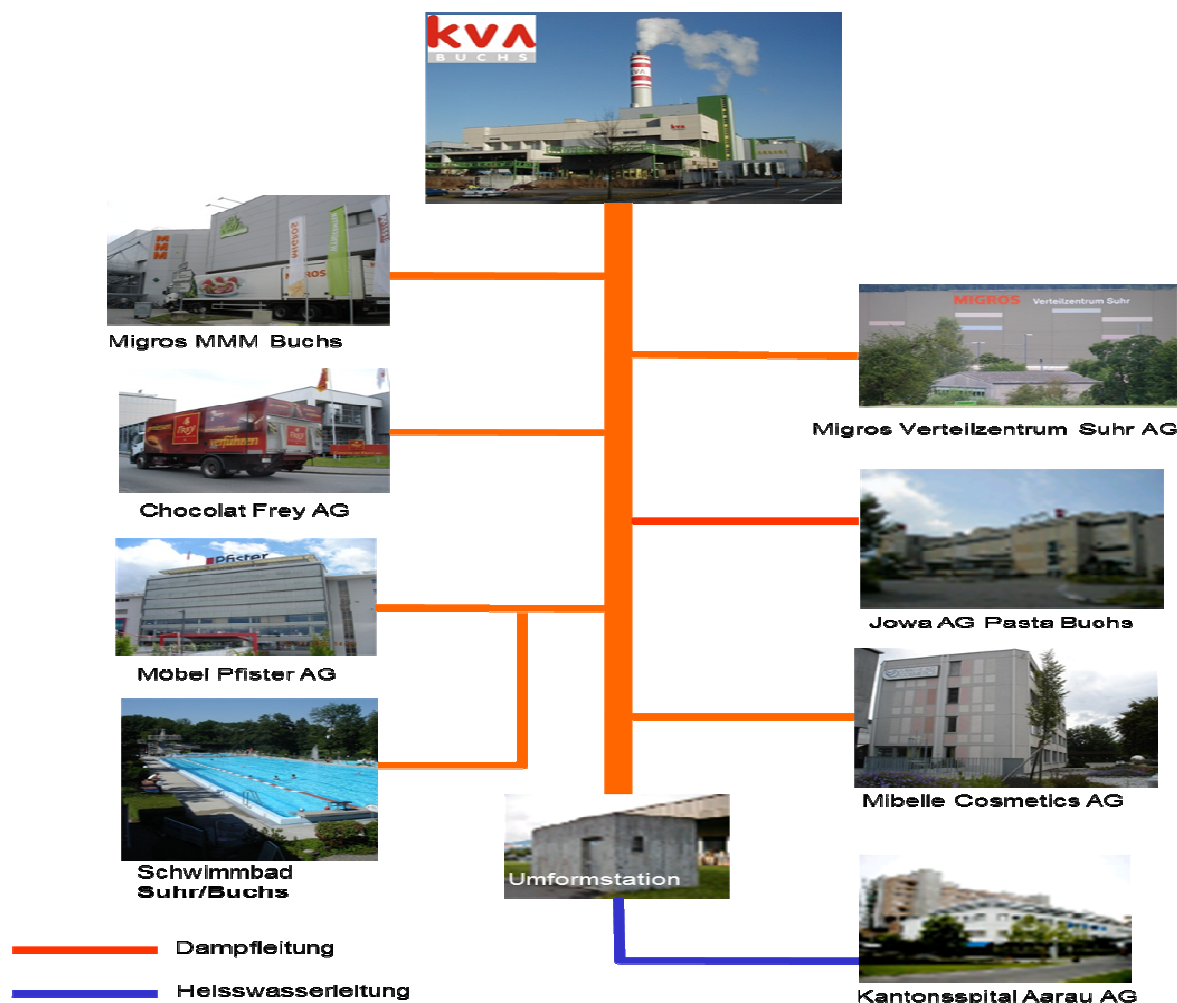
Dampfdaten	22 bar, 280 °C
Wärmeleistung	max. 18 MW
Wärmeabgabe	68'000 MWh pro Jahr

##### **Stromproduktion**

Turbogruppe	Entnahme-Kondensationsturbine
Leistung	max. 11 MW elektrisch
Frischdampfdaten	40 bar, 400 °C / 0,2 bar, 40 °C
Entnahmen bei	22 bar und 2,7 bar
Strom ans Netz	45 Mio. kWh pro Jahr



## 5.2.6 Dampfverteilnetz der FEWAG Fernwärme Wynenfeld AG



**Bild 37: Das 22 bar Dampfleitungsnetz der KVA Buchs.** Schema: [www.kva-buchs.ch](http://www.kva-buchs.ch)



**Bild 38: Die 22 bar Dampfleitungen für die Prozesswärme verlaufen teilweise unmittelbar neben dem Industriegleis. Eine Füllstation könnte mit wenig Aufwand realisiert werden. Siehe auch Anhang V.**  
Foto: Roger Waller

**Die Voraussetzungen für den Einsatz von Speicherlokomotiven und Speicherverkehrsfahrzeugen sind in Suhr dank der unmittelbaren Nähe der mit Abfall und Kraft-Wärme-Koppelung betriebenen Kehrlichtverbrennungsanlage ideal.**



## 6. Dampferzeugung

Die Herstellung von Dampf kann mit jeder beliebigen Energieform erfolgen. Dies ist ein wesentlicher Systemvorteil der Dampftechnik.

### 6.1 Abwärme

Abwärme ist jene Wärme, die nach Verrichtung von Arbeit ungenutzt an die Umgebung abgegeben wird. **Bei der Nutzung von Abwärme fallen keine direkten Energiekosten an!** Aus der Fülle von Abwärmequellen wird hier auf drei Beispiele näher eingegangen:

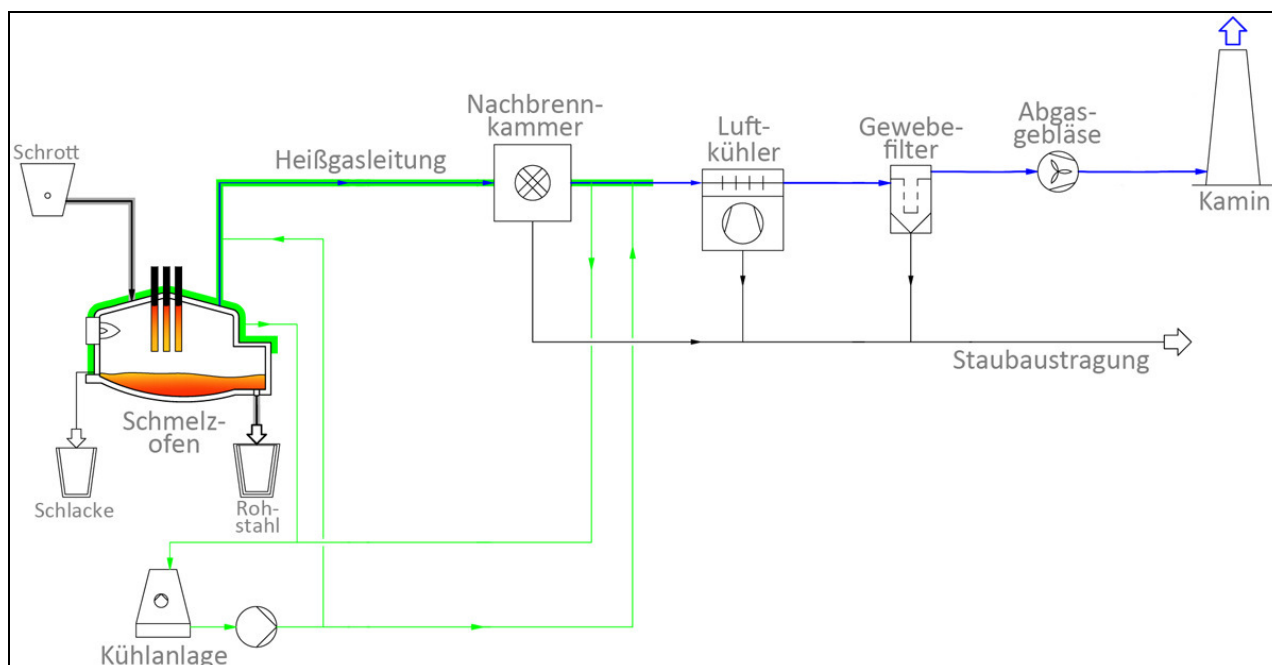
#### 6.1.1 Stahlwerke

Die bei der Stahlherstellung entstehende Abwärme wird noch kaum genutzt, u.a. weil sie nicht kontinuierlich anfällt. Auch bei den Temperaturen gibt es grosse Schwankungen. Durch die Kombination eines Abhitzeessels mit einem Heisswasserspeicher könnte die Abwärme grösstenteils sinnvoll genutzt werden.

Weil die Herstellung von Stahl sehr energieintensiv ist, entsteht auch eine grosse Menge Abwärme. Die Produktion einer Tonne Stahl erfordert rund 400 kWh an elektrischer Energie. Davon fallen 15 bis 35% Abwärme an, also 60 bis 140 kWh pro Tonne. Pro Jahr produzieren:

- Kleinere Stahlwerke : 3 bis 10 Mio. t Stahl ► 180 bis 1'400 GWh Abwärme
- Mittलगrosse Stahlwerke: 10 bis 30 Mio. t Stahl ► 600 bis 4'200 GWh Abwärme
- Grosse Stahlwerke: 30 bis 90 Mio. t Stahl ► 1800 bis 12'600 GWh Abwärme

**Es besteht hier ein riesiges Potential für die Speichertechnik mit Gratisenergie!**



**Bild 39: Vereinfachtes Schema eines Stahlwerkes. Die Wärme für das Schmelzen des Stahls wird elektrisch über Elektroden zugeführt, die Abwärme wird über die Heissgasleitung abgeführt.**

Bild aus dem Internet



### 6.1.2 Verbrennungsmotoren

Bei Verbrennungsmotoren gilt die Faustregel:

- 1/3 Nutzleistung
- 1/3 Abwärme in den Auspuffgasen
- 1/3 Abwärme im Kühlwasser

Die Abwärme im Kühlwasser ist wegen der niedrigen Temperatur schwierig zu nutzen, aber die Abgase mit Temperaturen von 400 bis 600 °C eignen sich gut für eine Sekundärnutzung. Solange das Öl billig war, kümmerte sich niemand um die Nutzung von Abwärme. Neuerdings wird für Autos und Lastwagen jedoch intensiv daran geforscht. Bei Verbrennungsmotoren, die stationär im Dauerbetrieb laufen, kann die Abwärme sehr gut und günstig für die Speichertechnik verwendet werden.

### 6.1.3 Fackelgas von Raffinerien

Heutzutage wird Gas von Ölbohrungen, Bohrinseln, Raffinerien, petrochemischen und chemischen Anlagen sowie Mülldeponien und Müllaufbereitungsanlagen als sogenanntes Fackelgas verbrannt. **Durch abfackeln wird wertvolle Energie ungenutzt verbrannt.** Mit einer Kombination von Kessel und Heisswasserspeicher liesse sich diese unregelmässig anfallende Energie zur Dampfproduktion nutzen, um anschliessend Speicherfahrzeuge zu laden.



**Bild 40: Hochfackel in einer Raffinerie.** Foto: Robert Pfiffer, Burghausener Anzeiger



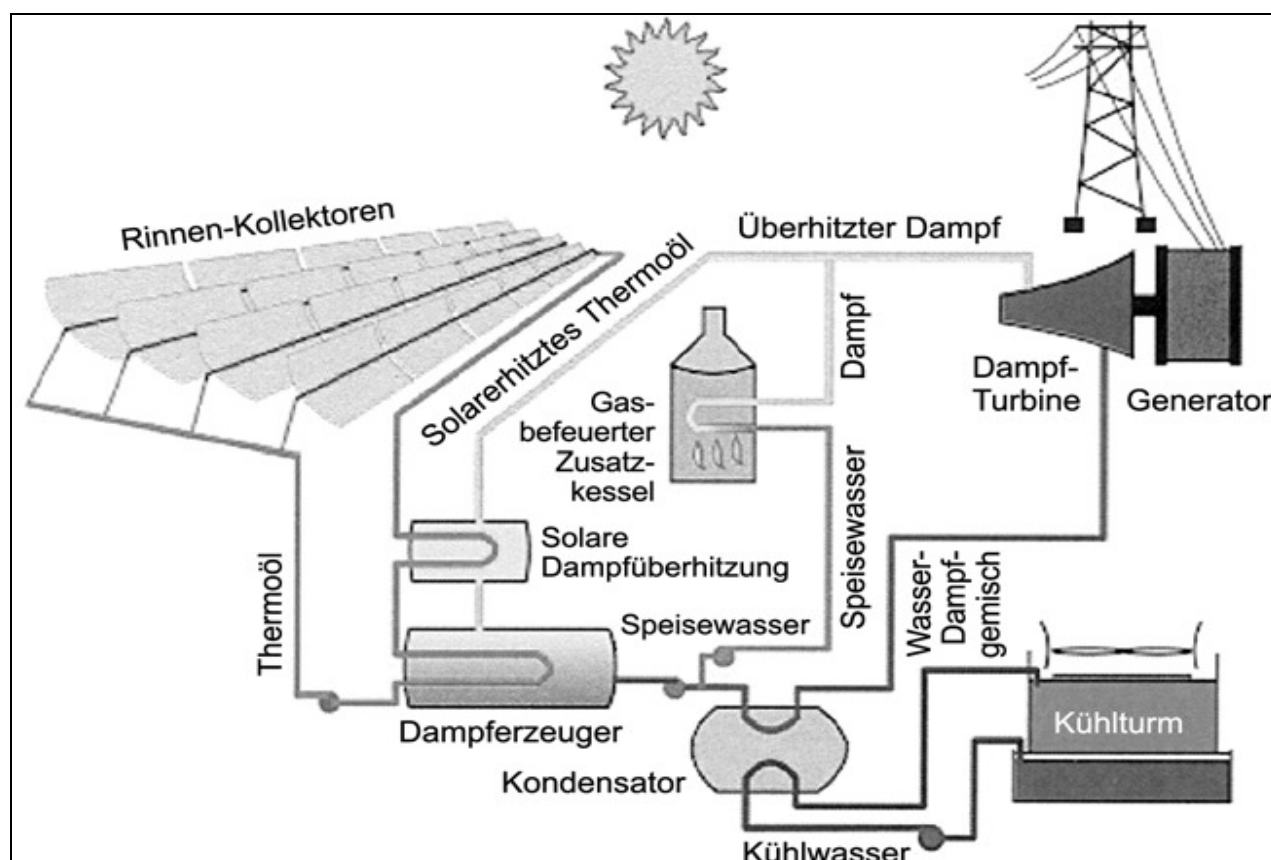
## 6.2 Geothermie

Seit Jahrzehnten betreiben Island und Neuseeland erfolgreich Geothermie-Kraftwerke. Die Fortschritte in der Tiefbohrtechnik erlauben es künftig auch anderen Ländern, die Erdwärme zu nutzen. Alternativ oder ergänzend kann diese, abgesehen von Investitions- und Unterhaltskosten frei erhältliche Energie, die zudem bereits in Dampfform zum Boden heraus kommt, für Speicherfahrzeuge genutzt werden.

Eine Studie des Paul Scherrer Instituts PSI von 2005 schätzt das theoretische Potenzial für die Nutzung von Geothermie in der Schweiz in einer Tiefe von 3 bis 7 km auf etwa 15'900'000 TWh<sub>th</sub>. Mit einem Gewinnungsfaktor von 4 % und einem Wirkungsgrad bei der Stromproduktion von rund 10 % kann somit eine potenzielle totale Elektrizitätsgewinnung von rund 63'700 TWh<sub>el</sub> angenommen werden. Beim gegenwärtigen Stromverbrauch von 59 TWh<sub>el</sub> pro Jahr in der Schweiz würde dies für 1000 Jahre reichen! Es wäre also auch noch mehr als genügend Wärme zur Verfügung um beliebig viele Speicherfahrzeuge zu betreiben.

## 6.3 Solarthermie

Die **Parabolrinnenkollektoren erzeugen den Dampf emissionsfrei**. Im Solarteil wird in Absorberrohren mit Thermoöl eine Temperatur von etwa 400°C durch Parabolspiegel erreicht. Diese Wärme wird über einen Wärmetauscher in den Wasser–Dampf–Kreislauf eines konventionellen Dampfkraftwerkes eingekoppelt, siehe Schema.



**Bild 41: Dampferzeugung mittels Parabolrinnenkollektoren zur Stromerzeugung.** Quelle [12]



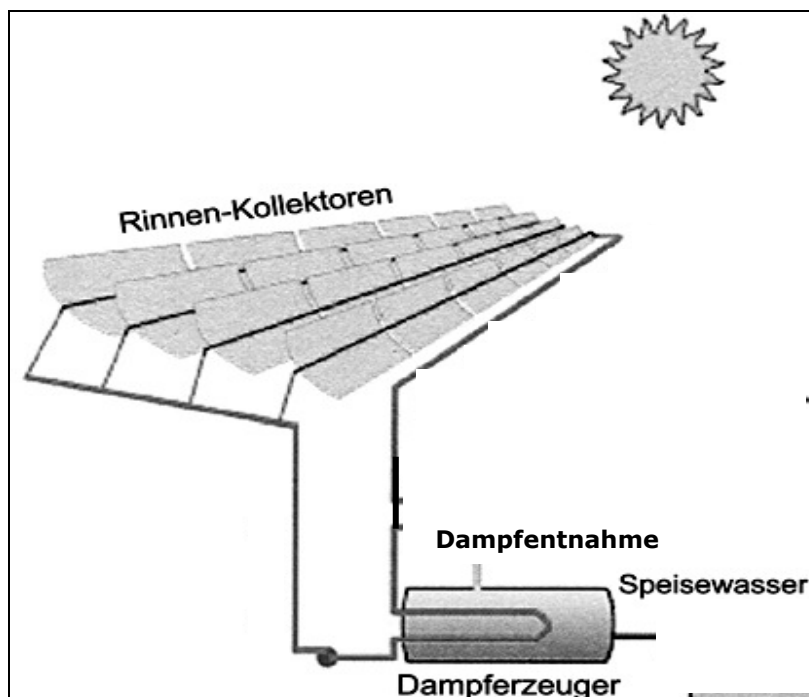
An einem Einkreisssystem mit Wasser als Wärmeträger wird gearbeitet. In Almería in Spanien gibt es seit 1999 eine Testanlage von 1,3 MW<sub>th</sub>. Die Vorteile sind:

- Reduktion des Anlagenaufwandes durch Wegfall aller Komponenten des Ölkreislaufs
- Steigerung der Prozesstemperatur durch Wegfall des auf 400 °C limitierten Thermoöls
- Verringerung des Eigenleistungsbedarfs durch Wegfall der Ölumwälzung.

Eine 354 MW-Anlage erreicht bei der Umwandlung von Sonneneinstrahlung in Strom Gesamtwirkungsgrade von über 20% im Sommer und über 14% im Jahresdurchschnitt. Der thermische Wirkungsgrad des Solarfeldes liegt bei 50%. [12]

Der Dampf für die Speicherfahrzeuge kann nach Teilexpansion an der Dampfturbine (Entnahme-Kondensationsturbine) oder direkt am Dampferzeuger entnommen werden.

Wie aus dem Schema Bild 41 ersichtlich, lohnt sich der Aufwand nur für grosse Anlagen. Würde der solarthermisch produzierte Dampf für Speicherfahrzeuge allein erzeugt, vereinfachte dies die Anlage enorm, da der gesamte Kraftwerksteil und der Thermoölkreislauf entfallen. Dadurch liessen sich auch kleinere Anlagen wirtschaftlich realisieren.



**Bild 42: Dampferzeugung mittels Parabolrinnenkollektoren für Speicherfahrzeuge.** Quelle [12] / DLM

Ob sich die Nutzung der Solarthermie in der mit langer Sonnenscheindauer nicht immer gesegneten Schweiz wirtschaftlich lohnen kann, müsste genauer abgeklärt werden, als dies im Rahmen dieser Studie möglich ist. An ungenutzten Flächen auf Flachdächern würde es jedenfalls nicht mangeln.



## **6.4 Windenergie**

Dank der Förderprogramme schiessen Windkraftanlagen wie Pilze aus dem Boden. In Deutschland beträgt der Anteil der Windenergie bei der Stromproduktion bereits 10%. [13].



**Bild 43: Windpark bei Poppenwurth, Dithmarschen. Man beachte auch die Anlagen im Hintergrund.**  
Foto: Dirk Ingo Franke.

Die Windenergie ist zwar „gratis“, fällt aber unregelmässig und unzuverlässig an. Auch befinden sich die besten Lagen für die Windenergie selten dort, wo die Energie benötigt wird, sodass der erzeugte Strom teils über riesige Distanzen (mit entsprechenden Energieverlusten) transportiert werden muss. Wegen der Fluktuationen der Windenergie sind „Stromspeicher“ notwendig, wofür in grossem Massstab derzeit nur Pumpspeicherwerke zur Verfügung stehen. Die Energiebilanz ist relativ schlecht, wie nachstehendes Beispiel zeigt:

- Im Windpark an der Nordsee produzierter Strom: 100%
- Transformations- und Übertragungsverluste Ostsee – Schweizer Alpen: 10%
- Gesamtwirkungsgrad des Pumpspeicherwerks: 80% [14].
- Transformations- und Übertragungsverluste Schweizer Alpen - Ruhrgebiet: 6%

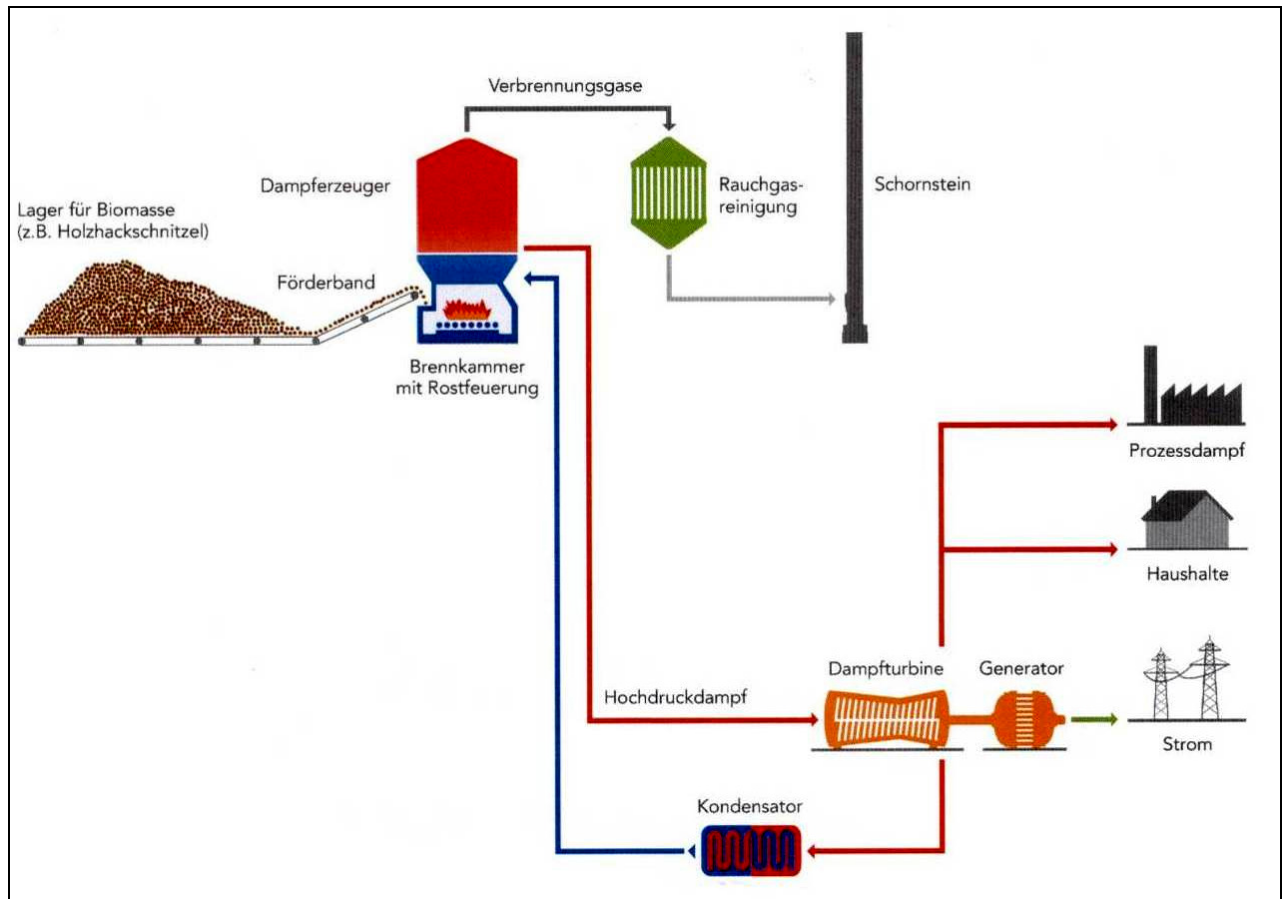
Von den 100% bleiben noch rund 68% zur Nutzung, der Rest wurde sinnlos „verheizt“, zumindest energetisch betrachtet. Finanziell kann sich dieses Unterfangen mangels Alternativen durchaus lohnen. Die „Vernichtung von Energie“ ist aber nicht der einzige Nachteil, denn dieser doppelte Stromtransport be- bzw. überlastet das bestehende Stromnetz. Strom- und Elektrokonzerne wittern bereits ein grosses Geschäft mit der Erstellung von sogenannten Stromautobahnen. Sinnvoller wäre es allerdings, die Energie lokal zu nutzen. Der von den Windanlagen produzierte Strom kann praktisch verlustfrei in Elektrokesseln zur Dampfproduktion genutzt werden, wobei auch hier ergänzend Heisswasserspeicher zum Ausgleich der Schwankungen der Windenergie benötigt werden.

Die Wirtschaftlichkeit der Nutzung von Windenergie in der Schweiz müsste genauer abgeklärt werden, als es im Rahmen dieser Studie möglich ist.



## 6.5 Kraft-Wärme-Koppelung

Bei der Kraft-Wärme-Kopplung wird ein Teil des mittels Brennstoff produzierten Dampfes in einem Kraftwerk für Heizzwecke ausgekoppelt. Dadurch sinkt zwar der Wirkungsgrad der Strom-Erzeugung (Elektro-Energiegewinnung); der Gesamtnutzungsgrad steigt aber auf bis zu 90 %.



**Bild 44: Vereinfachtes Funktionsschema eines Kraftwerkes mit Kraft-Wärme-Koppelung. Der Dampfturbine werden nach der Stromerzeugung Teilströme des noch nicht vollständig expandierten Dampfes für Prozessdampf und Fernwärme abgezweigt.** Schema aus dem Internet

Ein weiterer Vorteil der KWK liegt in der Möglichkeit der dezentralen Energieversorgung mittels Blockheizkraftwerken. Grundsätzlich können KWK-Anlagen nach folgenden Gesichtspunkten geführt werden, die dem Bedarf der Verbraucher anzupassen sind:

- *Wärmegeführt:* Hauptaugenmerk liegt auf Wärme, Strom fällt als „Nebenprodukt“ an
- *Stromgeführt:* hauptsächlich wird Strom erzeugt, Wärme ist „Nebenprodukt“.

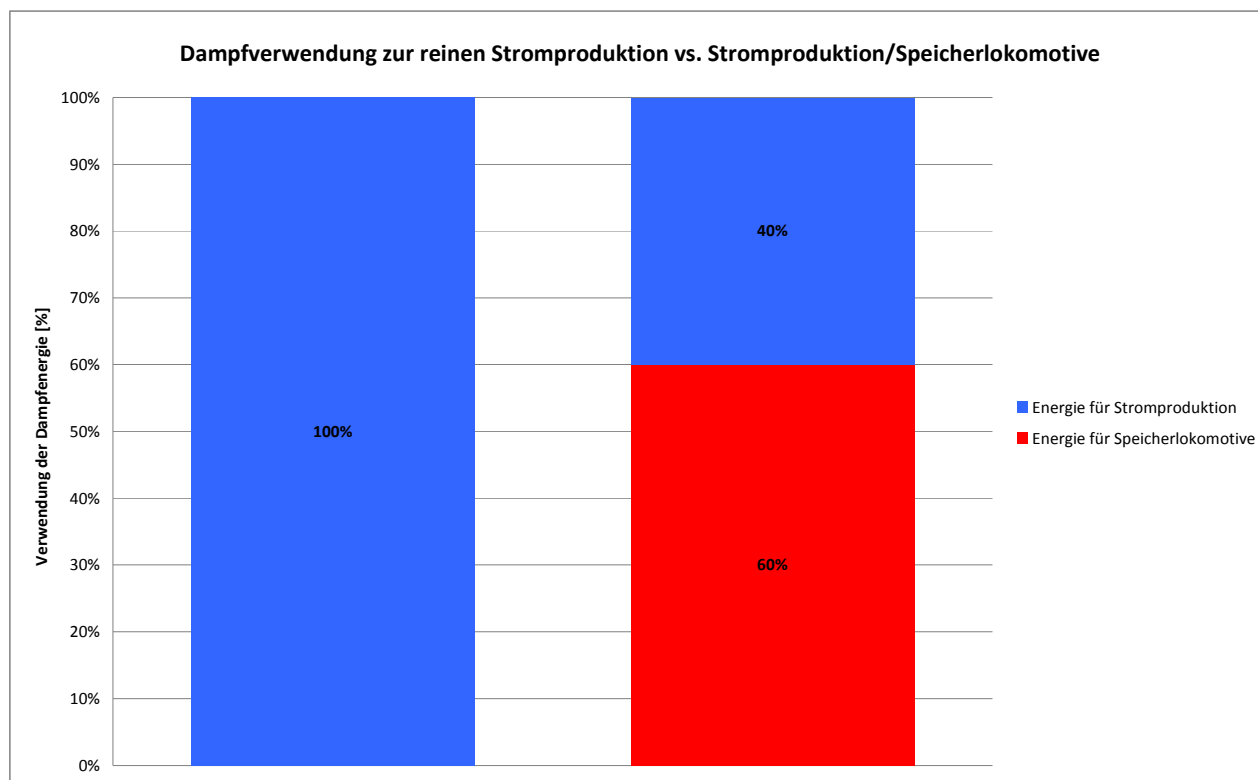
Wie im Schema vereinfacht dargestellt, erfolgt die Wärmeentnahme meistens in zwei Stufen:

- Prozessdampf für die Industrie, typischerweise mit einer Dampfleitung von 20 bar
- Fernwärme für die Haushalte, typischerweise mit einer Heisswasserleitung

Speicherfahrzeuge würden ihren Dampfbedarf von der Prozessdampfleitung beziehen. Der Druck von 20 bar ist ideal für Niederdruckspeicherfahrzeuge.

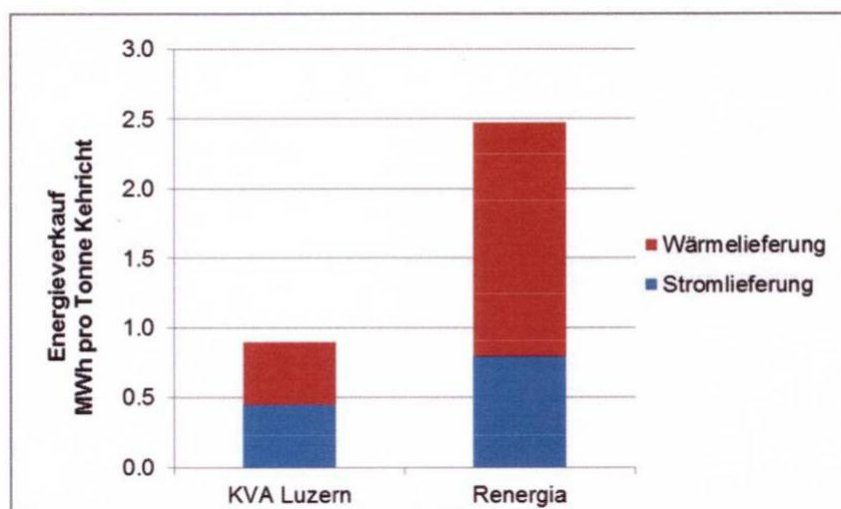


Die nachfolgende Grafik zeigt die Dampfnutzung bei reiner Stromproduktion (linkes Balkendiagramm) im Vergleich zur Dampfnutzung bei Kraft-Wärmekoppelung am Beispiel des Grosskraftwerkes Mannheim GKM. Die Verhältnisse sind rein qualitativ in Prozenten. Bei quantitativer Betrachtung des Dampfmassenstroms von mehr als 2000 t/h allein beim Block 9 [15] ist der für die Ladung der Speicherlokomotiven beanspruchte Anteil von rund 1 bis 2 t/Tag vernachlässigbar.



**Bild 45: Quantitative Dampfverteilung bei Kraft-/Wärme-Koppelung:** Grafik: Martin Schneider ZHAW

Gemäss telefonischer Auskunft von Herrn Frank Kraus des GKM betragen die Kosten für eine Dampffüllung der Speicherlokomotive werksintern nur 3 Euro! Das würde nur gerade für zwei Liter Diesel reichen und damit könnte kein Tag lang rangiert werden.



**Bild 46: Kraft-/Wärme-Koppelung an den Beispielen der Kehrichtverbrennungsanlage Luzern und beim Projekt Renergia in Perlen.** Quelle: [16]



## 7. Energiebilanz

Die Gesamtenergiebilanz ist eine Funktion der Energiebilanz für die **Dampferzeugung** und des **Dampfverbrauchers**, hier des Speicherfahrzeugs. Bei Diesel- und Elektrotraktion ist eine sinnngemässe Bilanzierung auf Basis der **Primärenergie** notwendig.

Leider neigt die marketingorientierte Industrie zu selektiver Betrachtung. Es gibt praktisch keine korrekte Energiebilanz und Wirtschaftlichkeitsrechnung für Dampf- und Elektrotraktion. Alte Dampflokomotiven wurden mit neusten Elektrolokomotiven verglichen, ohne den Altersunterschied zu berücksichtigen. Die Kapital- und Unterhaltskosten der Fahrleitungen wurden den Infrastruktur- statt den Betriebskosten zugeordnet.

Bei den Förderern der Elektromobilität beliebt ist die direkte Umrechnung des Fahrzeug-Stromverbrauchs in Liter Dieselöl oder Benzin, wobei die Energie für die Stromerzeugung „vergessen“ wird. Mit falschen Zahlen kann man die Welt nicht verbessern.

Hersteller von Verbrennungsmotoren messen den Verbrauch und den Wirkungsgrad der Motoren auf dem Prüfstand und publizieren den Bestpunkt des Kennlinienfeldes. Das kann korrekt sein, ist aber für viele Anwendungen nicht repräsentativ.

Die Wirkungsgradbetrachtungen sind nur bei stationärem Betrieb aussagefähig, z.B. bei Kraftwerken. Im Transport haben sie im Schiffs- und Flugverkehr eine gewisse Relevanz, wenn weitgehend konstante Lastverhältnisse herrschen. Im Strassen- und Schienenverkehr ist dies nicht der Fall. Beim Strassenverkehr wird der Verbrauch deshalb in Litern pro Kilometer gemessen. Auch bei der Eisenbahn ist der Wirkungsgrad nicht relevant:

### Entladen von Tonerde-Zügen im Martinswerk Bergheim



- Entladezeit des Zuges: 4 Stunden
- Laufzeit des Dieselmotors: 4 Stunden    => **Leerlaufanteil: 95%**
- Dieserverbrauch: 64 l = 640 kWh                      Kosten: ca. 90.- Euro
- Schmierölverbrauch: 7 l                                      Kosten: ca. 20.- Euro
- Rangierarbeit ca. 10 kWh                                      => **Wirkungsgrad: 1.6%**

**Energiekosten Diesellokomotive für 10 kWh: 110.- Euro**

**Energiekosten Speicherlokomotive bei GKM für 10 kWh: 1.- Euro**

**Bild 47: Beim Entladen von Zügen schneiden die Diesellokomotiven besonders schlecht ab.**  
Folie: DLM AG, Foto: Roger Waller



Einen wesentlichen Einfluss auf die Energiebilanz hat die **Transportlogistik**. Während es früher selbstverständlich war, für Transporte von A nach B die kürzeste Route zu wählen, folgt die Transportbranche heute anderen Gesetzen. Bei der Eisenbahn hat man die Zahl der Rangierbahnhöfe stark reduziert, mit dem Resultat, dass vermehrt Umwege gefahren werden, die teilweise ein Mehrfaches der direkten Distanz betragen. Zitat aus dem Umweltbericht für das Projekt **Rennergia** [16]: Kraftwerk zur Rückgewinnung von Energie aus Abfall in Perlen:

Die Distanzen für Kehrtrichttransporte von maximal rund 50 km sind für Schienentransporte eher zu kurz. Dies ist an den Fahrstrecken ablesbar, die rund dreimal länger sind. Entsprechend ergeben sich lange Umlaufzeiten, der logistische Aufwand ist gross. [16, Seite 29]

Für die Prognose der Verkehrszahlen wird angenommen, dass sämtliche Transporte von und zur neuen Kehrtrichtverbrennungsanlage per LKW erfolgen. [16, Seite 35]

Im Umweltbericht nicht erwähnt ist die Variante mit Direkttransport und Speichertechnik, denn die Verfasser kannten diese Möglichkeit gar nicht. Würde die Transportlogistik mit Speicherlokomotiven direkt, also ohne die Umwegfahrten der SBB, ausgeführt, liessen sich rund 200 Lastwagenfahrten pro Tag ersetzen. Ein Bahnanschluss ist vorhanden und auch Dampf für die Füllungen der Speicherlokomotiven wird genügend produziert werden.

Die Energiebilanz für die Speicherfahrzeuge muss für jede einzelne Anwendung geprüft werden. Insbesondere stellt sich jeweils die Frage, ob mit Niederdruck- oder Hochdruckspeichertechnik gearbeitet werden soll.

Die **Niederdruck-Speichertechnik** hat einen grösseren Energieverbrauch des Fahrzeugs und einen kleineren Energieinhalt des Behälters zur Folge. Andererseits ist der benötigte Dampf weniger hochwertig bezüglich Energie und Preis. Diese Anwendung empfiehlt sich in Kombination mit Kraft-Wärme-Koppelungsanlagen, dann kann der Dampf nach der Stromerzeugung entnommen werden.

Die **Hochdruck-Speichertechnik** hat einen kleineren Energieverbrauch des Fahrzeuges und einen grösseren Energieinhalt des Behälters zur Folge. Sie soll vor allem dort angewendet werden, wo der Dampf mit Abwärme oder mit erneuerbaren Energien speziell für die Speicherfahrzeuge erzeugt wird. Die Hochdruck-Speichertechnik empfiehlt sich auch dann, wenn der Aktionsradius möglichst gross sein muss.

## 8. Vergleich der Energiekosten

**Dampf ist einer der kostengünstigsten Energieträger**, weil er mit billiger, lokaler Energie erzeugt werden kann. Deshalb wird er in der Industrieproduktion bevorzugt verwendet. Die Möglichkeit, die **Dampfenergie für die Mobilität** zu verwenden, ergibt ein **signifikantes Sparpotential**, denn sowohl Strom wie Dieselöl sind erheblich teurer:

Dieselöl:	0.18 CHF/kWh
Strom Industrie:	0.16 CHF/kWh
Strom SBB:	0.10 CHF/kWh
Dampf:	0.04 CHF/kWh



## 9. Modernisierung der Speicherlokomotiven FLC 03

Die in den 1980-er Jahren gebauten FLC 03 könnten kostengünstig modernisiert werden.

### 9.1 Stangenlager

Die Stangen- und Steuerungslager sind auch bei der FLC 03 traditionell als Weissmetall-Gleitlager ausgeführt. Diese Lager müssen öfters geschmiert werden und verlieren Öl. Fettgeschmierte Rollenlager bzw. schwimmende Büchsen reduzieren die Betriebs- und Unterhaltskosten massiv. Die Lager sind dicht, es gibt keine Öltropfverluste.

### 9.2 Spurkranzschmierung

Mit einer Spurkranzschmierung kann der Spurkranzverschleiss deutlich reduziert werden.

### 9.3 Führerstand, Rangiertritte und -plattformen

Die FLC 03 ist noch nicht mit den heute üblichen Erleichterungen für das Rangierpersonal ausgerüstet. Die Sichtverhältnisse des Lokführers sind genügend, liessen sich aber mit einfachen Mitteln verbessern.

### 9.4 Servo-Bedienung der Steuerung, Funkfernsteuerung

Die übliche Umsteuerung von Hand ist einfach, sicher und zuverlässig. Ein Umbau für eine Servo-Bedienung mit Joy-Stick ist jedoch möglich, wenn dies aus Komfortgründen gewünscht wird. Auch eine Funkfernsteuerung kann realisiert werden.

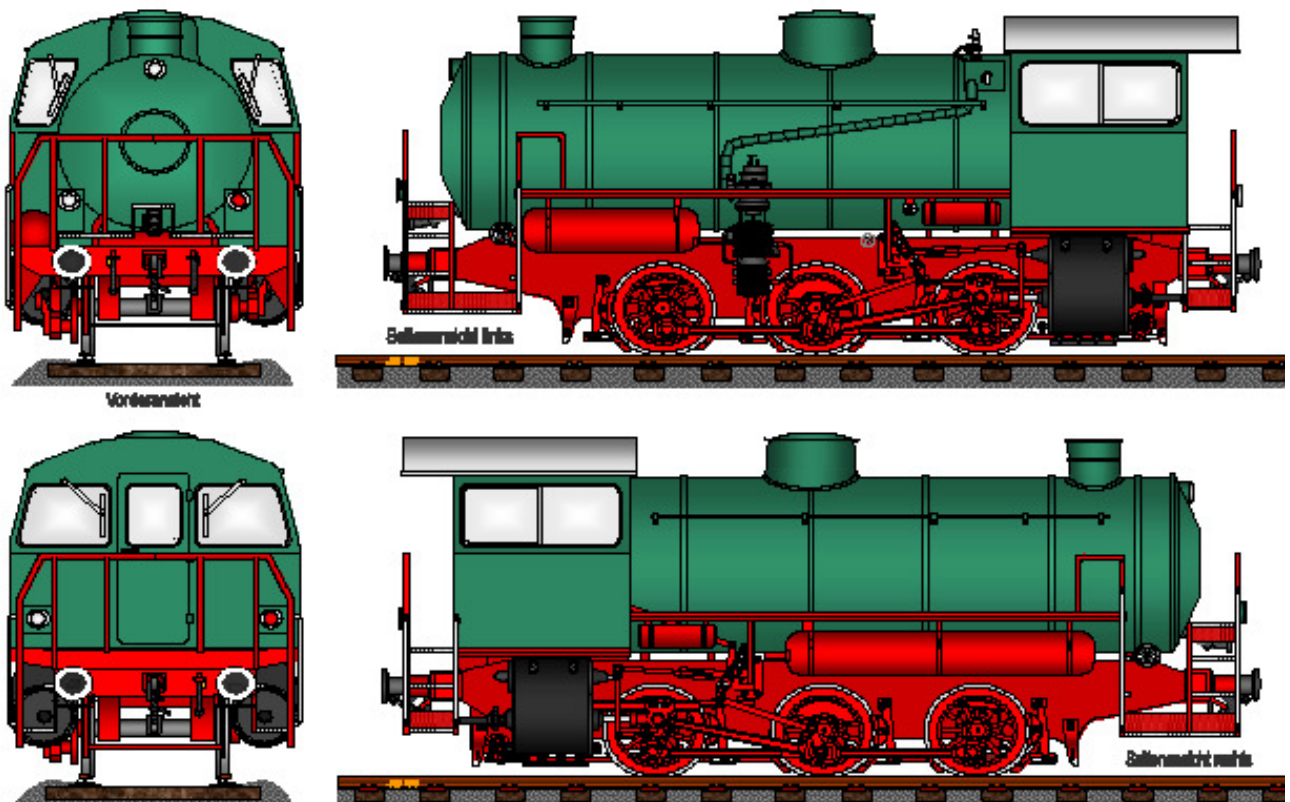
### 9.5 Thermodynamische Verbesserungen

Der spezifische Dampfverbrauch von Niederdruckspeicherlokomotiven kann durch Verbesserungen mit **modern steam** Technik um bis zu 20% gesenkt werden.



**Bild 48:** Anlässlich der Revision bei der DLM wurden bereits einige Verbesserungen ausgeführt. Für die Stromversorgung wurden zwei Solarpaneele auf das Führerhausdach montiert, die zusätzlich durch Schattenbildung das Raumklima im Führerstand verbessern. Neue Rangiertritte sorgen für bessere Sicherheit. Foto: Roger Waller





**Bild 49: Typenskizze einer modernisierten Speicherlokomotive FLC 03. Der Einstieg wurde von der Seite nach hinten verlegt, was den Einbau grosser Schiebefenster auf beiden Seiten erlaubt. Vorne und hinten sind neue Rangierplattformen über den Puffern vorgesehen. Nach hinten und vorn werden die Fenster auch deutlich vergrössert. Selbstverständlich würden alle Achs- und Stangenlager mit abgedichteten fettgeschmierten Rollenlagern ausgerüstet. Zeichnung: DLM**

Der Vorteil des Nachbaus einer bewährten Bauart liegt bei den niedrigeren Gestehungskosten. Eine so modernisierte Speicherlokomotive hat im Vergleich zu Diesel- oder Hybridrangierlokomotiven unschlagbar niedrige Unterhaltskosten. Optional bestünde die Möglichkeit der Ausrüstung mit einer Funkfernsteuerung.

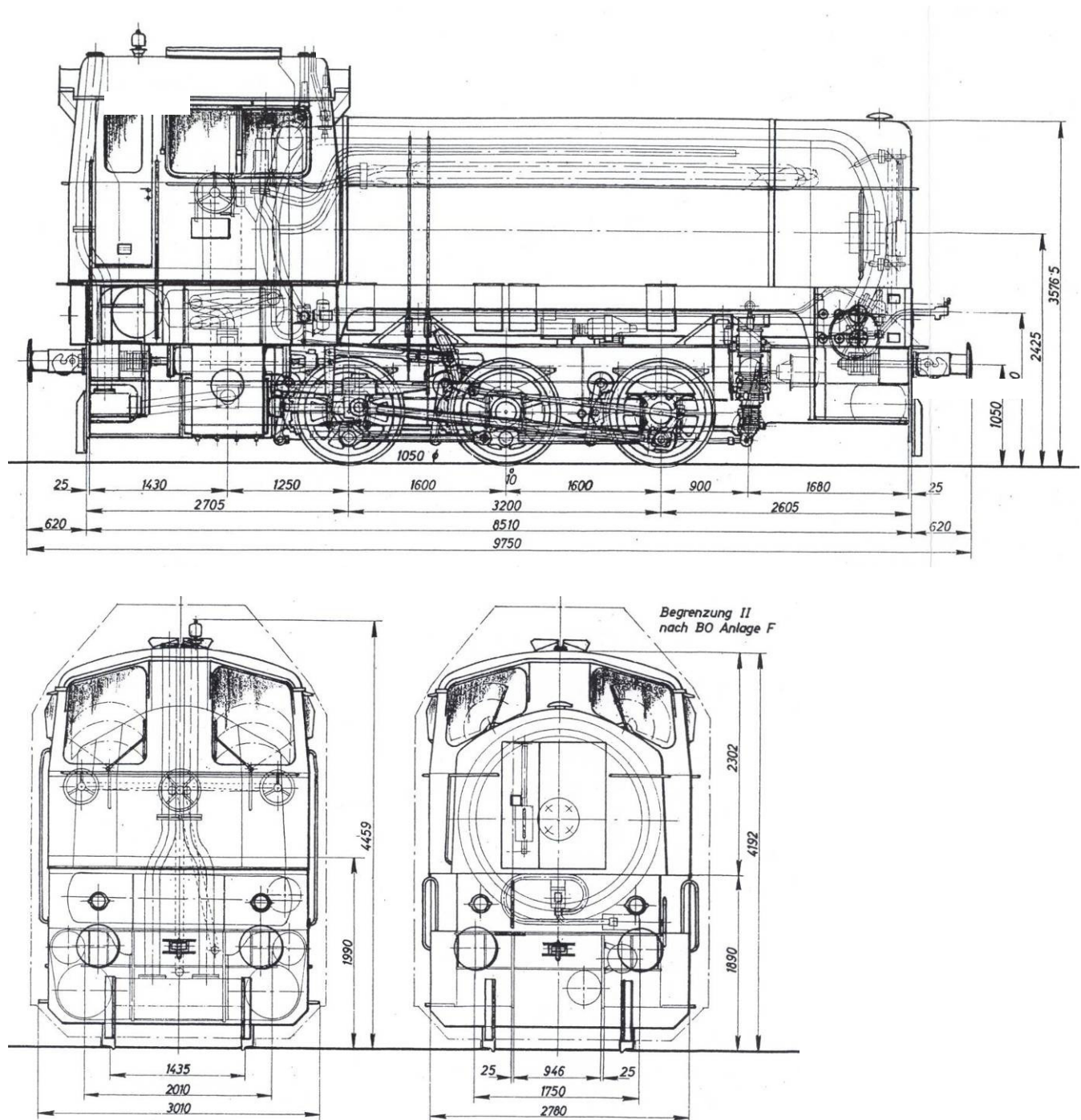
Die Zahl der für eine Modernisierung in Frage kommenden gebrauchten Speicherlokomotiven ist allerdings begrenzt. Auch schränkt die bestehende Substanz die Modernisierungsmöglichkeiten ein, sodass neu entwickelte und gebaute Speicherlokomotiven oft die bessere Option darstellen.



## 10. Neubau von Speicherlokomotiven

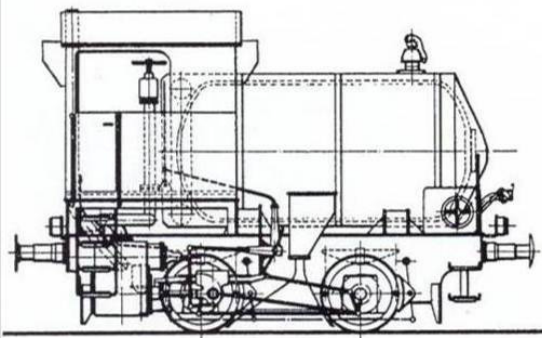
Die beste Lösung besteht darin, neue Speicherlokomotiven nach dem heutigen Stand der Technik zu bauen. Die nachfolgenden Typenskizzen geben eine Idee, welche Möglichkeiten bestehen.

## 10.1 Rahmenlokomotiven für den Rangierdienst

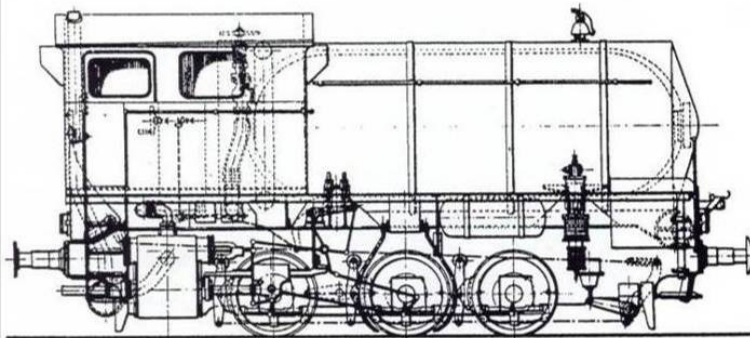


**Bild 50: Typenskizze einer dreiachsigen Hochdruckspeicherlokomotive des Typs C 60.85. Selbstverständlich würden auch bei dieser Lok sämtliche Achs- und Stangenlager mit abgedichteten fettgeschmierten Rollenlagern ausgerüstet. Die DLM besitzt einen vollständigen Zeichnungssatz dieser relativ modernen 85 bar Hochdruckspeicherlokomotive. Zeichnung: SGP**

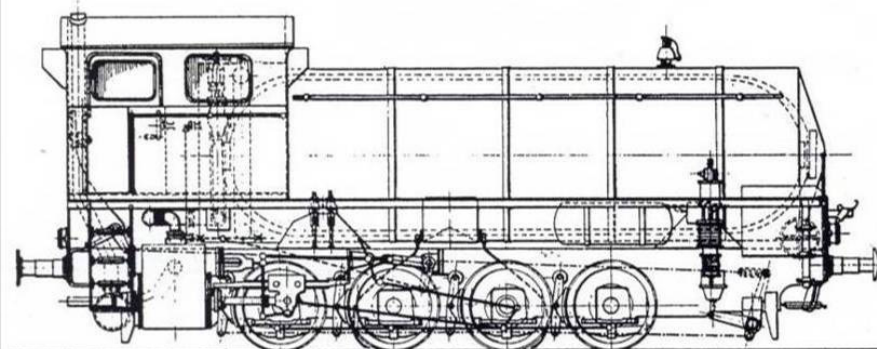



**Type Bfl 5,5/0,6-64**

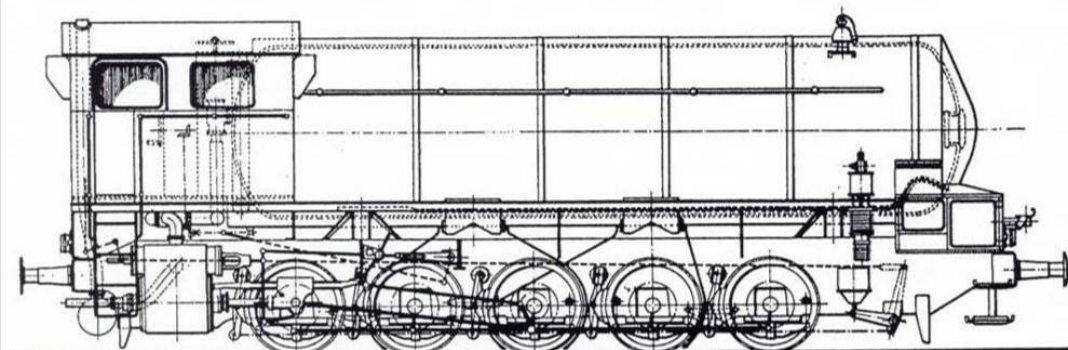
64 atü Fülldruck  
 5,5 m<sup>3</sup> Wasserraum  
 0,6 m<sup>3</sup> Dampfraum  
 im Behälter  
 ca. 34 t Dienstgewicht


**Type Cfl 12,6/0,7-120**

120 atü Fülldruck  
 12,6 m<sup>3</sup> Wasserraum  
 0,7 m<sup>3</sup> Dampfraum  
 im Behälter  
 ca. 60 t Dienstgewicht


**Type Dfl 18,0/2,0-70**

70 atü Fülldruck  
 18 m<sup>3</sup> Wasserraum  
 2 m<sup>3</sup> Dampfraum  
 im Behälter  
 ca. 78 t Dienstgewicht


**Type Efl 23,4/2,6-90**

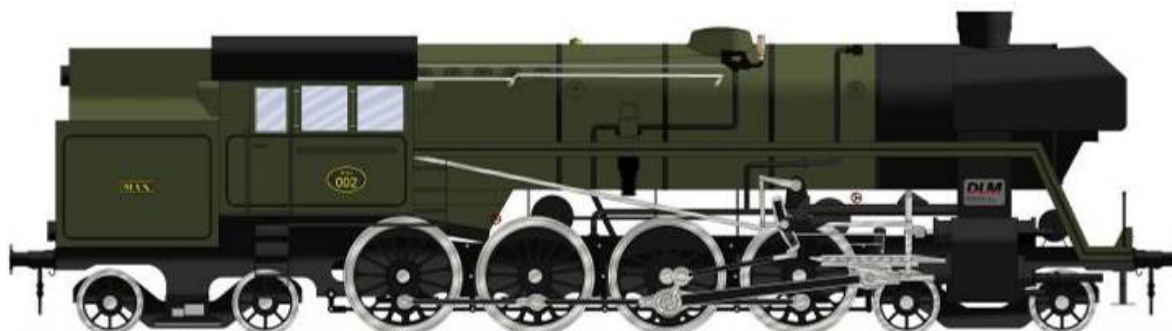
90 atü Fülldruck  
 ca. 98 t Dienstgewicht  
 23,4 m<sup>3</sup> Wasserraum  
 2,6 m<sup>3</sup> Dampfraum im Behälter

Pokschewinski

**Bild 51: Typenskizzen einer von der Firma Henschel entwickelten Typenreihe von Hochdruck-Speicherlokomotiven für den Rangierdienst. Zeichnungen: Henschel**



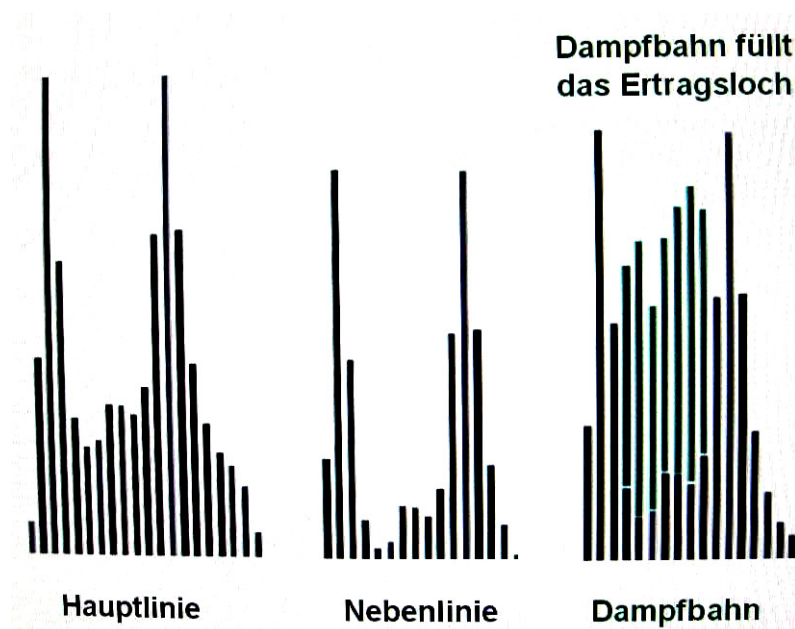
## 10.2 Rahmenlokomotiven für den Nahverkehr



**Bild 52:** Typenskizze einer von der Firma DLM für den Nahverkehr konzipierten, modernen Tenderdampflokomotive. Dieses Konzept eignet sich sowohl für klassische, gefeuerte Dampflokomotiven als auch für Speicherbetrieb. Zeichnungen: DLM AG

Das Bundesamt für Verkehr hat kürzlich verlauten lassen, dass Bahnlinien, deren Kostendeckungsgrad nicht mindestens 50% betrage, auf Busbetrieb umzustellen seien. Nach Protesten wurde auf 30% korrigiert.

Das Thema sprengt den Rahmen dieser Studie. Am Beispiel der oberen Hauensteinlinie (Kostendeckungsgrad 19%) soll dennoch kurz erläutert werden, welche Möglichkeiten sich bieten. Die Linie wird von den SBB effizient betrieben. Alle Einsparungen sind realisiert. Der Kostendeckungsgrad liesse sich aber mit Mehreinnahmen durch Touristen bedeutend erhöhen. Dazu braucht es ein attraktives Angebot, denn nüchterne Pendlerzüge locken keine Touristen an. Ein täglicher Betrieb erfordert neue, wirtschaftliche und umweltfreundliche Dampflokomotiven bzw. Speicherlokomotiven mit der **modern steam** – Technik der DLM.



**Bild 53:** Grafische Darstellung der Tagesfrequenzen von Haupt- und Nebenlinien im öffentlichen Verkehr mit den typischen Spitzen zu den Pendlerzeiten. Dazwischen gibt es viel freie Kapazität, auf Nebenlinien fahren die Züge dann oft fast leer. Mit einem touristischen Angebot könnte das Ertragsloch gefüllt werden. Dazu braucht es attraktive Fahrzeuge, also Dampflokomotiven. Entsprechende Versuche am oberen Hauenstein verliefen sehr positiv, die Einnahmen konnten signifikant gesteigert werden.

Zeichnungen: SBB/DLM AG

**Siehe auch:**

[www.modern-steam-hauenstein.ch](http://www.modern-steam-hauenstein.ch)

Speicherlokomotiven lassen sich im Übrigen auch einfacher fern bedienen, da sie keine Überwachungsbedürftige Feuerung haben. Es lassen sich also auf relativ einfache Weise Pendelzüge (nicht zu verwechseln mit Pendlerzügen) bilden, bei denen die Lokomotive von einem Steuerwagen bedient wird. Das nachladen mit Dampf erfolgt jeweils während des Fahrgastwechsels an einer der Endstationen, z.B. in Sissach.

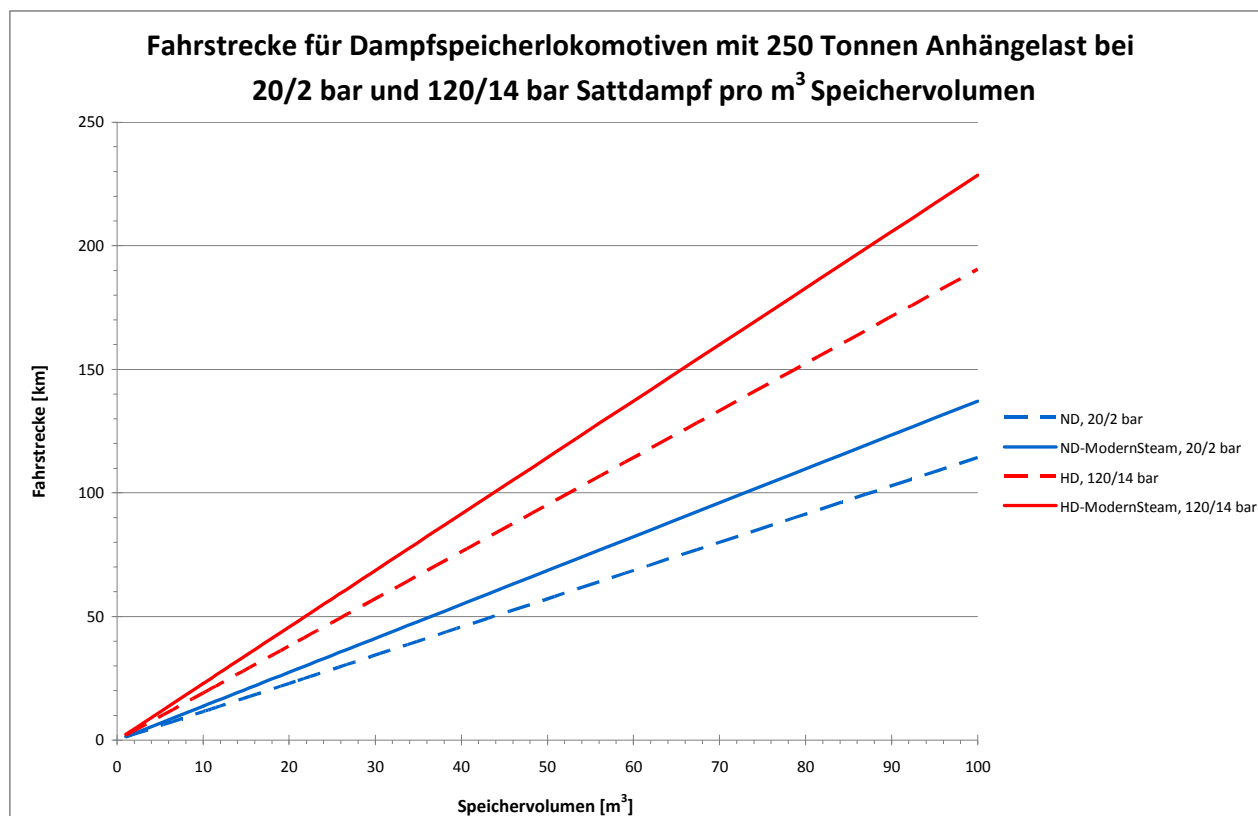


### 10.3 Rahmenlokomotiven für den Güter- und Fernverkehr mit Schlepptender

Bei klassischen Dampflokomotiven werden die Vorräte an Wasser und Brennstoff entweder auf der Lokomotive mitgeführt (Tenderlokomotiven, siehe Bild 52) oder in einem separaten, Tender genannten Wagen (Schlepptenderlokomotiven, siehe Bild 54). Weil die Speicherlokomotiven weder Wasser- noch Brennstoffvorräte mitführen müssen, kann der Schlepptender als zusätzlicher Energiespeicher gestaltet werden und so den Aktionsradius der Speicherlokomotive vervielfachen. Eine solche Lokomotive könnte die Kehrrichttransporte zur Rennergia umweltfreundlicher bewältigen als Lastwagen.



**Bild 54:** Typenskizze einer von der Firma DLM für den Güterverkehr konzipierten, modernen Dampflokomotive. Dieses Konzept eignet sich sowohl für klassische, gefeuerte Dampflokomotiven als auch für Speicherbetrieb. Bei der Ausführung als Speicherlokomotive würde der Schlepptender als zusätzlicher Heisswasserspeicher ausgeführt. Speichervolumen von bis zu 100 m<sup>3</sup> sind möglich.  
Zeichnungen: DLM AG

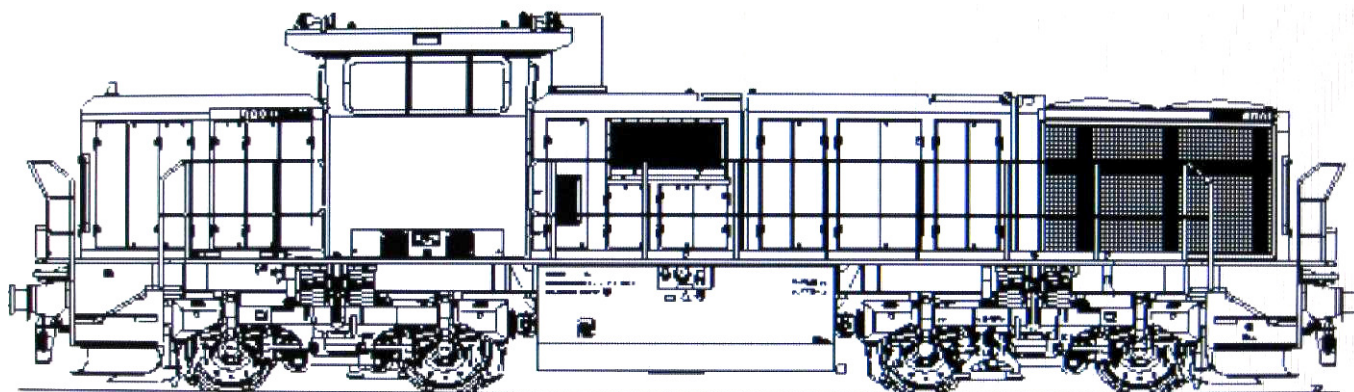


**Bild 55:** Grafische Darstellung des Aktionsradius von bisherigen und mit *modern steam* – Technik gebauter Speicherlokomotiven. Die Annahmen sind konservativ und würden in der Praxis wohl überboten. Berechnungen und Grafik: Martin Schneider, ZHAW



## 10.4 Drehgestell-Lokomotiven für den Rangier- oder Nahverkehr

Die Speichertechnik ist nicht an die klassische Bauart der Dampflokomotiven gebunden. Es ist ohne weiteres möglich, eine heutige Diesellokomotive mit Speichertechnik auszurüsten.



**Bild 56: Typenskizze der von der Firma Vossloh für den Rangierbetrieb konzipierten Diesellokomotive Am 843. Siehe auch Kapitel 3.3.3 und Bild 3. Zeichnungen: Vossloh**

Der Heisswasser-Druckbehälter würde im vorderen Vorbau untergebracht, der Dampfmotor zwischen den beiden Drehgestellen, wobei der Antrieb wie bisher über Kardanwellen und Winkelgetriebe auf die Achsen erfolgen würde. Mit diesem Konzept könnten etwa 60% der vorhandenen Komponenten der Diesellokomotive übernommen werden, was mehrere Vorteile hat. Im kleineren hinteren Vorbau liesse sich entweder ein zweiter Heisswasser-Druckbehälter unterbringen oder alternativ ein Kondensator einbauen. Mit letzterem liesse sich der Abdampf eliminieren.

Ein weiterer möglicher Vorteil gegenüber der klassischen Dampflokbauart ergibt sich aus dem Wegfall der rotierenden und hin- und hergehenden Triebwerksmassen, weil diese die erzielbare Höchstgeschwindigkeit in Funktion des Raddurchmessers limitieren. Für den Rangierdienst werden zwecks guter Beschleunigung kleinere Raddurchmesser gewählt. Die so erzielbaren Höchstgeschwindigkeiten sind für den werksinternen Rangierdienst mehr als ausreichend, für den Streckendienst oder Überfuhr in externe Werkstätten jedoch hinderlich. Dazu sollte die Lokomotive in eigener Kraft oder geschleppt mindestens mit 80 km/h, besser aber mit 100 km/h verkehren können. Die Drehgestellbauart lässt dies ohne weiteres zu.

Eine solche Speicherlokomotive sieht nicht wie eine „alte“ Dampflokomotive aus, was den meisten potenziellen Kunden aus „Imagegründen“ offenbar wichtig ist. Die klassische Dampflokomotive hat bei vielen Leuten den Nimbus von Nostalgie, durchaus sympathisch, aber doch kommerziell nicht ernst zu nehmen. Das geht soweit, dass das rationale Denken ausgeschaltet wird. Mit dieser Drehgestell-Lokomotive kann man den Kunden eine „**nostalgiefreie**“ **Alternative** bieten.



## 11. Wirtschaftlichkeit

Alle an der Studie beteiligten Personen, Firmen und Institutionen haben sich bemüht, für einen Vergleich der Wirtschaftlichkeit genaue Zahlen zu erhalten. Aus mehreren Gründen ist es nur teilweise gelungen. Die Betreiber der **Diesellokomotiven** tun sich schwer mit Zahlen. Für die einen war der Aufwand zu hoch, genaue Zahlen aus der Buchhaltung zu erarbeiten. Bei Unterhaltskosten genügt ein Jahreswert nicht. Will man repräsentative Kosten, muss von mehreren Betriebsjahren ein Durchschnittswert erarbeitet werden. Ausserordentliche Ereignisse wie Reparaturen nach Unfällen dürfen nicht mitgerechnet werden. So haben wir zwar von den SBB Cargo freundlicherweise eine Zahl für die Unterhaltskosten erhalten, aber leider ohne genaue Definition. Die Firma Ems Chemie weigerte sich auf Anfrage, interne Zahlen bekannt zu geben.

Bei den **Hybridlokomotiven** gibt es die zusätzliche Erschwernis, dass diese Lokomotiven erst kürzlich abgeliefert worden sind und noch der Garantie unterliegen. Ausserdem liegt noch zuwenig Erfahrung vor.

Bei den **Speicherlokomotiven** liegt die Schwierigkeit im extrapolieren der Zahlen, gibt es doch keine dem heutigen Stand der Technik entsprechende Lokomotive. Altershalber haben die vorhandenen Speicherlokomotiven wartungsintensive Gleitlager. Immerhin erhielten wir von der Firma Sasol in Herne im Anschluss an einen Besuch die belastbare Aussage: „dass die Kosten unserer Speicherdampflokomotive ca. 25% unter den Kosten der auch bei uns betriebenen Diesellok liegen.“ [18]

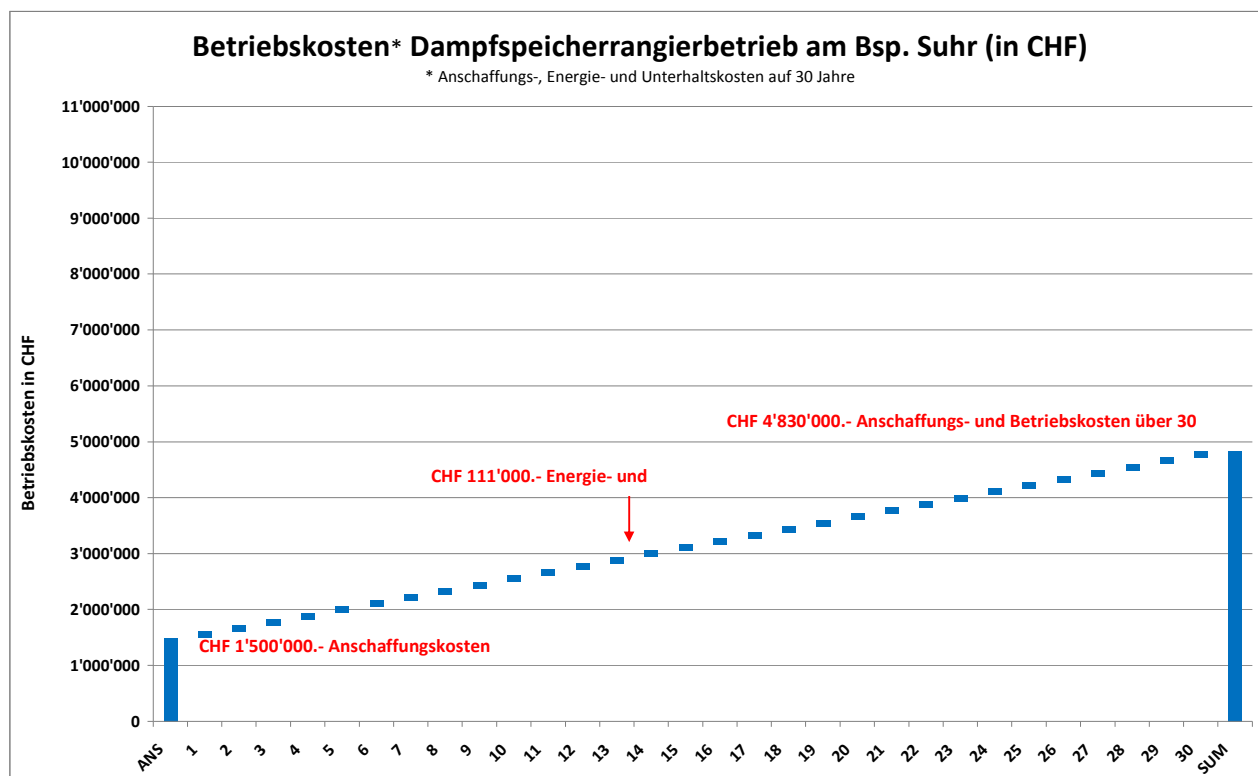
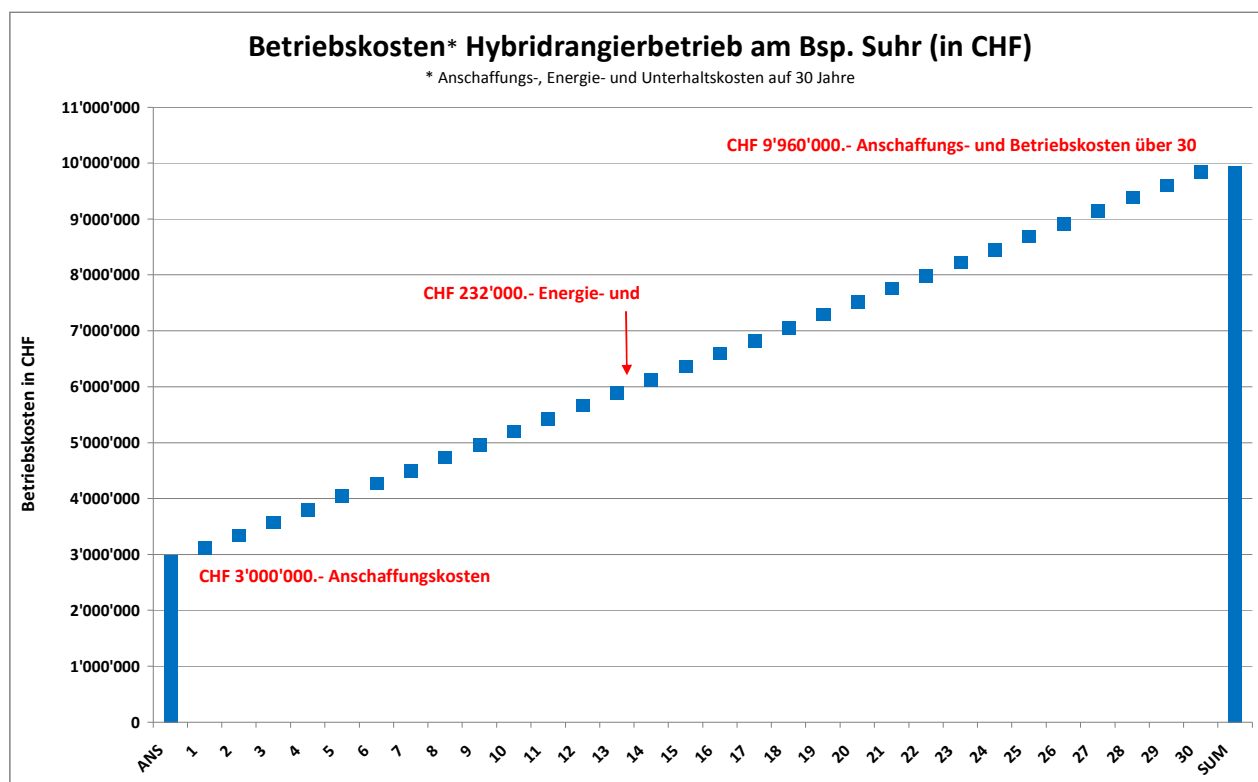


**Bild 56:** Trotz ihres Baujahres von 1958 erfüllt diese Speicherlokomotive bei der Firma Sasol in Herne täglich zuverlässiger, kostengünstiger und umweltfreundlicher als die Diesellokomotive ihre Aufgabe. Die Speicherlokomotive wird der Diesellokomotive immer vorgezogen. Foto: Roger Waller

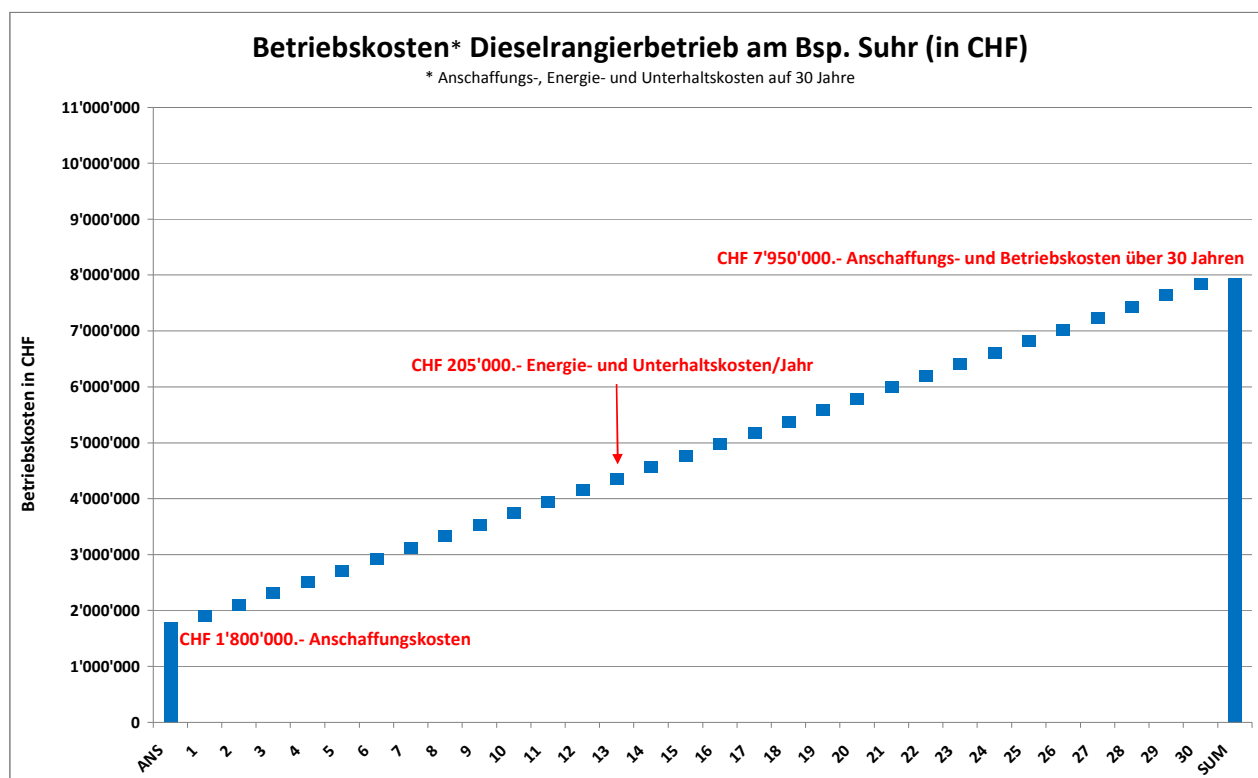


## 11.1 SBB Cargo Suhr

Mithilfe der Angaben der Firma Sasol, den Zahlen von SBB Cargo und den Erfahrungswerten der Betreiber der 1992/96 neu gebauten Zahnradampflokomotiven (im Vergleich zu den noch vorhandenen Diesellokomotiven) ist es dennoch gelungen, für den Fall Suhr Kostenvergleiche zu erstellen, die wir als repräsentativ erachten.







**Bilder 57 bis 59: Vergleich der Betriebskosten von Hybridlokomotiven, Diesellokomotiven und Speicherlokomotiven für den Einsatz bei SBB Cargo in Suhr.** Grafik: Martin Schneider, ZHAW

Nicht ganz überraschend erweist sich die **Hybridlokomotive als teuerste Variante**. Sie wurde wohl zum Nachweis der Reduktion des CO<sub>2</sub>-Verbrauchs beschafft, ein Ziel, das sich mit Speicherlokomotiven einfacher und kostengünstiger erreichen liesse. Die direkten Energiekosten wären dank interner SBB-Preise für den Strom günstiger als bei der reinen Dieseltraktion, aber die Unterhaltskosten der komplexen Hybridtechnik werden mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit deutlich höher ausfallen als bei reinem Dieselbetrieb.

Den **kostengünstigsten Betrieb hat die Speicherlokomotive**, weil sie sowohl die niedrigsten Beschaffungs- als auch die kleinsten Energie- und Unterhaltskosten aufweist.

## 11.2 Ems Chemie

Die Variante Hybrid entfällt in Ems mangels Fahrleitung. Für den Vergleich zwischen Diesel- und Speicherbetrieb dürfte das Ergebnis in Ems von jenem der SBB Cargo in Suhr nicht stark abweichen.

**Diese Zahlen sollten durch einen mehrmonatigen Einsatz von Speicherlokomotiven bei beiden Unternehmen in Ems und Suhr verifiziert werden.**



## Literatur und Quellen

- [1] ORE Forschungs- und Versuchsamt des Internationalen Eisenbahnverbands: Frage B 13/RP 22/A1 Zulassung und Unterhaltung der Dieselmotoren; Utrecht, April 1978
- [2] US Department of Energy  
Verlag Verkehrsverein Rapperswil-Jona, 1986, ISBN 3 907758 01 0
- [3] Pokschewinski, Karl: Feuerlose Lokomotiven  
Lok Rundschau Verlag GmbH, Gülzow, 2000, ISBN 3-931647-10-2
- [4] Waller, Roger: MODERN STEAM – AN ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL ALTERNATIVE TO DIESEL TRACTION  
The Sir Seymour Biscoe Tritton Lecture, 3 and 4 February 2003  
Institution of Mechanical Engineers, Railway Division
- [5] Moser, Alfred: Der Dampfbetrieb der Schweizerischen Eisenbahnen 1847 – 2006  
ISBN 978-3-033-00948-6, 7. nachgeführte und ergänzte Auflage, 2006
- [6] Schwander, Andreas; Waller, Roger: Wärmebetriebenes Fahrzeug mit externer Energieerzeugung  
Patent Nr.
- [7] [www.fraport.de/content/fraport/de/misc/binaer/nachhaltigkeit/nachhaltigkeit/Umwelterklaerung2012/jcr:content.file.verkuerzte-umwelterklaerung-2012.pdf](http://www.fraport.de/content/fraport/de/misc/binaer/nachhaltigkeit/nachhaltigkeit/Umwelterklaerung2012/jcr:content.file.verkuerzte-umwelterklaerung-2012.pdf)
- [8] Geschäftsbericht 2011 der Zürichsee-Fähre Meilen - Horgen AG  
Homepage der Zürichsee-Fähre Meilen - Horgen AG
- [9] Waller, Roger: Technischer Bericht der DLM Nr. D1
- [10] [www.axpo-holz.ch/files/artikel/183/Axpo%20HE%20Gruppe\\_Energie%20aus%20Holz.pdf](http://www.axpo-holz.ch/files/artikel/183/Axpo%20HE%20Gruppe_Energie%20aus%20Holz.pdf)
- [11] [www.kva-buchs.ch/de/fewag/index.php](http://www.kva-buchs.ch/de/fewag/index.php)
- [12] Autorenkollektiv: Energieeffiziente Technologien und effizienzsteigernde Maßnahmen  
Umweltbundesamt, Wien 2005, [www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/M172.pdf](http://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/M172.pdf)
- [13] <http://de.wikipedia.org/wiki/Windenergie>  
Homepage des Wikipedia Lexikons über Windenergie
- [14] [Verlust- und Verlustenergieabschätzung für das 380-kV-Leitungsbauvorhaben Wahle – Mecklar](#),  
B. R. Oswald, Universität Hannover, 1. November 2007.
- [15] Kurzbeschreibung Block 9 des Grosskraftwerks Mannheim  
[www.gkm.de/projekt\\_block\\_9/infomaterial/](http://www.gkm.de/projekt_block_9/infomaterial/)
- [16] Kraftwerk zur Rückgewinnung von Energie aus Abfall in Perlen, Umweltbericht  
[www.renergia.ch/fileadmin/files/07\\_Downloads/Baugesuch\\_Download/6013\\_B6\\_Renergia\\_UVB\\_Hauptuntersuchung-small.pdf](http://www.renergia.ch/fileadmin/files/07_Downloads/Baugesuch_Download/6013_B6_Renergia_UVB_Hauptuntersuchung-small.pdf)
- [17] Dampflokomotiv- und Maschinenfabrik DLM AG [www.dlm-ag.ch](http://www.dlm-ag.ch)
- [18] Korrespondenz mit Herrn Horst Delistat, Eisenbahnbetriebsleiter, Sasol Solvents WerkHerne  
Email vom 11.11.2010



## **Anhang**

- Anhang I: Gleisplan der EMS Chemie AG
- Anhang II: Protokoll der Rangierleistungen bei der EMS Chemie AG
- Anhang III: Gleispläne von Suhr
- Anhang IV: Netzplan der Fernwärme Wynenfeld AG in Suhr
- Anhang V: Protokoll der Rangierleistungen in Suhr







## Anhang II: Protokoll der Rangierleistungen bei der EMS Chemie AG

[illegible]



Zeit	Fahrt Nr.	Fahrt Dauer	Richtung	Gleis von ....bis	Lok t	Anzahl Wagen	Last t	Tacho km	Distanz ca. km	Arbeit t x km	Bemerkungen
9.43	15		→ ←	Depot→27	44	0	0	14109	0.7	30.8	Manöver Wagen stellen
9.50	16	2'	→ ←	Im 27	44		300	Einige Meter	0.1	34.4	Wagen positionieren
9.52	17	2'	→ ←	27→25	44	1	25	14109	0.4	27.6	
9.55	18	4'	→ ←	25→28	44	4	260	14110	0.4	121.6	
10.01	19	8'	→ ←	28→58	44	1	25	14111	1.2	82.8	
10.12	20	9'	→ ←	58→14	44	3	60	14112	1.5	156.0	
10.31	21	4'	→	14→425	44	4	100	14113	0.5	72.0	
10.39	22	5'	→ ←	425→UB1	44	0	0	14114	0.8	35.2	
11.05	23	2'	→ ←	UB1→UB2	44	4	90	14114	0.3	40.2	
11.08	24	2'	→ ←	UB2→UB1	44	3	70	14115	0.3	34.2	
11.11	25	2'	→ ←	UB1→UB2	44	0	0	14115	0.3	13.2	
11.14	26	2'	→ ←	UB2→UB1	44	1	20	14115	0.3	19.2	
11.17	27	3'	→ ←	UB1→Depot	44	0	0	14115	0.4	17.6	
11.20	1-27	93'						15 km	14.2	1352.0	Mittagspause, Motor aus

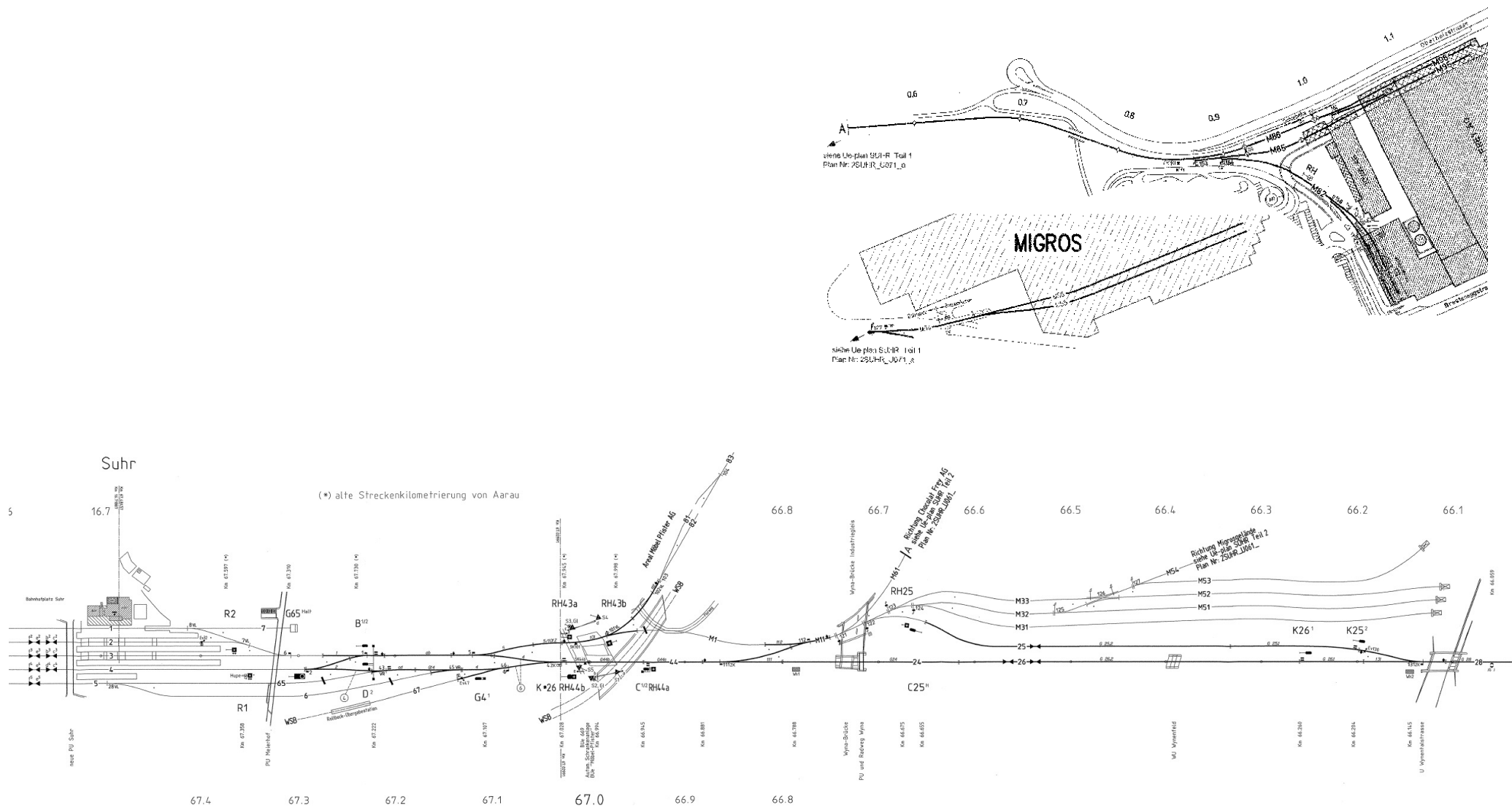
**Durchschnittsgeschwindigkeit 7.55 – 11.20 h:** 4.5 km / h  
**Durchschnittsgeschwindigkeit Fahranteil:** 10.9 km / h

**Einsatzzeit:** 3 h 25'  
**Fahrzeit:** 1 h 25'

**Standzeit:** 2 h 00'  
**Motorlauf:** 3 h 05'



## Anhang III: Gleispläne von Suhr





## Anhang IV: Dampf- und Fernwärmeleitungsnetz von Suhr





## Anhang V: Protokoll Rangierdienst Migros Suhr, Dienstag, 19. Februar 2013

Zeit	Fahrt Nr.	Fahrt Dauer	Richtung	Gleis von ... bis ...	Lok t	Anzahl Wagen	Last t	Tacho km	Distanz ca. km	Arbeit t x km	Bemerkungen
8.35	1	30s	l→	1	45	12	240	5175	0.017	4.8	Betanken der Kühlwagen; <b>Strom</b> betrieb; Dieselstunden = 347 h
8.37	2	30s	l→	1	45	12	240	5175	0.017	4.8	Betanken der Kühlwagen; <b>Strom</b> betrieb
8.39	3	30s	l→	1	45	12	240	5175	0.017	4.8	Betanken der Kühlwagen; <b>Strom</b> betrieb
8.41	4	30s	l→	1	45	12	240	5175	0.017	4.8	Betanken der Kühlwagen; <b>Strom</b> betrieb
8.43	5	30s	l→	1	45	12	240	5175	0.017	4.8	Betanken der Kühlwagen; <b>Strom</b> betrieb
8.45	6	30s	l→	1	45	12	240	5175	0.017	4.8	Betanken der Kühlwagen; <b>Strom</b> betrieb
8.47	7	30s	l→	1	45	12	240	5175	0.017	4.8	Betanken der Kühlwagen; <b>Strom</b> betrieb
8.49	8	30s	l→	1	45	12	240	5175	0.017	4.8	Betanken der Kühlwagen; <b>Strom</b> betrieb
8.51	9	30s	l→	1	45	12	240	5175	0.017	4.8	Betanken der Kühlwagen; <b>Strom</b> betrieb
8.58	10	30s	l→	1	45	12	240	5175	0.017	4.8	Betanken der Kühlwagen; <b>Diesel</b> betrieb; Dieselstunden = 347 h; Diesel schaltet nach 30 s ohne Last ab; Zum wieder Starten braucht er 20s
9.00	11	30s	l→	1	45	12	240	5175	0.017	4.8	Betanken der Kühlwagen; <b>Diesel</b> betrieb
9.03	12	30s	l→	1	45	12	240	5175	0.017	4.8	Betanken der Kühlwagen; <b>Diesel</b> betrieb; Abschaltung nach 30 s entfernt



Zeit	Fahrt Nr.	Fahrt Dauer	Richtung	Gleis von ....bis	Lok t	Anzahl Wagen	Last t	Tacho km	Distanz ca. km	Arbeit t x km	Bemerkungen
9.12	13	3'	←	1 → 53	45	12	240	5176	1.3	370.5	<b>Dieselbetrieb</b>
9.20	14	30s	→	53 → 33	45	0	0	5177	0.1	4.5	<b>Dieselbetrieb; leer</b>
9.21	15	1'	←	33 → 55	45	0	0	5177	0.2	9.0	<b>Dieselbetrieb; leer</b>
9.25	16	1' 30s	→	55 → 32	45	12	240	5177	0.5	142.5	<b>Dieselbetrieb</b>
9.27	17	1'	←	32 → 52	45	12	240	5178	0.3	85.5	<b>Strombetrieb</b>
9.28	18	1'	→	52 → 32	45	0	0	5178	0.4	18	<b>Strombetrieb; leer</b>
9.29	19	20s	←	32 → 966	45	0	0	5178	0.3	13.5	<b>Strombetrieb; leer</b>
9.30	20	1'	→	966 → 112	45	10	400	5179	0.5	222.5	<b>Strombetrieb</b>
9.32	21	1'	←	112 → 32	45	10	400	5179	0.5	222.5	<b>Strombetrieb</b>
9.33	22	45s	←	32 → 55	45	10	400	5180	0.2	89	<b>Dieselbetrieb</b>
9.35	23	1' 30s	→	55 → 32	45	0	0	5180	0.2	9.0	<b>Dieselbetrieb; leer</b>
9.38	24	30s	→	32 → 112	45	0	0	5180	0.5	22.5	<b>Strombetrieb; leer</b>
9.38	25	1	←	112 → 966	45	0	0	5180	0.3	13.5	<b>Strombetrieb; leer</b>
9.40	26	1' 45s	→	966 → 112	45	11	440	5181	0.5	242.5	<b>Strombetrieb</b>
9.43	27	1' 45s	←	112 → 51	45	11	440	5181	0.5	242.5	<b>Strombetrieb</b>
9.45	28	35s	→	51 → 32	45	0	0	5182	0.2	9.0	<b>Strombetrieb; leer</b>
9.46	29	1' 10s	←	32 → 56	45	0	0	5182	0.2	9.0	<b>Dieselbetrieb; leer</b>



9.49	30	2'	l→	56 → 112	45	11	360	5182	0.7	283.5	<b>Dieselbetrieb</b>
------	----	----	----	----------	----	----	-----	------	-----	-------	----------------------

Zeit	Fahrt Nr.	Fahrt Dauer	Richtung	Gleis von ...bis	Lok t	Anzahl Wagen	Last t	Tacho km	Distanz ca. km	Arbeit t x km	Bemerkungen
9.51	31	2'	l←	112 → 966	45	11	360	5183	0.5	202.5	<b>Strombetrieb</b>
9.55	32	45s	l→	966 → 112	45	0	0	5183	0.3	13.5	<b>Strombetrieb; leer</b>
9.56	33	1'	l←	112 → 52	45	0	0	5183	0.3	13.5	<b>Dieselbetrieb; leer</b>
9.59	34	1'	l→	52 → 32	45	8	160	5184	0.3	61.5	<b>Dieselbetrieb</b>
10.01	35	1'	l←	32 → 53	45	8	160	5184	0.3	61.5	<b>Dieselbetrieb</b>
10.03	36	30s	l→	53 → 32	45	11	220	5184	0.4	106.0	<b>Dieselbetrieb; + 3 Wagen</b>
10.04	37	2'	l←	32 → 56	45	11	220	5184	0.4	106.0	<b>Dieselbetrieb</b>
10.06	38	45s	l→	56 → 32	45	0	0	5185	0.2	9.0	<b>Dieselbetrieb; leer</b>
10.11	39	2' 15s	l→	32 → 1	45	0	0	5185	1.0	45.0	<b>Strombetrieb; leer</b>
10.15											Pause bis 11.08 Uhr
11.08	40	1'	l←	1 → 7	45	0	0	5186	0.1	4.5	<b>Strombetrieb; leer</b>
11.10	41	20s	l→	7 → 1	45	2	48	5186	0.1	9.3	<b>Strombetrieb</b>
11.11	42	1' 30s	l←	1 → 101	45	2	48	5186	0.5	46.5	<b>Strombetrieb</b>
11.12	43	30s	l←	101 → 82	45	2	48	5186	0.1	9.3	<b>Dieselbetrieb</b>
11.14	44	30s	l→	82 → 101	45	0	0	5186	0.1	4.5	<b>Dieselbetrieb; leer</b>



11.15	45	1' 30s	l→	101 → 1	45	0	0	5186	0.5	22.5	<b>Dieselbetrieb; leer</b>
11.17											Lok-Wechsel; Reparatur
11.22	46	1' 30s	l←	2 → 32	45	0	0	17614	1.2	54.0	<b>Strombetrieb; leer</b>

Zeit	Fahrt Nr.	Fahrt Dauer	Richtung	Gleis von ...bis	Lok t	Anzahl Wagen	Last t	Tacho km	Distanz ca. km	Arbeit t x km	Bemerkungen
11.25	47	1' 30s	l←	32 → 56	45	0	0	17616	0.2	9.0	<b>Dieselbetrieb; leer</b>
11.28	48	1'	l→	56 → 32	45	10	200	17616	0.4	98.0	<b>Dieselbetrieb</b>
11.30	49	1' 30s	l←	32 → 52	45	10	200	17616	0.3	73.5	<b>Strombetrieb</b>
11.31	50	30s	l→	52 → 32	45	0	0	17616	0.2	9.0	<b>Strombetrieb; leer</b>
11.32	51	30s	l←	32 → 51	45	0	0	17617	0.1	4.5	<b>Strombetrieb; leer</b>
11.33	52	1' 15s	l→	51 → 112	45	11	440	17617	0.4	194.0	<b>Strombetrieb</b>
11.35	53	1'	l←	112 → 32	45	11	440	17617	0.3	145.5	<b>Strombetrieb</b>
11.36	54	1'	l←	32 → 56	45	11	440	17617	0.2	97.0	<b>Dieselbetrieb</b>
11.39	55	45s	l→	56 → 112	45	0	0	17618	0.4	18.0	<b>Dieselbetrieb; leer</b>
11.41	56	30s	l←	112 → 31	45	0	0	17618	0.3	13.5	<b>Strombetrieb; leer</b>
11.45	57	30s	l→	31 → 112	45	27	810	17618	0.3	256.0	<b>Dieselbetrieb</b>
11.47											Technische Probleme Lok
11.47	58	1' 15s	l→	112 → 101	45	27	810	17619	0.3	256.0	<b>Strombetrieb; Lok-Probleme</b>



11.54	59	2'	←	101 → 112	90	27	810	17619	0.3	270.0	<b>Strombetrieb; 2-Loks</b>
12.02	60	1' 30s	→	112 → 2	90	0	0	17619	0.6	54.0	<b>Strombetrieb; 2-Loks</b>
12.08	61	1'	←	2 → 101	90	0	0	17620	0.3	27.0	<b>Strombetrieb; 2-Loks; Test-Fahrt</b>
12.09	62	1'	→	101 → 2	90	0	0	17620	0.3	27.0	<b>Strombetrieb; 2-Loks; Test-Fahrt</b>
Ende											Ende

### Strombetrieb

**Einsatzzeit:** 1h 03' 30"  
**Fahrzeit:** 29'

**Standzeit:** 34' 30"  
**Motorlauf:** 29'

**Zurückgelegte Strecke:** 9.5 km

**Durchschnittsgeschwindigkeit über Einsatzzeit:** 8.9 km / h  
**Durchschnittsgeschwindigkeit Fahranteil:** 19.6 km / h

**Geleistete Arbeit:** 1'950.5 t x km

### Dieselbetrieb

**Einsatzzeit:** 1h 11'  
**Fahrzeit:** 26' 25"

**Standzeit:** 44' 35"  
**Motorlauf:** 1h 11'

**Zurückgelegte Strecke:** 7.6 km

**Durchschnittsgeschwindigkeit über Einsatzzeit:** 6.4 km / h  
**Durchschnittsgeschwindigkeit Fahranteil:** 17.2 km / h

**Geleistete Arbeit:** 1'803.2 t x km



### Hybridbetrieb

**Einsatzzeit: 2h 14' 30"**

**Standzeit: 1h 19' 05"**

**Fahrzeit: 55' 25"**

**Motorlauf: 1h 40'**

**Zurückgelegte Strecke: 17.0 km**

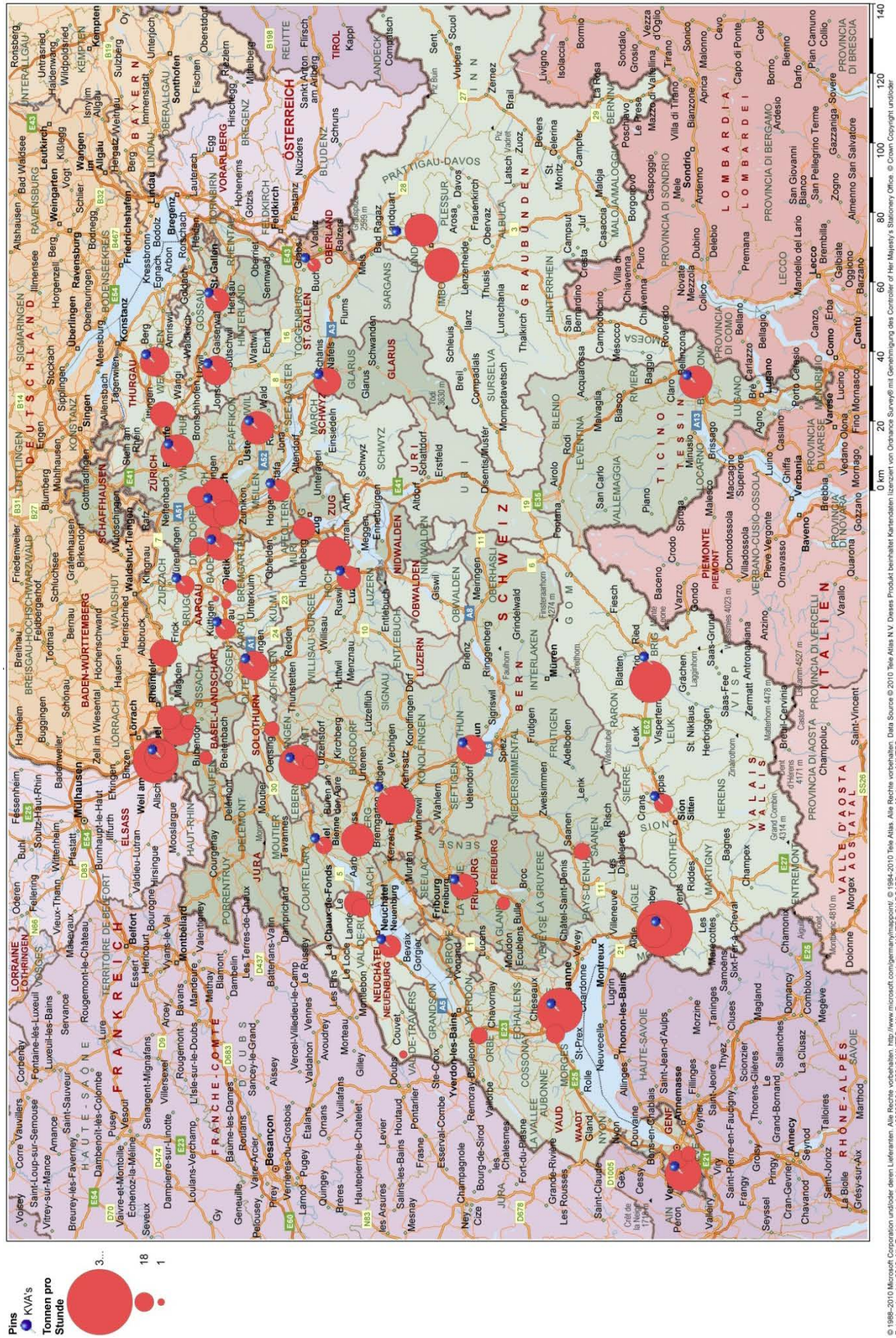
**Durchschnittsgeschwindigkeit über Einsatzzeit: 7.6 km / h**

**Durchschnittsgeschwindigkeit Fahranteil: 18.4 km / h**

**Geleistete Arbeit: 3'753.7 t x km**



## Anhang B – Karte Dampfproduzenten





# Anhang C – Karte Dampfproduzenten und Anwendungsbereiche

