

**Magnetschnellbahn für den schnellen Regionalverkehr**  
**Optimierung des Langstatorantriebs und der Energieversorgung**

vorgelegt von  
Diplom-Ingenieur (Univ.)  
Rolf Fischperer  
aus Berlin

von der Fakultät V – Verkehrs- und Maschinensysteme, Institut für Land- und Seeverkehr,  
Fachgebiet Betriebssysteme elektrischer Bahnen  
der Technischen Universität Berlin  
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur  
– Dr.-Ing. –

Genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr. rer.nat. V. Schindler

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. P. Mnich

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. H. Biesenack

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 10. Februar 2006

Berlin 2006

D83



## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit ist parallel zu meiner Tätigkeit als technischer Projektierungsingenieur bei der Transrapid International GmbH & Co. KG (TRI) entstanden.

Ich danke ich den Geschäftsführern der TRI, die mir das Arbeiten am vorliegenden Werk gestattet haben und mit der Veröffentlichung des damit verbundenen Wissens einverstanden waren.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Mnich von der TU Berlin, Fakultät V (Verkehrs- und Maschinensysteme), Institut für Land- und Seeverkehr, Betriebssysteme elektrischer Bahnen, auf dessen Anregung hin diese Arbeit entstanden ist, sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Hartmut Biesenack vom Institut für Elektrische Verkehrssysteme, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ der TU Dresden, für ihre fachlichen Anregungen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben und die Übernahme der Gutachten.



## **Zusammenfassung**

Die vorliegende Arbeit behandelt Auslegungen des Linearmotorantriebes für Einsatzfälle des Transrapid im Regionalverkehr.

Im ersten Schritt wird die Wirkungsweise des Linearmotors und die damit verbundenen, für den Fernverkehr entwickelten Konfigurationen und Auslegungsgrundsätze erläutert und hinsichtlich ihrer betrieblichen Eigenschaften analysiert.

Anschließend werden modifizierte Anforderungen des Regionalverkehrs identifiziert und Vorgehensweisen zur Optimierung des Antriebssystems festgelegt.

Verschiedene Optimierungsmaßnahmen im Antrieb und anderen mit betroffenen Subsystemen werden erarbeitet und erläutert.

Schließlich erfolgt eine quantitative Auswertung verschiedener Maßnahmen und Auslegungen anhand einer Musterstrecke. Optimierungspotentiale gegenüber den aus dem Fernverkehr bekannten Antrieben werden aufgezeigt. Es zeigt sich, daß mit entsprechender Entwicklung in den betrachteten Subsystemen Einsparungen in einer Größenordnung von 40% möglich sind, sowohl bei Investitionskosten als auch bei Betriebskosten.

## **Abstract**

This work deals with linear propulsion systems of the Transrapid maglev system especially applicable to regional transportation tasks.

In a first step the principle of the linear motor and its configurations and layout strategies for long distance applications are explained and analyzed with regard to their operational characteristics.

Next, modified requirements for regional transportation are identified and strategies for optimization of the propulsion system are set up.

Various optimization measures within the propulsion system and neighboring subsystems are worked out and explained.

Finally, a quantitative analysis of different measures is shown using an exemplary regional line. Optimization potentials compared to a long distance propulsion layouts are shown. It has been found that given the relevant developments in the subsystems concerned savings of up to 40% both in investment and operation costs are feasible.



## **Inhaltsverzeichnis**

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Zusammenstellung der bekannten Antriebssysteme .....</b>	<b>7</b>
2.1	Allgemeines .....	7
2.2	Speiseverfahren und Unterwerkstypen .....	8
2.3	Statorabschnittswchselfahren .....	9
2.3.1	<u>Kurzschlußverfahren</u> .....	9
2.3.2	<u>Bocksprungverfahren</u> .....	10
2.3.3	<u>Wechselschrittverfahren</u> .....	10
2.3.4	<u>Zeitversatzverfahren</u> .....	10
2.3.5	<u>Dreischrittverfahren</u> .....	10
2.3.6	<u>Zusammenfassung SAWV</u> .....	11
<b>3</b>	<b>Analyse Einflußfaktoren.....</b>	<b>12</b>
3.1	Leistungsmerkmale.....	12
3.1.1	<u>Fahrzeugleistung</u> .....	12
3.1.2	<u>Statorstrom</u> .....	13
3.1.3	<u>Polradspannung</u> .....	15
3.2	Einflußparameter.....	15
3.2.1	<u>Stator</u> .....	15
3.2.2	<u>Streckenkabel</u> .....	18
3.2.3	<u>Umrichter mit Trafos</u> .....	20
3.3	Zusammenschau der Einflußparameter .....	21
3.4	Antriebsauslegung .....	24
<b>4</b>	<b>Vorgehen zur Optimierung .....</b>	<b>27</b>
4.1	Prioritäten.....	27
4.2	Vorgehen.....	28

---

<b>5</b>	<b>Anforderungsprofil .....</b>	<b>30</b>
<b>6</b>	<b>Musterstrecke .....</b>	<b>32</b>
<b>7</b>	<b>Eingangssparameter.....</b>	<b>34</b>
<b>8</b>	<b>Maßnahmen zur Antriebsoptimierung .....</b>	<b>36</b>
<b>8.1</b>	<b>Ausgangstrafo.....</b>	<b>36</b>
8.1.1	<u>Maximale Übersetzung</u> .....	36
8.1.2	<u>Variable Übersetzung</u> .....	37
8.1.3	<u>Nennfrequenz</u> .....	37
8.1.4	<u>Entfall</u> .....	38
<b>8.2</b>	<b>Umrichterkonzept.....</b>	<b>38</b>
8.2.1	<u>Dezentraler Aufbau</u> .....	38
8.2.2	<u>Leistungsreduktion</u> .....	39
<b>8.3</b>	<b>Betriebsleittechnik .....</b>	<b>40</b>
8.3.1	<u>Bilienzeiten</u> .....	40
8.3.2	<u>Stationen</u> .....	42
8.3.3	<u>Moving Block</u> .....	42
<b>8.4</b>	<b>Statorschaltung .....</b>	<b>43</b>
8.4.1	<u>Sternschaltung</u> .....	43
8.4.2	<u>Dreieckschaltung</u> .....	43
8.4.3	<u>Offene Sternschaltung</u> .....	44
<b>8.5</b>	<b>Mischspeisung .....</b>	<b>44</b>
<b>8.6</b>	<b>Leistungsvorhalt.....</b>	<b>46</b>
<b>8.7</b>	<b>Teilschrittverfahren.....</b>	<b>47</b>
8.7.1	<u>Grundidee</u> .....	47
8.7.2	<u>Belastung Schaltelemente</u> .....	48
8.7.3	<u>Stationäre Stromfehler</u> .....	49
8.7.4	<u>Transiente Stromfehler</u> .....	49
8.7.5	<u>Spannunghalter</u> .....	50

8.7.6	<u>Ausführungsformen</u> .....	51
8.7.7	<u>Anwendbarkeit</u> .....	52
<b>8.8</b>	<b>Energieversorgungskonzept</b> .....	<b>53</b>
<b>8.9</b>	<b>Rangierkonzept</b> .....	<b>53</b>
<b>9</b>	<b>Definition Antriebsvarianten</b> .....	<b>55</b>
9.1	Variante 1.....	55
9.2	Variante 2.....	56
9.3	Variante 3.....	56
<b>10</b>	<b>Vorabauslegung</b> .....	<b>58</b>
<b>11</b>	<b>Auslegung Unterwerke</b> .....	<b>59</b>
11.1	Vorgehensweise.....	59
11.2	Ergebnisse.....	59
<b>12</b>	<b>Auslegung Streckenkabel</b> .....	<b>62</b>
12.1	Vorgehensweise.....	62
12.2	Ergebnisse.....	63
<b>13</b>	<b>Auslegung Trafoübersetzung</b> .....	<b>67</b>
13.1	Vorgehensweise.....	67
13.2	Ergebnisse.....	67
<b>14</b>	<b>Auslegung Statorabschnitte</b> .....	<b>69</b>
14.1	Vorgehensweise.....	69
14.2	Ergebnisse.....	69
<b>15</b>	<b>Auslegung Energieversorgung</b> .....	<b>71</b>
15.1	Vorgehen.....	71

---

15.2 Ergebnisse.....	71
<b>16 Nachoptimierungen.....</b>	<b>73</b>
16.1 Variante 1 .....	73
16.2 Variante 2 .....	76
16.3 Variante 3 .....	77
<b>17 Fahrspielergebnisse.....</b>	<b>79</b>
17.1 Mindestfahrzeit.....	79
17.2 Energiebedarf.....	79
17.3 Minimaler Takt.....	80
<b>18 Kostenvergleich .....</b>	<b>83</b>
18.1 Festlegung der Einheitskosten .....	83
18.2 Ergebnisse Investitionskosten.....	85
18.3 Betriebskosten .....	87
18.4 Lebenszykluskosten .....	88
<b>19 Zusammenfassung und Ergebnisdiskussion.....</b>	<b>90</b>
<b>Anhang .....</b>	<b>92</b>
Abkürzungsverzeichnis .....	92
Größenbezeichnungen .....	94
Literaturverzeichnis .....	96
Lebenslauf.....	97
Anlagenverzeichnis .....	98

## 1 Einleitung

Die Magnetbahnentwicklung in Deutschland vom Typ Transrapid hat von Anfang an auf eine Erweiterung des schienengebundenen Verkehrs in höhere Geschwindigkeitsbereiche gezielt. Dies spiegelt sich in verschiedenen Systemmerkmalen wieder, welche Begrenzungen aus dem konventionellen Rad-Schiene System weitgehend eliminieren sollen:

- Das Fahrzeug berührt seinen Fahrweg nicht sondern wird von magnetischen Kräften getragen und geführt. Hierzu befinden sich aktiv geregelte Elektromagnete an Bord der Fahrzeuge, die sich von unten an den am Fahrweg befestigten Stator anziehen, siehe auch [13]. Die berührungsfreie Technik eliminiert nicht nur Reibungen und trägt somit zu einer Reduktion von Fahrwiderständen und Schall bei, sondern hebt Begrenzungen der Geschwindigkeit auf, die sich aus dem Verschleiß im Rad-Schiene System ergeben.
- Das Fehlen von Rädern und Stromabnehmern ermöglicht eine aerodynamisch günstige Form die ebenfalls zum Erreichen hoher Geschwindigkeiten beiträgt.
- Der Antrieb des Fahrzeuges wurde weitgehend aus dem Fahrzeug entfernt und in stationäre Anlagen integriert. Neben einer Gewichtsreduktion des Fahrzeuges erreicht man dadurch eine weitgehende Aufhebung von Begrenzungen hinsichtlich der verfügbaren Leistung, denn weder räumliche Gegebenheiten auf dem Zug noch Begrenzungen von Massen sind noch gegeben. Weiteres zum Aufbau des Antriebes wird im nächsten Kapitel erläutert.

Diese Systemmerkmale prädestinieren den Transrapid zum Einsatz in Fernverkehrsstrecken mit hohen Geschwindigkeiten und kleinen Reisezeiten. Geplant war deshalb in der zweiten Hälfte der 90er Jahre eine Anwendung auf einer neuen Schnellverkehrsverbindung Berlin-Hamburg. Nachdem dieses Vorhaben jedoch Anfang 2000 eingestellt wurde, wurde seitens der Bundesregierung beschlossen, den Einsatz der Technologie auf Regionalstrecken zu untersuchen. Hier besteht einerseits ein Bedarf an schnellen Verbindungsstrecken und andererseits erwartet man eine günstigere Kostensituation als im Fernverkehr aufgrund der reduzierten Streckenlängen.

Auf kurzen Strecken mit regionalem Verkehrscharakter kommt der eigentliche Vorteil der Magnetschwebetechnik bislang jedoch kaum zur Geltung:

- Die Abstände zwischen den Haltestellen sind gering. Außerdem führen die Trassen i.d.R. durch dicht besiedelte Gebiete. Beides führt dazu, dass keine so großen Geschwindigkeiten erreicht werden wie bei Fernverkehrsstrecken.
- Gerade aber bei hohen Geschwindigkeiten können sich die Vorteile des berührungsfreien Fahrens, also der fehlenden Reibungsverluste, und der guten Aerodynamik voll entfalten, während sich bei kleinen Geschwindigkeiten der Energiebedarf zum aktiven Schweben negativ bemerkbar macht.

Die Magnetschnellbahn-Technologie bietet aber dennoch systemimmanente Vorteile, die einem Einsatz auch auf kürzeren Strecken mit regionalem Charakter entgegenkommen:

- Die aktive Führung der Fahrzeuge ermöglicht Kurvenneigungen von 12° und mehr. Die sich daraus ergebenden vergleichsweise kleinen Kurvenradien des Systems ermöglichen auch in urbanen Bereichen Streckentrassierungen, die Geschwindigkeiten im Bereich von 200 km/h ermöglichen. Zusammen mit dem für Hochgeschwindigkeitssysteme guten Beschleunigungsvermögen ergeben sich so fahrzeitgünstige Alternativen zu bekannten Verkehrssystemen.
- Die niedrigen Fahrzeiten ermöglichen zudem die Bewältigung hoher Verkehrsaufkommen, wie sie in Ballungszentren häufig vorkommen.
- Im angesprochenen Geschwindigkeitsbereich um 200 km/h liegt der Schallpegel des Transrapid aufgrund seines berührungsfreien Antriebes so niedrig wie bei keinem anderen Verkehrssystem. Auch dieser Umstand begünstigt einen Einsatz in dicht besiedelten Gebieten.

Will man auch in diesem Marktsegment die oben beschriebenen, verkehrlichen Vorteile der Magnetschnellbahn zur Anwendung bringen, so muß die Bemessung der Subsysteme auf den Einsatzfall hin abgestimmt und kostengünstig gestaltet werden, so daß eine wirtschaftliche Alternative zum Rad-Schiene-System angeboten werden kann.

Seitens der Elektrotechnik trägt das Antriebssystem der MSB einen wesentlichen Kostenanteil zum Gesamtsystem bei. Genau dieses bietet aber prinzipbedingt viele Möglichkeiten der Anpassung an verschiedene Leistungsanforderungen und damit Kostenoptimierungen.

Somit setzt sich dieses Werk zum Ziel, Antriebsvarianten für die MSB zu erarbeiten, welche den spezifischen Anforderungen des Regionalverkehrs Rechnung tragen und die gegenüber bekannten Lösungen Kostenvorteile aufweisen.

Dazu werden folgende Arbeiten durchgeführt:

- Die Struktur des Antriebssystems wird dargelegt. Die verschiedenen bekannten Systeme zur Speisung des Linearmotors werden zusammengestellt.
- Die physikalische Wirkungsweise des Antriebes wird analysiert. Es folgt eine Identifizierung der Parameter, welche die Leistungsfähigkeit des Antriebes maßgeblich bestimmen (Leistungsparameter). Weiterhin werden verschiedenen Einflußparameter ermittelt, welche die Leistungsparameter beeinflussen. Deren Wirkungsweise wird dargestellt und der Einfluß auf die Wirtschaftlichkeit angegeben.
- Es wird ein Ansatz zum Vorgehen bei Auslegung des Antriebssystems erarbeitet. Hierbei werden von außen an das System gestellte Anforderungen betrachtet.
- Es folgt eine Erarbeitung von Algorithmen zur Optimierung der einzelnen Antriebskomponenten mit dem Ziel, die gestellten Anforderungen zu durch Optimierung der Leistungsparameter zu erfüllen, unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten.
- Weiterhin werden neue Ansätze zur Gestaltung des Antriebssystems entwickelt, welche speziell auf den Regionalverkehr zugeschnitten sind.

Die so erarbeiteten Theorien werden beispielhaft auf eine Musterstrecke angewendet. Hier zeigt sich, wie durch Veränderung von Parametern eine kostengünstige Lösung zum Aufbau des Antriebes entsteht.

## 2 Zusammenstellung der bekannten Antriebssysteme

Vor jeder Optimierung eines Systems muß eine Analyse dessen Aufbaus, seines Leistungsvermögens und seiner Stärken und Schwächen erfolgen. Aus diesem Grunde sind im Folgenden zunächst die aus dem Hochgeschwindigkeitsverkehr bekannten Antriebssysteme zusammengestellt und nach kategorisiert.

Zur besseren Übersicht erfolgt eine Einteilung des Antriebssystems nach folgenden zwei Kriterien:

1. Speiseverfahren und Unterwerkstypen.
2. Statorabschnittswechselfverfahren.

### 2.1 Allgemeines

Im Folgenden werden allgemeingültige Prinzipien des Langstatorantriebes beschrieben. Die hier definierten Begriffe sind Grundlage der weiteren Bearbeitung.

Die prinzipielle Wirkungsweise des Langstatorantriebs verdeutlicht Anlage 2.1-0: Die Tragmagnete an Bord des Fahrzeuges dienen gleichzeitig als „Rotor“ bzw. Erregung einer elektrischen Maschine, dessen Stator nicht zylindrisch aufgebaut ist sondern sich entlang der gesamten Strecke ausdehnt. Die Kraftwirkung in Längsrichtung, also zum Beschleunigen oder Bremsen, folgt aus dem Gesetz der Kraftwirkung  $\underline{F}$  auf mit Strom  $i$  durchflossene Leiter der Länge  $\underline{l}$  nach [14]:

$$\underline{F} = i \cdot \underline{l} \times \underline{B}$$

Da die Induktion  $\underline{B}$  durch das Tragfeld gegeben ist, kann die Schubkraft  $\underline{F}$  lediglich über den in den Langstator eingespeisten Strom  $i$  geregelt werden. Dieser muß in Richtung (Phasenlage) zur Induktion und Geschwindigkeit (Frequenz) des Fahrzeuges nachgeregelt werden, um die Schubkraft in der gewünschten Richtung aufrecht zu erhalten.

Das System zur Speisung dieses Langstators befindet sich nicht an Bord der Fahrzeuge, sondern entlang der Strecke in stationären Einrichtungen, siehe auch [5]. Diese bestehen aus folgenden Einzelkomponenten (vgl. Anlage 2.1-1):

- **Statorabschnitte (SA)** am Fahrweg: Der beliebig lange Stator ist in einzelne Abschnitte unterteilt. Es wird jeweils nur derjenige SA mit Strom gespeist, über dem sich das Fahrzeug befindet. Dies ist erforderlich um die Impedanz des Stators auf handhabbare Werte zu begrenzen und verbessert gleichzeitig den Wirkungsgrad.
- **Schaltstellen (SS)** an den Enden der Statorabschnitte: Sie enthalten Schaltelemente zum Bilden von Sternpunkten der Statorabschnitte, Trennen der Statorabschnitte von den Streckenkabeln und Kabelfelder zum Anklempfen der ein- und wieder ausgeführten Streckenkabel. Außerdem enthalten die Schaltstellen Schutzeinrichtungen des Langstators (Erdfehlererfassung).
- **Strecken-kabelgruppe (SKG)** entlang des Fahrweges: Sie beinhaltet alle Streckenkabel des Antriebes entlang der Trasse, in denen die Energie von den Unterwerken zu den Schaltstellen transportiert wird.
- **Unterwerke (UW)** an bestimmten Standorten der Strecke: Sie beinhalten wiederum folgende Komponenten:

- **Hochspannungsanlage (HS)** zum Bezug der Antriebsenergie aus dem öffentlichen Hochspannungsnetz. Die HS wird dem Subsystem Energieversorgung zugerechnet, nicht dem Antrieb, und wird hier aufgrund der Kostenbeeinflussung verschiedener Antriebskonzepte mit betrachtet,
- **Antriebsblöcke (ABL)** mit Umrichtern (UR) zur Einspeisung der Energie in die Streckenkabel und der Antriebsregelung-/Steuerung (ARS) zur Regelung der Umrichter bezogen auf die Fahrzeuglage und –Geschwindigkeit zur Erzeugung der benötigten, frequenz-, phasen- und amplitudenrichtigen Statorströme,
- **Betriebsleittechnik-Dezentralen (BLDn)** zur Steuerung und Sicherung des Betriebes. Die BLD wird dem Subsystem Leittechnik zugerechnet, nicht dem Antrieb, wird hier aufgrund der Kostenbeeinflussung verschiedener Antriebskonzepte aber ebenfalls mit betrachtet.

Alle Komponenten sind je nach Speiseverfahren und Statorabschnittswchselverfahren zu bemessen und zusammenzustellen und bilden in ihrer Gesamtheit das Antriebssystem. Den Streckenbereich, der alle Komponenten zum Antrieb eines einzigen Fahrzeuges beinhaltet, wird im Folgenden als **Antriebsbereich (ABE)** bezeichnet.

## 2.2 Speiseverfahren und Unterwerkstypen

Es sind zwei verschiedene Speiseverfahren, d.h. Möglichkeiten, den Statorstrom einzuspeisen, bekannt, nämlich

- Einfachspeisung (ESP) und
- Doppelspeisung (DSP).

Anlage 2.2-1 zeigt den wesentlichen Unterschied beider Verfahren: Während bei Einfachspeisung die gesamte Antriebsleistung eines Antriebsbereiches (ABE) von nur einem Unterwerk aufgebracht wird, stellen bei der Doppelspeisung zwei benachbarte Unterwerke an den Enden des ABE die Antriebsleistung gemeinsam zur Verfügung.

Dementsprechend sinkt die Belastung der Streckenkabel des ABE bei Doppelspeisung theoretisch auf 50%. Praktisch teilt sich der Strom im Allgemeinen nicht in einem Verhältnis 50%:50% auf die Unterwerke auf, da einerseits je nach Ort des einzuspeisenden Statorabschnittes (SA) unterschiedliche Impedanzverhältnisse auf den entsprechenden Streckenkabel-Abschnitten herrschen, und andererseits strategische Überlegungen wie Verlustminimierung auf den Streckenkabeln oder Maximierung des Summenstromes im SA verschiedene Aufteilungsverhältnisse erfordern.

Neben dem Speiseverfahren werden Unterwerke unterschieden nach der Anzahl der angrenzenden Antriebsbereiche (ABE), die *gleichzeitig* gespeist werden können, nämlich

- Typ 1: gleichzeitige Speisung nur eines ABE einer Fahrspur;
- Typ 2: gleichzeitige Speisung von zwei ABE einer Fahrspur;

Der Typ 2 entsteht aus dem Typ 1 durch Verdoppelung der Antriebsblöcke im Unterwerk. Erst dadurch wird gewährleistet, daß jeder Streckenkabelgruppe (SKG) stets ein Antriebsblock (ABL) zur Verfügung steht, so daß in jedem Antriebsbereich (ABE) ein Fahrzeug angetrieben werden kann. Ansonsten darf sich maximal nur in jedem zweiten ABE ein Fahrzeug bewegen.

Für die Anzahl der gleichzeitig speisbaren Fahrzeuge in einem Streckenbereich zwischen drei Unterwerken (UW) bedeutet dies:

- UW Typ 1, Einfachspeisung (ESP): 2
- UW Typ 1, Doppelspeisung (DSP): 1
- UW Typ 2, Einfachspeisung (ESP): 4
- UW Typ 2, Doppelspeisung (DSP): 2.

### 2.3 Statorabschnittsverfahren

Das verwendete Statorabschnittsverfahren (SAWV) eines Antriebsbereiches (ABE) nimmt Einfluß auf

- die Anzahl der Streckenkabelverbunde,
- die Anzahl der Umrichter in den Antriebsblöcken,
- die Schaltstellenanzahl,
- die effektiv verfügbare Schubkraft und
- den Fahrkomfort.

Deshalb kommt der optimalen Auswahl des SAWV eine große Bedeutung zu. Folgende SAWV sind bekannt:

#### 2.3.1 Kurzschlußverfahren

Beim Kurzschlußverfahren (KSV) sind die jeweils rechts und links am Fahrweg befindlichen Statoren abschnittsweise in Reihe geschaltet. Jeder Antriebsbereich (ABE) enthält lediglich einen Streckenkabelverbund (SKV), dem sämtliche Statorabschnitte (SA) zugeordnet sind (Anlage 2.3-1). Dementsprechend wird auch nur ein Umrichter (UR) im Antriebsblock (ABL) benötigt.

Der Statorabschnittswechsel (SAW) geschieht mittels folgendem Ablauf:

- Ruckbegrenzte Absteuerung der Schubkraft auf 0.
- Öffnen der Einspeiseschütze des zu verlassenden Statorabschnittes (SA).
- Schließen der Einspeiseschütze des zu befahrenden SA.
- Ruckbegrenzte Aufsteuerung der Schubkraft.

Anlage 2.3-2 zeigt die zugehörigen Verläufe der induzierten Polradspannung, des Statorstromes und der Schubkraft, wenn der Abschnittswechsel bei 250 m liegt. Man erkennt, daß die Schubkraft „Lücken“ im Zeitverlauf bzw. Ortsverlauf aufweist. Dies bewirkt zweierlei:

- Der Fahrkomfort wird beeinträchtigt.
- Die mittlere Schubkraft sinkt.

### 2.3.2 Bocksprungverfahren

Beim Bocksprungverfahren (BSV) sind die einzelnen SA zwar wie beim Kurzschlußverfahren in Reihe geschaltet, jedoch befindet sich jeder zweite SA an einem zweiten Streckenkabelverbund (SKV), vgl. Beispiel in Anlage 2.3-3. Mit Hilfe des folgenden Steuerungsablaufes kann so ein schubkrafteinbruchsfreier Statorabschnittswechsel (SAW) erfolgen (Anlage 2.3-4):

- Zuschalten der Einspeiseschalter des zu befahrenden Statorabschnittes (SA) bevor das Fahrzeug diesen erreicht.
- Aufsteuern des Statorstromes des zu befahrenden SA bevor das Fahrzeug diesen erreicht (ohne Last).
- Absteuern des Statorstromes des letzten SA, nachdem dieser vom Fahrzeug verlassen wurde.
- Abschalten der Einspeiseschalter des letzten SA, nachdem dieser vom Fahrzeug verlassen wurde.

Das BSV benötigt pro Fahrspur 2 Streckenkabelverbunde (SKV) und 2 Umrichter (UR) im Antriebsblock (ABL).

### 2.3.3 Wechselschrittverfahren

Beim Wechselschrittverfahren (WSV) erfolgt die Einspeisung der rechten und linken Statoren getrennt und unabhängig voneinander. Deshalb benötigt man zwei SKV und zwei UR im ABL (z.B. Anlage 2.3-5). Der Statorabschnittswechsel (SAW) erfolgt analog zum Kurzschlußverfahren, jedoch auf der rechten und linken Statorseite getrennt mit einem örtlichen Versatz (Anlage 2.3-6).

Die Summe der beiden Schubkraftanteile beträgt somit stets mindestens 50%. Für das WSV liegen Erfahrungswerte zum Fahrkomfort aus dem Betrieb der Transrapid Versuchsanlage Emsland (TVE) vor.

### 2.3.4 Zeitversatzverfahren

Beim Zeitversatzverfahren (ZVV) erfolgt die Einspeisung der rechten und linken Statoren ebenfalls getrennt und unabhängig voneinander. Deshalb benötigt man zwei SKV und zwei UR im ABL (Anlage 2.3-7). Da einerseits kein Ortsversatz vorliegt, andererseits aber Schubkrafteinbrüche von über 50% vermieden werden sollen, erfolgt der SAW zeitlich gestaffelt (Anlage 2.3-8). Gegenüber dem Wechselschrittverfahren (WSV) ergeben sich somit i.allg. größere Bereiche, in denen die Schubkraft unter 100% liegt, d.h. der Schubmittelwert sinkt.

### 2.3.5 Dreischrittverfahren

Das Dreischrittverfahren (DSV) speist zwar ebenfalls die rechten und linken Statoren getrennt voneinander (z.B. Anlage 2.3-9), verursacht aber keine Schubkrafteinbrüche. Dazu bedient man sich eines dritten Streckenkabelverbundes (SKV), der zusammen mit einem ausreichenden Ortsversatz gewährleistet, daß alle drei am Statorabschnittswechsel (SAW) beteiligten SA gespeist werden und die Schubkraftsumme konstant bleibt (Anlage 2.3-10). Dieses Verfahren wird auf der ersten Anwendungsstrecke in Shangai eingesetzt.

### 2.3.6 Zusammenfassung SAWV

Die folgende Tabelle faßt die wesentlichen Eigenschaften der verschiedenen Statorabschnittswchselfverfahren (SAWV) zusammen:

	<b>Statoranordnung</b>	<b>Schubkrafteinbruch beim SAW</b>	<b>Anzahl der SKV und UR pro ABL</b>
KSV	In Reihe	100%	1
BSV	In Reihe	0%	2
WSV	Getrennt	50%	2
ZVV	Getrennt	50%	2
DSV	Getrennt	0%	3

Die Statorabschnittslänge (SAL) bestimmt durch ihre zugehörige Statorimpedanz, welche maximale Ströme und damit Schubkraft erzeugt werden können. Bei Statorabschnittswchselfverfahren (SAWV), die Schubkrafteinbrüche verursachen, läßt sich die mittlere Schubkraft und damit die Leistungsfähigkeit des Antriebes nur dann auf vergleichbaren Niveaus halten, wenn zwischen den SAW entsprechend höhere Ströme eingespeist werden. Dies erzwingt bei gegebener Umrichterspannung kleinere Impedanzen, d.h. kürzere Statorabschnittslängen (SAL), also mehr Schaltstellen im Antriebsbereich (ABE), oder eine höhere installierte Umrichterleistung.

### 3 Analyse Einflußfaktoren

Im Folgenden wird ermittelt, welche Einflußfaktoren auf das Antriebssystem wirken und in welcher Art sie Leistungsvermögen und Kosten beeinflussen.

Die physikalischen bzw. elektrotechnischen Grundlagen dafür basieren im Wesentlichen auf zwei Quellen:

Zum einen sind in [16] ausführlich die physikalischen Effekte im Langstatormotor selbst, d.h. dem Statorpaket und der Wicklung sowie dem Tragnagneten als Erreger der Maschine, beschrieben. Hieraus lassen sich z.B. die Induktivitäten des Stators berechnen oder die Flussverteilung und die Schubkraftkonstante (Motorkonstante) ermitteln.

Zum Zweiten beschreibt [5] sämtliche relevante Antriebsgrößen und deren Wechselwirkungen, angefangen von den speisenden Umrichtern über die Leistungsübertragung durch die Streckenkabel bis zu den statorseitigen Effekten sowie der Fahrdynamik. Diese Angaben wurden nicht nur theoretisch beschrieben sondern auch messtechnisch nachgewiesen.

Zur Beschreibung der Leistungsfähigkeit des MSB Antriebes wurden die dazu relevanten Kenntnisse aus [5] und [16] genutzt und in den folgenden Unterkapiteln mit den aktuell geltenden Werten übersichtlich zusammengestellt. Darüber hinaus wurde der Einfluss auf Kosten und Energiebedarf abgeleitet. Schließlich werden die Wechselwirkungen aller Parameter analysiert und zusammengestellt, um daraus Strategien zur Antriebsoptimierung ableiten zu können.

#### 3.1 Leistungsmerkmale

Bestimmte betriebliche Parameter, insbesondere die geforderte Fahrzeit und der geforderte Fahrtakt, stellen Anforderungen an die Leistungsfähigkeit des Antriebs. Als Grundlage für Antriebsauslegungen werden nachfolgend die Parameter identifiziert, welche diese Leistungsfähigkeit definieren.

##### 3.1.1 Fahrzeugleistung

Die Leistungsfähigkeit eines Magnetfahrzeuges läßt sich durch die allgemein gültigen Bewegungsgleichungen darstellen: Leistung (P) = Kraft (F) multipliziert mit der Geschwindigkeit (v).

Weiterhin von Bedeutung ist die Kraftgleichung nach [15] mit der Fahrzeugmasse  $m_{Fzg}$  und der Beschleunigung a:

$$F = m_{Fzg} \cdot a + F_{Wid} \quad \text{mit}$$

$$F_{Wid} = F_{ae} + F_{mag} + F_{lig} + F_H$$

Die einzelnen Kraftanteile  $F_{Wid}$  lauten nach [15] wie folgt: Es gelten für den aerodynamischen Widerstand

$$F_{ae} = 2,8 \cdot (0,53 \cdot n_s / 2 + 0,3) \cdot [v / \text{m/s}]^2 \text{ N}$$

( $n_s$ : Fahrzeugsektionszahl, v: Geschwindigkeit), für den Widerstand durch Magnetisierungsverluste

$$F_{mag} = n_s \cdot (0,1 \cdot [v / \text{m/s}]^{1/2} + 0,02 \cdot [v / \text{m/s}]^{0,7}) \cdot 10^3 \text{ N}$$

für den Widerstand durch den Lineargenerator zur Deckung des Bordenergiebedarfs maximal

$$F_{\text{lig}} = n_s \cdot (146 / [v / \text{m/s}] - 0,2) \cdot 10^3 \text{ N}$$

oberhalb von 100 km/h und 0 N darunter, sowie für den steigungsbedingten Widerstand (Hangabtriebskraft)

$$F_H = m_{Fzg} \cdot g \cdot \sin(\arctan(\text{stg})) \approx m_{Fzg} \cdot g \cdot \text{stg}$$

mit der Erdbeschleunigung  $g$  und der Steigung  $\text{stg}$ .

Dieses Gleichungssystem beschreibt vollständig die Fahrdynamik des Magnetfahrzeuges. Der verfügbare Leistungsrahmen wird antriebsseitig demnach ausschließlich durch die zur Verfügung stellbare Schubkraft  $F$  und die erreichbare Geschwindigkeit  $v$  bestimmt.

Von sekundärer Bedeutung ist weiterhin die aerodynamische Auftriebskraft

$$F_Z = f_{A1} \cdot 11369 \text{ N} + f_{A2} \cdot 12384 \text{ N} \quad \text{für jede Endsektion und}$$

$$F_Z = f_{A1} / 3 \cdot 24768 \text{ N} \quad \text{für jede Mittelsektion}$$

Hierbei wurden die Auftriebsfaktoren beim Hersteller durch aerodynamische Berechnungen ermittelt. Sie liegen (geschwindigkeitsabhängig) zwischen 0 bis  $-4,6$  für  $f_{A1}$  und 0 bis  $1,6$  für  $f_{A2}$ . Diese Kraft verringert die durch die Tragemagnete aufzubringende Tragkraft und nimmt somit Einfluß auf den Betrag der Tragfeldinduktion  $B$ :

$$B_{\text{mit Auftrieb}} / (B_{\text{ohne Auftrieb}}) = [m_{Fzg} \cdot g + F_Z / (m_{Fzg} \cdot g)]^{1/2}$$

### 3.1.2 Statorstrom

Der Statorstrom ( $i_s$ ) – respektive der Anteil des Statorstromes in Phase zum magnetischen Tragfeld des Fahrzeuges ( $B$ ) – bestimmt die Schubkraft ( $F$ ) des Systems über die Kraftgleichung

$$\underline{F} = i_s \cdot \underline{l} \times \underline{B} \quad (\text{vgl. Anlage 2.1-0}).$$

Die wirksame Länge ( $l$ ) ist durch die Fahrzeuglänge und die Geometrie des Langstators gegeben: Die Eisenbreite ( $b$ ) bestimmt die Länge des Teils der Statorwicklung in der Nut, welcher senkrecht zum magnetischen Tragfeld gerichtet ist und somit einen Beitrag zur gewünschten Schubkraft liefert. Da über die Fahrzeuglänge gesehen mit zunehmender Anzahl der Wicklungsperioden entsprechend viele Nuten mit Wicklungselementen der Länge  $b$  in Reihe geschaltet sind, ergibt sich die gesamte wirksame Länge durch Summation aller Längen  $b$ , die sich im Bereich der Magneten des Fahrzeuges befinden.

Da das Fahrzeug aus einzelnen Sektionen zusammengesetzt wird, deren Länge gegeben ist, und auch die Geometrie des Langstators als gegeben angesetzt wird, läßt sich die Kraftgleichung wie folgt vereinfachen:

$$F = i_s \cdot c_M \cdot n_s$$

Die Schubkraft  $F$  ist hierbei kein Vektor sondern ein Skalar, da nur 2 Richtungen möglich sind (vorwärts/rückwärts gerichtet), welche durch die Richtung des Statorstromes  $i_s$  bestimmt wird. An dieser Stelle wird auf die Verwendung des Zeigerdiagramms elektrischer Drehstrommaschinen übergegangen: Hierbei sind zwei aufeinander senkrecht stehende Achsen definiert, welche die Phasenlage des Stromes im Stator relativ zur Induktion (respektive der induzierten Polradspannung) beschreiben, nämlich die Schubachse (reale Achse; in Phase zur Induktion) und

die Flussachse (imaginäre Achse, um 90° elektrisch gegenüber der Induktion versetzt, bzw. mechanisch gesehen um eine halbe Polteilung in Längsrichtung des Stators versetzt). In der Schubachse liegende Statorströme (Realteile des Statorstromes) bewirken Schubkräfte, je nach Vorzeichen beschleunigend oder bremsend. In der Flussachse liegende Statorströme (Imaginärteile des Statorstromes) bewirken je nach Vorzeichen eine Schwächung oder Stärkung des Erregerfeldes und sind daher im Allgemeinen unerwünscht, da diese die Tragfunktion beeinflussen. Für die Schubkraft ist somit nur der Realanteil (Anteil in Schubachse) des im Allgemeinen komplexen Statorstromes

$$i_s = \text{REAL}(\underline{i}_s)$$

relevant. Die Größe  $n_s$  bezeichnet die Anzahl der Sektionen, aus der sich das Fahrzeug zusammensetzt. Die Motorkonstante  $c_M$  beschreibt das Produkt aus Induktion des Tragfeldes und der Eisenbreite  $b$  multipliziert mit der Anzahl der Nuten im Bereich einer Fahrzeugsektion. Außerdem beinhaltet die Motorkonstante Reduktionsfaktoren, die sich aus der Verstimmung des Motors ergeben (dies sind lokale Abweichungen der idealen Polteilung zwischen Stator und „Rotor“), sowie Reduktionsfaktoren, die sich aus der Drehstromtechnik ergeben. Streng genommen handelt es sich bei der „Motorkonstante“ um keine Konstante, da deren Größe von der Tragfeldinduktion abhängt, welche ihrerseits durch die erforderliche Tragkraft, d.h. Zuladung, bestimmt wird. Jedoch wird dieser Effekt hier nicht vertiefend betrachtet. Typische Werte für die Motorkonstante liegen im Bereich von 40 bis 45 N/A (siehe auch [5]).

Folgende Erkenntnisse lassen sich an dieser Stelle gewinnen:

Die Schubkraft steigt – bei konstantem Statorstrom – mit der Fahrzeugsektionszahl. Setzt man die allgemeine Bewegungsgleichung (ohne Fahrwiderstände)

$$F = m_{\text{Fzg}} \cdot a = m_{\text{Sektion}} \cdot n_s \cdot a$$

mit der Fahrzeugmasse  $m_{\text{Fzg}}$  bzw. der Fahrzeugsektionsmasse  $m_{\text{Sektion}}$  und der Beschleunigung  $a$  gleich der Schubkraft  $F$  so erhält man

$$F = m_{\text{Sektion}} \cdot n_s \cdot a = i_s \cdot c_M \cdot n_s$$

bzw.

$$a = i_s \cdot c_M / m_{\text{Sektion}}$$

Die Anfangsbeschleunigung (Beschleunigung bei Vernachlässigung von Fahrwiderständen) ist demnach nur abhängig vom Statorstrom, nicht jedoch von der Fahrzeuglänge.

Weitere Erkenntnis: Betrachtet man den rechts und links am Fahrweg befindlichen Stator separat, so enthält jeder Stator nur die Hälfte der Nuten im Bereich einer Fahrzeugsektion. Dies bedeutet, daß sich die Motorkonstante bzw. die Schubkraft  $F_{S1}$  für diesen Stator halbiert; gleiches gilt für den zweiten Stator ( $F_{S2}$ ):

$$F_{S1} = i_{S1} \cdot c_M / 2 \cdot n_s$$

$$F_{S2} = i_{S2} \cdot c_M / 2 \cdot n_s$$

Um in Summe wieder die gleiche Schubkraft zu erhalten, muß in jeden Stator der gleiche Strom  $i_{S1} = i_{S2} = i_s$  eingespeist werden oder aber ein geringer Strom in einem Stator muß durch einen entsprechend höheren im anderen Stator ausgeglichen werden. Diese Tatsache ist von Bedeutung bei Beurteilung der Statorabschnittswchsel.

### 3.1.3 Polradspannung

Neben dem Statorstrom bestimmt die Polradspannung ( $u_p$ ) die Leistungsfähigkeit des Antriebes. Die Polradspannung läßt sich entweder über das Induktionsgesetz mit Hilfe der Tragfeldinduktion ( $\underline{B}$ ), der wirksamen Leiterlänge ( $l$ ) und der Änderung der Induktion ( $d\underline{B}/dt$ ) herleiten oder einfach über die Leistungsbilanz des Motors. Dazu wird die innere Leistung einer elektrischen Synchronmaschine

$$P = 3 \cdot u_p \cdot i_s$$

mit der allgemeinen Leistungsgleichung der Kinetik

$$P = F \cdot v$$

(wobei  $P$  die Leistung und  $v$  die Geschwindigkeit darstellt) gleichgesetzt und nach der Polradspannung aufgelöst:

$$u_p = F \cdot v / (3 \cdot i_s)$$

bzw. mit Beachtung der Motorkonstante:

$$u_p = i_s \cdot c_M \cdot n_s \cdot v / (3 \cdot i_s) = c_M \cdot n_s \cdot v / 3$$

Wesentliche Erkenntnis hierbei: Die in den Stator induzierte Spannung steigt einerseits mit der Fahrzeuggeschwindigkeit und andererseits mit der Sektionszahl. Dies ist für die Bemessung der Speisespannung von Bedeutung.

## 3.2 **Einflußparameter**

Dieses Kapitel zeigt auf, welche Parameter so auf das System Einfluß nehmen, daß die Leistungsmerkmale (Statorstrom und Polradspannung) in den gewünschten Größen liegen. Weiterhin wird der Einfluß auf Kosten und Energiebedarf hergeleitet. Dazu werden die elektrischen Eigenschaften der Komponenten des Antriebssystems betrachtet, ausgehend vom Stator.

### 3.2.1 Stator

#### Elektrische Einflußgrößen

Aus elektrischer Sicht stellt der Stator eine Übertragungsleitung dar. Leitungen lassen sich durch ihren Impedanzbelag beschreiben. Aufgrund von Messungen (z.B. [5]) sind Werte hierfür bekannt:

$$\text{Statorlängswiderstandsbelag } R_S' = 0,23 \, \Omega/\text{km} \cdot (1 + T/20^\circ\text{C}) \cdot (1 + 0,004 \cdot f/\text{Hz})$$

$$\text{Statorinduktivitätsbelag } L_S' = 2,6 \, \text{mH}/\text{km}$$

$$\text{Storkapazitätsbelag } C_S' = 1 \, \mu\text{F}/\text{km}$$

Der Statorquerleitwert  $G_S'$  ist vernachlässigbar klein.

Hierbei beudeuten  $f$  die Betriebsfrequenz und  $T$  die Leitertemperatur. Zusätzlich ist eine durch die Tragsmagnete verursachte Hauptfeldinduktivität  $L_H' = 4 \text{ mH/km}$  zu beachten, jedoch nur im Bereich des Fahrzeuges, nicht im übrigen Bereich des Langstatorabschnitts.

Konventionelle Energieübertragungssysteme werden bei Frequenzen von 50 Hz bzw.  $16^{2/3}$  Hz (Bahnanwendungen) betrieben. Bei der Magnetbahn ist das anders: Da der Strombelag des Stators dem Fahrzeug synchron folgen muss, ergeben sich zwangsweise variable Betriebsfrequenzen. Abhängig von der Geschwindigkeit können diese auch deutlich oberhalb von 50 Hz liegen.

Auf der anderen Seite erstreckt sich der Langstatormotor je nach Auslegung evtl. über mehrere Kilometer zwischen dem Einspeisepunkt der Energie und dem „Verbraucher“ Fahrzeug (noch größer sind die Längen bei den Streckenkabeln, siehe weiter unten). Aus der Elektrotechnik (z.B. [7]) ist bekannt, dass eine Verwendung von Gleichungssystemen mit diskreten Bauteilen wie Induktivitäten und Widerständen nur dann zu genauen Ergebnissen führt, wenn das Produkt aus Betriebsfrequenz und Übertragungslänge hinreichend klein ist. Andernfalls muss eine genauere Berechnung der Energieübertragung unter Verwendung der aus der Wellentheorie bekannten Gleichungssysteme angewandt werden. Dazu wird der Langstatormotor als eine Energieübertragungsleitung angesehen.

Nach [7] können aus den Impedanzbelägen die relevanten Ausbreitungsdaten ermittelt werden:

$$\text{Statorwellenwiderstand: } \underline{Z}_{WS} = [(R_S' + j \cdot \omega \cdot L_S') / (j \cdot \omega \cdot C_S')]^{1/2}$$

$$\text{Ausbreitungsmaß Stator: } \underline{\gamma}_S = [(R_S' + j \cdot \omega \cdot L_S') \cdot (j \cdot \omega \cdot C_S')]^{1/2}$$

$$\text{Wellenlänge Stator: } \lambda_S = 1 / (f \cdot [L_S' \cdot C_S']^{1/2})$$

Mit der Winkelgeschwindigkeit  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$  und der Kreiszahl  $\pi$ .

Weiterhin lassen sich bei bekannter Statorabschnittslänge  $d_S$  folgende Ausbreitungsfaktoren ermitteln:

$$\underline{x}_S = 1/2 \cdot (e^{\underline{\gamma}_S \cdot d_S} + e^{-\underline{\gamma}_S \cdot d_S})$$

$$\underline{y}_S = 1/2 \cdot (e^{\underline{\gamma}_S \cdot d_S} - e^{-\underline{\gamma}_S \cdot d_S})$$

wobei  $e$  die Basis des natürlichen Logarithmus darstellt. Strom ( $i_{ES}$ ) und Spannung ( $u_{ES}$ ) an der Einspeisestelle (Schaltstelle) werden mit Hilfe dieser Ausbreitungsfaktoren bis zum Fahrzeug, hier am anderen Ende des Statorabschnittes angenommen, übertragen:

$$u_{ES} = u_P \cdot \underline{x}_S + i_S \cdot (\underline{y}_S \cdot \underline{Z}_{WS} + j \cdot \omega \cdot L_H)$$

$$i_{ES} = u_P \cdot \underline{y}_S / \underline{Z}_{WS} + i_S \cdot \underline{x}_S$$

Die Hauptfeldinduktivität ist hier vereinfachend als diskretes Element angenommen. Die Polradspannung  $u_P$  ist hier real, da sie definitionsgemäß in der Schubachse liegt. Physikalisch exakt müßte für den Bereich des Fahrzeuges eine zweite Wellengleichung aufgestellt werden. Ebenso ist eine zweite Wellengleichung für den Bereich zwischen Fahrzeug und Sternpunkt des Statorabschnittes in gleicher Art und Weise anzusetzen, wenn sich das Fahrzeug nicht an diesem Ende befindet wie in obiger Gleichung unterstellt. Dabei wird jeweils Strom und Spannung in Amplitude und Phasenlage durch die Dämpfung (ohmscher Widerstand  $R_S$  des Statorabschnitts) und Reaktanz (Induktivität  $L_S$  und Kapazität  $C_S$  des Statorabschnitts) verändert.

Für den Fall  $\lambda_S \gg d_S$  läßt sich das System in ein einfaches elektrisches Ersatzschaltbild mit diskreten Elementen überführen (vgl. Abbildung 3.2-1). Aus Hochgeschwindigkeitsanwendungen

ist bekannt, daß bei derartigen Vereinfachungen Fehler entstehen. Für die hier betrachteten typischen Geschwindigkeiten  $v$  (Größenordnung 60 m/s) läßt sich über die Polteilung  $\tau_p$  der Maschine die erforderliche Betriebsfrequenz  $f$  bestimmen:

$$f = v / (2 \cdot \tau_p) = 60 \text{ m/s} / 0,516 \text{ m} = 116 \text{ Hz}$$

Damit ergibt sich eine Wellenlänge von  $\lambda_s = 131 \text{ km}$ . Bei einer angenommenen Statorabschnittslänge von 2 km ist somit der Fehler durch Verwendung des einfachen Ersatzschaltbildes vernachlässigbar: Genauigkeit =  $\cos(2 \cdot \pi \cdot 2 \text{ km} / 131 \text{ km}) = 99,5\%$ .

An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, daß der Statorstrom im Allgemeinen komplex sein kann, d.h. Anteile in Schubachse und Anteile in Magnetisierungsachse enthalten kann. Stromanteile in der Magnetisierungsachse nehmen Einfluß auf das Tragfeld (Ankerrückwirkung) und sind deshalb i.d.R. seitens des Fahrzeuges unerwünscht. Aus Sicht des Antriebes können sie jedoch einen positiven Einfluß darstellen, da sie induktive Spannungsfälle im Stator kompensieren können und somit den Spannungsbedarf an der Schaltstelle reduzieren bzw. bei gegebenem Spannungsbetrag einen erhöhten Strom in der Schubachse ermöglichen. Dies wird an späterer Stelle im Zusammenhang mit den Streckenkabeln und Umrichtern weiter verdeutlicht.

Als wesentliche Punkte sind festzuhalten:

- Um einen gewünschten Statorstrom  $i_s$  einzuprägen, ist additiv zur Polradspannung der Spannungsabfall durch die Statorimpedanz an der Einspeisestelle des Statorabschnittes anzulegen. Letztere sind abgesehen von der Hauptinduktivität des Fahrzeuges nur durch die Länge des Statorabschnittes bestimmt.
- Veränderungen des Statorstromes im Statorabschnitt sind bei den hier betrachteten Betriebsfrequenzen vernachlässigbar.

### Kosteneinfluß

Da an den Enden der Statorabschnitte Schaltstellen zur Einspeisung bzw. zum Schließen des Sternpunktes erforderlich sind, nimmt die Statorabschnittslänge  $d_s$  überschlägig folgenden Einfluß auf die Kosten  $K$  einer Strecke der Gesamtlänge  $d_G$ :

$$K = d_G / d_s \cdot n_{st} \cdot K_{ss}$$

Dabei sind die Kosten einer Schaltstelle  $K_{ss}$  sowie die Zahl der Statoren  $n_{st}$  von Bedeutung. Die Zahl der Statoren ergibt sich aus dem Statorabschnittswchselverfahren: Beim Bocksprung- und Kurzschlußverfahren liegt ein Stator vor, bei den übrigen Verfahren zwei.

### Einfluß auf Energiebedarf

Der jeweils aktive Statorabschnitt verursacht durch seinen ohmschen Widerstand Verluste und trägt somit zum Leistungs- und Energiebedarf des Antriebes bei. Die Verlustleistung des Statorabschnittes  $P_{vs}$  beträgt im vereinfachten Modell

$$P_{VS} = 3 \cdot R_S' \cdot d_S \cdot |i_S|^2$$

Die Verlustenergie im Statorabschnitt  $E_S$  erhält man über die zeitliche Integration des Verlustleistungsverlaufes

$$E_S = \int P_{VS}(t) \cdot dt$$

### 3.2.2 Strecken-kabel

#### Elektrischer Einfluß

Zur Übertragung der Energie vom Unterwerk zu den Statorabschnitten dienen Streckenkabel entlang der Trasse. Diese stellen aus elektrischer Sicht ebenfalls eine Übertragungsleitung dar. Im Gegensatz zum Langstator selbst sind die Impedanzbeläge jedoch nicht gegeben, sondern vom für den Einsatzfall gewählten Kabeltyp (insbesondere Leiterquerschnitt) und Anzahl bestimmt. Entsprechende Projektierungsdaten sind z.B. in [4] angegeben.

Das Gleichungssystem läßt sich in Analogie zum Stator aufstellen. Beispielhaft wird hier mit folgenden Daten der Transrapid Versuchsanlage Emsland (TVE) abgeschätzt, ob mit dem vereinfachten Ersatzschaltbild gerechnet werden darf.

$$R_K' = 0,208 / n_{pK} \Omega/\text{km}$$

$$L_K' = 0,285 / n_{pK} \text{ mH}/\text{km}$$

$$C_K' = 0,365 \cdot n_{pK} \mu\text{F}/\text{km}$$

Mit der Zahl der parallel verlegten Kabelsysteme  $n_{pK} = 4$ .

Die Projektierungsdaten für Kabel nach [4] gelten für 50 Hz Drehstromanwendungen. In [3] ist nachzulesen, auf welche Art die Betriebsfrequenz über Skineffekt und Näheeffekt abhängig vom Aufbau des Kabels den Wirkwiderstand der Kabel beeinflusst. Aufgrund des Umfangs der Gleichungssysteme wird an dieser Stelle auf eine Wiedergabe des Formelwerks verzichtet. Es wurde jedoch bei den Berechnungen stets beachtet.

Mit diesen Daten ergibt sich beispielhaft bei einer Betriebsfrequenz von  $f = 116 \text{ Hz}$  ( $60 \text{ m/s}$ ) eine Wellenlänge  $\lambda_K$ :

$$\lambda_K = 1 / (f \cdot [L_K' \cdot C_K']^{1/2}) = 267 \text{ km}$$

Rechnet man mit Kabellängen von 30 km, so beträgt die Genauigkeit  $G$  bei Verwendung eines vereinfachten Ersatzschaltbildes in Analogie zum obigen Kapitel

$$G = \cos(2 \cdot \pi \cdot 30 \text{ km} / 267 \text{ km}) = 76,1\%.$$

Die Abweichung ist hier so erheblich, daß die Vereinfachung unzulässig wäre.

Für die praktische Umsetzung im Simulationsprogramm bedeutet dies, daß grundsätzlich mit den exakten Wellengleichungen zu rechnen ist, was fallbezogene Prüfungen der Zulässigkeit von Vereinfachungen erübrigt. Lediglich bei Frequenzen unter ca. 1 Hz wird aus numerischen Gründen das vereinfachte Modell verwendet. Zur Verdeutlichung verschiedener Zusammenhänge eignet

sich jedoch das vereinfachte Ersatzschaltbild aufgrund seiner Anschaulichkeit besser, so daß es hier in verschiedenen bildlichen Darstellungen weiterhin verwendet wird.

Ein weiterer zu beachtender Aspekt bei Berechnung der Kabel besteht in den zwei unterschiedlichen Speiseverfahren – Einfach- und Doppelspeisung. Während bei Einfachspeisung der gesamte Strom vom Umrichter über die Schaltstelle in den Stator fließt, addieren sich bei Doppelspeisung die Ströme der beiden beteiligten Umrichter an der Schaltstelle. Dementsprechend sind hierfür zwei Übertragungsgleichungssysteme erforderlich. Außerdem entstehen Freiheitsgrade hinsichtlich der Aufteilung der Ströme auf die Unterwerke. Der Strom an der Schaltstelle  $\underline{i}_{SS}$  läßt sich beliebig in Anteile aus Richtung des Unterwerks A ( $\underline{i}_{SSA}$ ) und aus Richtung des Unterwerks B ( $\underline{i}_{SSB}$ ) aufspalten:

$$\underline{i}_{SS} = \underline{i}_{SSA} + \underline{i}_{SSB}$$

Hierbei ist zu beachten, daß der Strom im Allgemeinen komplex ist, d.h. Anteile in der Schubachse und Anteile in der Magnetisierungsachse enthält.

Die Aufteilung des Stromes ist sowohl für den Spannungsfall über die Kabelimpedanzen von Bedeutung (vgl. nächstes Kapitel) als auch für die Verlustleistung. Letztere ist von elementarer Bedeutung für die thermische Auslegung der Kabel.

### Kosteneinfluß

Der Einfluß auf die Kosten der Kabel ergibt sich unmittelbar über die Zahl der verwendeten parallelen Kabel  $n_{pK}$ , den spezifischen Kosten des gewählten Kabeltyps  $K_K$ , der Kabeltrassenlänge  $d_K$  sowie dem Statorabschnittsverfahren, welches die Zahl der benötigten Verbunde  $n_V$  bestimmt:

$$K = n_{pK} \cdot K_K \cdot d_K \cdot n_V$$

Die spezifischen Kabelkosten müssen die zugehörigen Verlegekosten enthalten, da diese einen wesentlichen Anteil darstellen.

### Einfluß auf Energiebedarf

In Analogie zum Stator erhält man in erster Näherung für die Verlustleistung in den Kabeln  $P_{VK}$

$$P_{VK} = 3 \cdot R_K' \cdot d_K \cdot |\underline{i}_K|^2$$

Mit dem Kabelstrom  $\underline{i}_K$ , der sich bei Doppelspeisung jeweils aus einem Anteil des Statorstromes  $\underline{i}_S$  zusammensetzt. Man beachte, daß der spezifische Kabelwiderstand  $R_K'$  neben dem Gleichstromwiderstand des gewählten Kabeltyps Anteile durch Skin- und Näheeffekt, thermisch bedingte Widerstandserhöhungen sowie die Zahl der parallelen Kabel enthält.

Wie oben gezeigt ist diese Darstellung mit diskreten Elementen jedoch ungenau. Aus der Wellentheorie läßt sich die Verlustleistung  $P_K$  am einfachsten über die Leistungsbilanz am Anfang und am Ende des betrachteten Kabels ermitteln:

$$P_{VK} = \text{REAL} [ 3 \cdot \underline{u}_T \cdot \underline{i}_T^* - 3 \cdot \underline{u}_{SS} \cdot \underline{i}_{SS}^* ]$$

Hierbei bezeichnet \* die konjugiert komplexe Größe, der Index T steht für die elektrischen Größen am Trafo der Umrichter, d.h. am Anfang des Kabels, der Index SS steht für die Schaltstelle (Ende des Kabels).

Die Verlustenergie erhält man über zeitliche Integration der Verlustleistung.

### 3.2.3 Umrichter mit Trafos

#### Elektrischer Einfluß

Der Einfluß des ausgangsseitigen Trafos der Umrichter ist zum einen durch seine Impedanz (ohmscher Widerstand  $R_T$ , Induktivität  $L_T$ ) bestimmt und zum anderen durch seine Übersetzung  $\underline{u}$ . Für Strom  $\underline{i}_{UR}$  und Spannung  $\underline{u}_{UR}$  des Umrichters gilt mit den Größen  $\underline{i}_T$  und  $\underline{u}_T$  am Kabelanfang:

$$\underline{i}_{UR} = \underline{i}_T \cdot \underline{u}$$

$$\underline{u}_{UR} = [\underline{u}_T - \underline{i}_T \cdot (R_T + j \cdot \omega \cdot L_T)] / \underline{u}$$

Typische Werte sind  $R_T = 0,02 \Omega$  und  $L_T = 0,4 \text{ mH}$  (TVE, vgl. [5]), wobei für den Direkttaktbetrieb (Umgehung des Trafos bei kleinen Frequenzen) etwas günstigere Daten gelten.

Wesentlich hierbei ist, daß weder Spannung noch Strom die Nennwerte des Umrichters  $i_{Nenn}$ ,  $u_{Nenn}$  übersteigen dürfen:

$$|\underline{i}_{UR}| \leq i_{Nenn}$$

$$|\underline{u}_{UR}| \leq u_{Nenn}$$

Mit Hilfe des aus der Synchronmaschine bekannten Zeigerdiagramms läßt sich so unter Verwendung der vereinfachten Gleichungssysteme mit diskreten Bauelementen veranschaulichen, wie die verfügbaren Umrichternenngrößen mit den Leistungsgrößen  $u_p$  und  $i_s$  zusammenhängen (Bild 3.2-1), wobei  $R_T$  und  $L_T$  vereinfachend den Kabelimpedanzen zugeschlagen wurden:

Liegt der Statorstrom in der Schubachse (Kippunkt der Maschine), d.h. in Phase zur Polradspannung, so liegt der Strom im Kabel  $\underline{i}_K$  in Richtung Flußachse verschoben, da ein Teil des Stromes in die Kapazitäten des Kabels und der Statorwicklung abzweigt. Die Spannungen am Kabel fallen gemäß der jeweiligen Stromrichtung ohmsch und induktiv ab. Addiert man alle Spannungsabfälle zur Polradspannung, so erhält man die anzulegende Spannung, um die angenommenen Ströme einspeisen zu können. Im gezeigten Fall sei die anzulegende Spannung  $\underline{u}$  betragsmäßig gleich der Nennspannung  $u_{Nenn}$ .

Erhöht man entweder die Impedanzen (z.B. durch größere Längen des Statorabschnitts oder der Kabel) oder will man eine größere Geschwindigkeit fahren (höhere Polradspannung) oder will man die Schubkraft erhöhen (höherer Statorstrom  $i_s$ ) so ist dies im Kippunkt nicht möglich. Anlage 3.2-2 zeigt, wie dies durch Einspeisung eines Statorstromes in die Flußachse trotzdem erreicht werden kann: Im Beispiel sind Nennspannung, Polradspannung und Streckenimpedanzen unverändert, der Statorstrom enthält jedoch zusätzlich Blindanteile ( $\text{IMAG}(i_s)$ ). Die induktiven Spannungsabfälle dieses Imaginärteils kompensieren die ohmschen Spannungsabfälle des Realteils. In Summe wird so weniger Spannung  $\underline{u}$  benötigt. Die Differenz zwischen  $|\underline{u}|$  und  $u_{Nenn}$  kann nun dazu verwendet werden, den Realteil des Statorstromes weiter zu erhöhen.

An dieser Stelle sei daran erinnert, daß bei Doppelspeisung eine beliebige Stromaufteilung an der zu speisenden Schaltstelle möglich ist. Hier gibt es stets zwei Zeigerdiagramme, eines für das eine und eines für das andere Unterwerk. Liegt ein Unterwerk (A) mit der Spannung am Nennwert, das andere (B) jedoch nicht, so ist es möglich, den Strom so aufzuteilen, daß das hoch belastete Unterwerk A weniger und das Unterwerk B mehr Strom liefert, so daß letztlich beide Unterwerke an ihrem Nennwert liegen und der Statorstrom maximiert wurde. Dabei kann z.B. auch Blindstrom zwischen den Unterwerken ausgetauscht werden, um ein Unterwerk spannungsmäßig zu entlasten.

Diese Aufteilung ist jedoch nicht zwangsläufig auch das Optimum des Wirkungsgrades des Antriebes. Eine geschlossene optimale Lösung – sei es nach maximal möglichem Schub oder optimalem Wirkungsgrad – ist nicht trivial, da das Zeigerdiagramm nur eine stark vereinfachte Darstellung ist und im Allgemeinen Strom und Spannung über die Leitungslänge verändert werden, siehe Wellengleichungen. Anhaltspunkte für das Wirkungsgradoptimum sind: keine Statorströme in Feldachse (diese tragen nicht zur mechanischen Leistung bei sondern verursachen nur ohmsche Verluste) und Aufteilung der Ströme bei Doppelspeisung so, daß das Kabel mit der großen Widerstand wenig und das Kabel mit dem kleineren Widerstand mehr Strom führen muß, d.h. Aufteilung reziprok zu den beteiligten Widerständen der Kabel A und B:

$$P_{Vmin} \approx R_S \cdot i_S^2 + R_T \cdot i_T^2 + R_{KA} \cdot [i_S \cdot R_{KB} / (R_{KA} + R_{KB})]^2 + R_{KB} \cdot [i_S \cdot R_{KA} / (R_{KA} + R_{KB})]^2$$

Zur exakten Berechnung wurden in die Antriebssimulation numerische Iterationsverfahren integriert, welche nach dem gewünschten Schuboptimum suchen. Dieses wird also letztlich durch „Probieren“ ermittelt.

### Kosteneinfluß

Die Umrichter nehmen hauptsächlich durch ihre Stückzahl Einfluß auf die Gesamtkosten. Die Bemessung der Trafos kann hingegen nach Bedarf erfolgen, was eine Kostenanpassung dieser Komponente ermöglicht. Die Stückzahl ist gegeben durch die Zahl der Unterwerke, das Abschnittswelchverfahren (Umrichter pro Block) und das Speiseverfahren (einfach/doppelt).

Die Zahl der Unterwerke ist von übergeordneter Bedeutung für die Gesamtkosten. Entsprechende Optimierungen sind im nächsten Kapitel erläutert.

### Einfluß Energiebedarf

Der Energiebedarf des Trafos ergibt sich durch Integration der ohmschen Verluste in Analogie zum Stator. Die Umrichter tragen durch ihren Wirkungsgrad (ca. 90-95%) zur Energiebilanz bei.

## **3.3 Zusammenschau der Einflußparameter**

Anlage 3.3-1 listet die bislang ermittelten Einflußparameter auf. Auf Basis der bisher erarbeiteten Erkenntnisse kann man die Parameter in 4 Gruppen einteilen:

### Eingangsparameter:

Diese Größen liegen im Allgemeinen als Vorgaben vor, z.B. als Wunschgrößen seitens eines Kunden. Sie gehen wie folgt ein:

- Streckenprofil: Nimmt durch die Steigungen Einfluß auf Fahrwiderstände und durch die Trassierung (Kurvenradien) auf die zulässige Höchstgeschwindigkeit. Beides geht über Strom- und Spannungsbedarf in die Leistungsparameter ein. Über die Lage der Stationen wird das örtlich benötigte Leistungsvermögen (Schubkraft) mitbestimmt.
- Fahrzeitvorgabe: Bestimmt erforderliche Höchstgeschwindigkeit und Beschleunigungsvermögen.
- Fahrtakt: Bestimmt maßgeblich die zeitliche Länge der Antriebsbereiche.
- Verkehrsaufkommen: Bestimmt die erforderliche Fahrzeuglänge und nimmt damit Einfluß auf den Spannungsbedarf.

#### Leistungsparameter:

Die Leistungsparameter dienen der Erfüllung der Anforderungen aus den Eingangsparametern. Sie definieren die Leistungsfähigkeit des Systems im weiteren Sinne:

- Schubkraft: Ermöglicht die erforderlichen Beschleunigungen und damit Fahrzeiten.
- Höchstgeschwindigkeit: Ermöglicht die geforderten Fahrzeiten.
- Energiebedarf: Zeigt den Erfolg von Optimierungen des Antriebes hinsichtlich Betriebskosten.
- Kosten: Zeigt den Erfolg von Optimierungen des Antriebes hinsichtlich zu tätiger Investitionen und Betriebskosten (Instandhaltungsaufwendungen).

#### Optimierungsparameter:

Anhand der in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Zusammenhänge lassen sich diese Parameter als Gegenstand von Optimierungsbemühungen ausmachen:

- Unterwerksabstand: Nimmt maßgeblich Einfluß auf die benötigte Anzahl der Unterwerke und damit der Kosten. Beeinflußt die benötigten Kabellängen und nimmt so Einfluß auf Energiebedarf.
- Umrichter: Definiert die verfügbare Spannung und den verfügbaren Strom und somit das Leistungsvermögen.
- Statorabschnittslängen: Bestimmen über die Impedanzen (Spannungsbedarf) das örtlich verfügbare Leistungsvermögen und den Energiebedarf. Nehmen über die Zahl der benötigten Schaltstellen Einfluß auf die Kosten.
- Streckenkabel: Bestimmen über die Impedanzen (Spannungsbedarf) das verfügbare Leistungsvermögen und den Energiebedarf. Nehmen über Zahl und Typ Einfluß auf die Kosten.
- Abschnittsverfahren: Nehmen Einfluß auf Kosten (Anzahl der benötigten Verbunde), Schubkraft (Einbrüche am Abschnittwechsel) und Höchstgeschwindigkeit (durch mittlere

verfügbare Schubkraft aufgrund von Einbrüchen im Abschnittwechsel bei hohen Geschwindigkeiten).

- Speiseverfahren: Unmittelbarer Einfluß auf die Kosten durch Zahl der benötigten Antriebsblöcke, Einfluß auf verfügbare Schubkraft durch Zahl der speisenden Antriebsblöcke, Einfluß auf Energiebedarf durch Stromaufteilung falls möglich.
- Fahrzeugsektionen: Einfluß auf Spannungsbedarf über Polradspannung.

### 3.4 Antriebsauslegung

In den vorangegangenen Kapiteln wurden die verschiedenen Parameter einzeln untersucht, sowohl hinsichtlich ihrer physikalisch-technischen Effekte als auch hinsichtlich ihrer Einflussnahme auf Kosten und Energiebedarf. Die Wirkung im Zusammenhang zeigt Anlage 3.4-1:

Die Leistungsparameter Schubkraft, Höchstgeschwindigkeit, Energiebedarf und Kosten werden auf indirektem Wege von praktisch allen Eingangsgrößen und Optimierungsparametern beeinflusst. Es folgt eine Diskussion weiterer wichtiger unmittelbaren Abhängigkeiten:

Sämtliche Optimierungsparameter beeinflussen die Schubkraft. Das bedeutet, dass eine bestimmte Schubkraft stets durch Kombination verschiedenster Optimierungsparameter erzielt werden kann. Insbesondere ist es möglich, Maßnahmen mit hohem finanziellem Aufwand zur Schubkraftsteigerung, wie z.B. eine hohe, dicht aufeinander folgende Zahl von Unterwerken zu vermeiden und statt dessen vergleichsweise wenig aufwändige Methoden, z.B. verkürzte Statorabschnitte mit einer kleinen Impedanz zu verwenden, um den gewünschten Effekt zu erzielen.

Die Höchstgeschwindigkeit wird auf technischer Seite unmittelbar durch den Umrichtertyp (bzw. Trafoubersetzung) durch sein Leistungsvermögen und seine Nennspannung bestimmt. Auf Seiten der Eingangsparameter wirkt einerseits die Trassierung durch Kurvenradien, Kuppen und Wannen begrenzend, andererseits stellt aber auch eine vorgegebene Anforderung an eine Fahrzeit Vorgaben an die zu erreichende Höchstgeschwindigkeit. Um diese erreichen zu können, sind wiederum unter Beachtung der Haltestellenabstände bestimmte Schubkräfte zur Beschleunigung erforderlich. Wie schon gezeigt, nehmen alle Optimierungsparameter Einfluss auf die Schubkraft. Somit bestimmen letztlich die Trassierung, die Haltestellenabstände und die geforderten Fahrzeiten/Höchstgeschwindigkeiten die gesamte Systemauslegung, mit Wirkung auf die Kosten. Aus diesem Grunde sollten bei der Projektplanung Belange der Systemauslegung in den Prozess der Streckenfindung eingebracht werden, um ein Gesamtoptimum zu erhalten.

Der Energiebedarf wird neben Impedanzen und Wirkungsgradunterschieden von verschiedenen Speiseverfahren und Fahrzeuglängen (der Wirkungsgrad verbessert sich aufgrund des günstiger werdenden Verhältnisses von Schubkraft zu Verlustleistung mit länger werdenden Fahrzeugen) primär durch die Höchstgeschwindigkeit und die erforderlichen Schubkräfte bestimmt. Beide Faktoren, insbesondere aber die Höchstgeschwindigkeit, hängen stark von planerischen Eingangsdaten (maßgeblich der Trassierung) ab.

Die Kosten (Investition und Instandhaltung) werden durch die Zahl der Unterwerke, Typ und Anzahl der Umrichter in den Unterwerken, Zahl der Schaltstellen und Streckenkabel maßgeblich bestimmt. Die Anlagenkosten werden weiterhin durch die Anzahl der benötigten Fahrzeugsektionen beeinflusst, welche sich unmittelbar aus dem Verkehrsaufkommen und der Fahrzeugvorgabe ableiten lässt. Die Fahrzeuge werden in dieser Arbeit jedoch nicht näher betrachtet (gestrichelte Linie in Anlage 3.4-1).

Es wird deutlich, dass Unterwerksabstand, Umrichter, Statorabschnittslängen und Streckenkabel gleichermaßen unmittelbar die Kosten als auch die Schubkraft (und damit die Schlüsselkomponente zur Erfüllung der vorgegebenen Eingangsparameter) bestimmen. Eine optimierte Antriebsauslegung muss daher primär diese Parameter beachten.

Um ein Kostenoptimum zu erhalten, müssen zuerst die kostenintensivsten Komponenten auf das erforderliche Mindestmaß reduziert werden, anschließend können die weniger teuren Komponenten sukzessive so weit reduziert werden, dass die gewünschte Schubkraft gerade noch verfügbar ist. Im Vorgriff auf Kapitel 18.1 zeigt sich, dass beim Stand der Technik die Kostenanteile i.d.R. in folgender Reihenfolge zu gewichten sind:

1. Unterwerke (mit Umrichtern)
2. Streckenkabel
3. Schaltstellen

Daraus folgt, dass die Zahl der Unterwerke vordringlich zu minimieren ist. Dies gelingt am einfachsten durch Vorgabe relativ großer Fahrtakte, da dies die Zahl der Fahrzeuge auf der Strecke und damit der benötigten Antriebsbereiche, die von einem Unterwerk zu speisen ist, minimiert. Allerdings kann diese Option normalerweise nicht genutzt werden, da die Takte vom Auftraggeber vorgegeben sind, d.h. die Antriebsbereiche ergeben sich automatisch aus dem Takt. Als weitere Alternative bietet sich gemäß Anlage 3.4-1 die Wahl eines kostengünstigen Speiseverfahrens an, nämlich der Einfachspeisung: Hierbei muss die Energie eines Antriebsbereiches von nur einem Unterwerk bereitgestellt werden statt von zweien. Dadurch ergeben sich normalerweise auch gleichzeitig Einsparungen an der Anzahl der eingesetzten Umrichter. Weiterhin wird die Standortwahl erleichtert, da sich Unterwerke für Einfachspeisung prinzipiell an beliebiger Stelle im Antriebsbereich anordnen lassen, während bei Doppelspeisung die Unterwerke an den Bereichsgrenzen stehen müssen, welche wiederum durch den Takt fest vorgegeben sind. Voraussetzung für den Einsatz der Einfachspeisung ist einerseits, dass die verfügbaren Umrichter ausreichend Leistung bereitstellen können und dass ein hinreichendes Redundanzkonzept vorliegt.

Die Zahl der Umrichter wurde bereits im Zusammenhang mit der Zahl der Unterwerke diskutiert. Jedoch nimmt auch das gewählte Abschnittsverfahren unmittelbar Einfluss auf die Zahl der benötigten Umrichter und auch der Streckenkabelsysteme einerseits sowie der verfügbaren Schubkraft insbesondere bei hohen Geschwindigkeiten durch die Schubkraftverluste beim Abschnittwechsel andererseits. Aus Kostengründen sollte daher ein Abschnittsverfahren gewählt werden, welches mit einem Minimum an Umrichtern/Kabelsystemen auskommt, soweit die zu erzielende Höchstgeschwindigkeit dies erlaubt.

Ein weiterer wichtiger Optimierungsschritt bei den Umrichtern besteht in deren leistungsmäßiger und insbesondere spannungsmäßiger Bemessung: Gelingt es, Umrichtertypen geringerer Leistung einzusetzen, die vorzugsweise aus kostengünstigen Serienumrichtern abgeleitet werden können, so wirkt sich dies erheblich auf die wirtschaftlichen Daten der Auslegung aus. Ob eine kleinere Leistung eingesetzt werden kann ergibt sich daraus, ob es gelingt, mit Hilfe der Trafoubersetzung am Umrichterausgang einerseits ausreichend Spannung bereitzustellen um die Polradspannung bei Höchstgeschwindigkeit kompensieren zu können und andererseits den Ausgangsstrom genügend hoch einstellen zu können, damit die erforderlichen Schubkräfte aufgebracht und die Höchstgeschwindigkeit erreicht werden kann.

Die Streckenkabel lassen sich so weit reduzieren, dass sie die von ihnen zu transportierende Leistung noch zu keinen thermischen Überlastungen führt. Dann ist der minimale Kostenaufwand für Streckenkabel erreicht.

Als letzter und einfachster Schritt können die Statorabschnitte so lange verkürzt oder verlängert werden bis die erforderliche Schubkraft und Höchstgeschwindigkeit gerade erreicht werden.

## 4 Vorgehen zur Optimierung

Die Optimierungsparameter nehmen praktisch alle gleichzeitig Einfluß auf die Leistungsparameter. Eine optimale Auslegung des Antriebssystems ergibt sich daher nicht von selbst. Im Folgenden wird daher unter Beachtung der quantitativen Wirkung der verschiedenen Parameter ein Vorgehen zur optimalen Auslegung eines Antriebssystems erarbeitet.

### 4.1 Prioritäten

Es ist offensichtlich, daß Optimierungen eines der vier identifizierten Leistungsparameter – Höchstgeschwindigkeit, Schubkraft, Kosten und Energiebedarf – stets zu Lasten mindestens eines anderen Parameters gehen. Verkürzt man z.B. die Statorabschnitte um weniger Impedanz, d.h. mehr Schubkraft zu erhalten, so werden mehr Schaltstellen benötigt, die Kosten steigen somit. Aus diesem Grunde muß eine Wichtung oder Priorisierung der Parameter erfolgen. Dazu folgende Überlegungen:

Die Realisierung eines Projektes hängt i.d.R. unmittelbar von den wirtschaftlichen Daten der Anlage ab, d.h. den Investitions- und Betriebskosten. Trotzdem können diese Parameter für die Auslegung des Systems aus rein praktischen Gründen nie erste Priorität haben. Ansonsten würde daraus nämlich eine Auslegung mit Höchstgeschwindigkeiten und Schubkraft nahe 0 resultieren, was eine absurde Auslegung wäre mit der ein sinnvoller Betrieb unmöglich ist. Es ist daher abzuwägen, ob prioritär die Höchstgeschwindigkeit oder die Schubkraft optimiert werden soll. Dies kann je nach Anwendung unterschiedlich sein.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich schwerpunktmäßig mit Anwendungen regionalen Charakters. Hier gestalten sich Trassierungen aufgrund der oftmals dichten Bebauung i.d.R. schwierig, so daß die trassenseitig gegebenen Höchstgeschwindigkeiten ein für die Magnetschnellbahn relativ niedriges Niveau aufweisen. Um gegenüber Rad-Schiene Anwendungen zeitliche Vorteile zu erarbeiten scheint es daher vordringlich geboten, die trassierungstechnischen Höchstgeschwindigkeiten möglichst gut auszunutzen, zumindest solange keine „Spitzfahrten“ (Fahrten ohne oder nur mit kurzer Beharrung bei Höchstgeschwindigkeit) auftreten. Demnach ergibt sich folgende Prioritätenliste:

1. Höchstgeschwindigkeit
2. Schubkraft
3. Kosten
4. Energiebedarf

Obwohl der Energiebedarf in der Öffentlichkeit immer wieder Gegenstand von Diskussionen ist, muß man realistischer Weise dem Umstand Rechnung tragen, daß für eine Magnetbahnstrecke – ähnlich wie für anderen Verkehrsprojekte – erhebliche Investitionen zu tätigen sind und das Scheitern oder Gelingen eines Projektes wesentlich von den Kosten und nur sekundär vom Energiebedarf geprägt wird. Auf eine Wichtung der Parameter, um z.B. feststellen zu können, mit welchem Mehraufwand an Kosten man welche Energieersparnisse erreicht, wird aus diesem Grunde hier verzichtet. Weiterhin ist zu beachten, dass der Energiebedarf einer Magnetbahnstrecke weitgehend durch die Streckencharakteristik bestimmt wird:

- Liegt das Geschwindigkeitsniveau niedrig, so müssen prinzipbedingte energetische Nachteile der Magnetbahn in Kauf genommen werden, die sich durch den Energiebedarf zum Schweben ergeben.
- Bei kurzen Haltestellenabständen entsteht ein hoher Energiebedarf zum Beschleunigen der Fahrzeuge. Da hierzu hohe Ströme über große Strecken zu übertragen sind, ist mit entsprechend hohen ohmschen Verlusten zu rechnen.
- Im Gegensatz dazu fällt die Energiebilanz bei hohen Geschwindigkeiten aufgrund der fehlenden Reibkräfte und der wegen der guten Aerodynamik vergleichsweise kleinen Statorströme im Vergleich zu Rad-Schiene-Systemen gut aus.

Fazit: Der Energiebedarf von Magnetschnellbahnen lässt sich sehr effektiv durch Wahl einer günstigen Trassierung verringern, die Fahrten auf relativ hohem, gleich bleibendem Geschwindigkeitsniveau mit wenigen Beschleunigungsvorgängen ermöglichen. In dieser Arbeit wird die Trassierung jedoch als gegeben angesetzt. Nur so können die Optimierungen der Langstatorauslegung bzgl. des Energiebedarfs effektiv erfasst werden. Sie würden sonst gegenüber den Auswirkungen alternativer Trassierungen in den Hintergrund treten.

## 4.2 Vorgehen

Nachdem die Ziele bzw. Prioritäten einer Optimierung klar sind ist zu definieren, wie man zu einer optimierten Auslegung gelangt. Hierzu wird eine sequentielle Optimierung der Parameter vorgeschlagen, welche den verschiedenen Randbedingungen der Einflußparameter und deren Kostenanteilen Rechnung trägt:

1. Auswahl Antriebskonzept: Das Grobkonzept des Antriebes, also welches Speiseverfahren und welches Statorabschnittswchselfverfahren soll eingesetzt werden, beeinflusst in starkem Maße sämtliche Leistungsparameter und ist deshalb an erster Stelle zu klären. Hier spielen auch die geforderte Verfügbarkeit (Redundanz der Anlage) sowie der gewünschte Fahrkomfort eine Rolle.
2. Stationierung der Unterwerke: Als größter einzelner Kostenfaktor im Antrieb ist es von übergeordneter Bedeutung, die Unterwerke hinsichtlich ihrer Anzahl und Standorte zu optimieren. Da man über andere Faktoren wie Kabel und Statorabschnitte das Leistungsverhalten des Langstators stark beeinflussen kann, sollten die Unterwerke in ihrer Anzahl minimiert werden. Hierzu dient i.d.R. die geforderte Zugfolge als Maß.
3. Streckenkabel: Im Gegensatz zu den Statorabschnitten werden die Streckenkabel i.allg. durch thermische Gegebenheiten bestimmt: Da sie – je nach Fahrplan – die meiste Zeit bestromt sind erfolgt eine Erwärmung im Laufe des Tages. Da abhängig vom Kabeltyp bestimmte Temperaturen nicht überschritten werden dürfen sind entsprechend viele Kabel parallel zu verlegen, um die Last zu verteilen und die Verluste zu minimieren. Da andererseits die Impedanz der Kabel gegenüber den Statorabschnitten „kleine“ Werte aufweist, und sich somit die Statorabschnitte besser zur Beeinflussung der Leistungsparameter eignen, erfolgt die Kabelauslegung primär unter dem Aspekt Kostenminimierung, d.h. es werden lediglich so viele Kabel angeordnet wie thermisch erforderlich.

4. Umrichter: Bislang ist nur ein Standard-Umrichtertyp für den Transrapid beschrieben. Dieser kann jedoch mittels der Übersetzung des Ausgangsrafs an die jeweils erforderlichen Szenarien angepaßt werden. Da über den Ausgangsrafo der Rahmen für Höchstgeschwindigkeit (Spannung) und Schubvermögen (Strom) gesteckt wird, muß diese Optimierung vor der Statorabschnittsauslegung erfolgen.
5. Statorabschnitte: Nachdem alle übrigen Parameter fest liegen, kann über die Statorabschnittslänge die endgültige Leistungsfähigkeit des Systems festgelegt werden.

Aufgrund des gegenseitigen Einflusses der diversen Parameter ist nicht auszuschließen, daß am Ende der Optimierung z.B. die Annahmen, die zur Auswahl von Unterwerksstandorten geführt haben, nicht mehr exakt zutreffen – etwa weil die angenommenen Fahrzeiten nicht erreicht wurden. Aus diesem Grunde kann eine Nachoptimierung erforderlich sein, in der noch einmal alle Optimierungsschritte durchlaufen werden.

Das oben genannte Verfahren wird später in diesem Werk (Kapitel 10 ff) für jeden Schritt ausführlicher beschrieben und angewendet. Daneben werden alternative Antriebskonzepte erarbeitet und ebenfalls im gleichen Verfahren optimiert. Die Optimierungen betreffen auch Teile der Energieversorgung und der Betriebsleittechnik, da diese unmittelbar mit dem Antrieb verknüpft sind. Die Betriebsleittechnik und Energieversorgung selbst, oberhalb der Mittelspannungseinspeisung in die Unterwerke, sind jedoch nicht Gegenstand der vorliegenden Betrachtungen.

Nachfolgend werden zunächst noch Randbedingungen festgelegt, unter denen das System betrieben werden soll.

## 5 Anforderungsprofil

Grundlage für eine Optimierung des Antriebes bildet das betrieblich/technische Anforderungsprofil schneller Regionalstrecken. Dieses kennzeichnet sich durch folgende Eingangsparameter, die aus Erfahrungen mit ersten Vorstudien abgeleitet wurden:

- **Dichte Zugfolge:** Typischerweise wird für die Spitzenstunde ein Takt zwischen 5 min und 10 min gefordert.
- **Kurze Streckenlänge:** Sinnvollerweise kommen Streckenlängen zwischen 30 km und 100 km für den schnellen Regionalverkehr in Frage.
- **Kurze Haltestellenabstände:** Die Abstände zwischen den Stationen sind deutlich geringer als im Fernverkehr; allerdings dürfen diese bei einem Hochgeschwindigkeits-Verkehrssystem auch nicht zu dicht liegen. Für die MSB sollte deshalb ein typischer Haltestellenabstand von ca. 5-10 km nicht unterschritten werden.
- **Höchstgeschwindigkeit:** Die dicht liegenden Haltestellen verhindern das Erreichen hoher Geschwindigkeiten, wie sie aus MSB-Fernverkehrsanwendungen bekannt sind. Zur Abgrenzung von Rad-Schiene Anwendungen ist jedoch ein nach wie vor hohes Geschwindigkeitsniveau anzusetzen. Die Spitzenwerte sollten daher im Bereich von nicht unter 200 km/h liegen.
- **Große Beschleunigungsanteile:** Die Beschleunigungs- bzw. Verzögerungsbereiche überwiegen deutlich gegenüber den Beharrungsbereichen.
- **Streckenführung:** größtenteils durch dicht besiedelte Gebiete, Stadtrandgebiete und Innenstadtbereiche.
- **Hohe Verfügbarkeit:** Die relativ hohen Kosten der MSB lassen sich nur durch ein hohes Verkehrsaufkommen kompensieren. Dies bedeutet wiederum, daß die MSB auf Strecken mit großer Wichtigkeit zum Einsatz kommt, die entsprechend verfügbar sein müssen.

Dieses Profil soll weiterhin auch Anwendungen abdecken, welche schnelle Nonstop Verbindungen zweier Zielstationen darstellen, etwa in Form von Flughafenanbindern. Hier besteht bereits eine Anwendung in Shanghai, mit einer Spitzengeschwindigkeit von 430 km/h auf einer Punkt-zu-Punkt-Verbindung von etwa 30 im Länge zwischen dem Pudong International Airport und der Long Yang Station im Handelszentrum von Shanghai. Eine weitere Strecke diesen Typs befindet sich in Planung zwischen dem Flughafen München und dem Münchner Hauptbahnhof.

Anhand dieses Anforderungsprofils läßt sich ablesen, in welche Richtung eine Gesamtkonfiguration des Antriebes erfolgen könnte, nämlich

- **Unterwerkstypen:** Zumindest bei einem 5-min-Takt scheint der Typ 2 zwingend erforderlich, um die Anzahl der Unterwerke nicht zu groß werden zu lassen. Andererseits benötigt dieser Typ große Flächen. Dieser Punkt gewinnt an Bedeutung, wenn man sich vor Augen hält, der in Stadtbereichen nur schwer große Flächen erworben werden können.
- **Speiseverfahren:** Die gleichen Gründe sprechen auch für die Einfachspeisung, wenngleich diese Nachteile hinsichtlich Verfügbarkeit und Belastung der Streckenkabel mit sich bringt.
- **Abschnittswchselverfahren:** Hier ergibt sich ein Zielkonflikt, nämlich daß einerseits möglichst kompakte Unterwerke mit wenig Umrichtern vorzusehen sind, die wenig Fläche

benötigen und wenig Kosten verursachen, und andererseits einen ausreichenden Fahrkomfort bieten, da die größten Streckenabschnitte in Beschleunigungsbereichen mit hohem Schubbedarf liegen.

Als allgemeine Tendenz deutet sich an, daß aufgrund der kurzen Streckenlängen und kleinen Zugfolgezeiten Einsparungen im Bereich Antriebsblock/Unterwerk höher zu bewerten sind als streckenseitige Einsparungen.

Eine bloße Auswahl von Bausteinen der vorhandenen Antriebskonzepte führt nach erster Einschätzung stets zu Einschränkungen an der einen oder anderen Stelle, so daß evtl. neue, auf den Einsatzfall hin optimierte Konzepte benötigt werden. Deshalb wird folgendermaßen vorgegangen:

- 1. Definition einer Musterstrecke** zur Eingrenzung der benötigten Leistungsparameter des Antriebes, anhand der später die Wirkung verschiedener Antriebskonzepte nachvollzogen werden kann.
- 2. Definition der Eingangsparameter**, die der Antrieb erfüllen muß.
- 3. Untersuchung alternativer Statorabschnittsverfahren (SAWV) und anderer Maßnahmen**, die sich möglicherweise besser für den vorliegenden Einsatzfall eignen.
- 4. Konfiguration** verschiedener zu vergleichender Antriebsvarianten.
- 5. Auslegung** jeder Antriebsvariante, d.h. Bestimmung der Unterwerks-Standorte, der Statorabschnittslängen, und der Statorschaltungen sowie Dimensionierung der Streckenkabel.
- 6. Bewertung** der Antriebe hinsichtlich des erreichten Leistungsvermögens und der Investitions- und Betriebskosten.

## 6 Musterstrecke

Der Antrieb soll für folgende Musterstrecke bemessen werden:

- Streckenlänge: 38 km, zweispurig.
- Haltestellen:
 

Sydney Central	km 0.1
Town Hall	km 1.7
Homebush Bay	km 16.5
Parramatta	km 25.2
Seven Hills	km 34.0
Prospect	km 37.9

Die Haltezeit der Durchgangsstationen betrage jeweils 1 min. In den Endstationen warten die Fahrzeuge aus- und einsteigsbereit auf ihren fahrplanmäßigen Einsatz. Dort erfolgt ggf. auch die Fahrzeuginnenreinigung o.ä.

- Von der Trassierung her zulässiges Geschwindigkeitsprofil der Strecke:

von km 0.0	bis km 8.0	v = 170 km/h
von km 8.0	bis km 8.5	v = 200 km/h
von km 8.5	bis km 11.5	v = 220 km/h
von km 11.5	bis km 25.2	v = 170 km/h
von km 25.2	bis km 34.0	v = 200 km/h
von km 34.0	bis km 38.0	v = 170 km/h

- Steigungsprofil:

von km 0	bis km 38	stg = 0 %
----------	-----------	-----------

- Verkehrsaufkommen zur Bemessung: 3500 Passagiere pro Stunde und Richtung.

Diese Musterstrecke liegt vom Charakter her am „unteren“ Spektrum der anvisierten Magnetschnellbahnstrecken, d.h. ist vergleichsweise langsam und hat viele Haltestellen. Am anderen Ende des Anwendungsspektrums würde z.B. ein schneller Flughafenzubringer liegen.

Aus diesem Grunde ist es nicht trivial, für diese Strecke eine günstige Auslegung in Magnetschwebetechnik als Alternative zu Rad-Schiene-Systemen zu finden, insbes. nicht mit den vorliegenden Antriebskonzepten, etwa dem Antrieb der Strecke Shanghai. Konventionelle Rad-Schiene-Systeme können hier vom geforderten Geschwindigkeitsniveau her noch gut mithalten. Auch befindet sich die konventionelle Bahn hier energietechnisch im Vorteil, weil bei kleinen Geschwindigkeiten die Reibungsverluste von Rad-Schiene und Stromabnehmern kaum ins Gewicht fallen, während der Energiebedarf, um Magnetfahrzeuge aktiv anzuheben und schweben zu lassen, unabhängig von der Geschwindigkeit ist. Er kann also erst bei höheren

Geschwindigkeiten durch die fehlenden Reibungsverluste und die aerodynamisch günstige Ausgestaltung der Magnetfahrzeuge wettgemacht werden.

Dennoch wurde diese Musterstrecke gewählt, aus folgendem Grund: Da sie weit von Fernverkehrsanwendungen entfernt einzuordnen ist, eignet sie sich sehr gut zum Aufzeigen der Unterschiede und zur Optimierung des Langstatorantriebes für dieses Einsatzspektrum.

## 7 Eingangssparameter

Der Antrieb soll mindestens die im Folgenden aufgeführten Anforderungen erfüllen, wobei die Vorgaben anhand von Abschätzungen betrieblicher Erfordernisse sowie erreichbarer Antriebseigenschaften erfolgen, wie sie z.B. auf der Transrapid Versuchsanlage Emsland (TVE) erprobt werden, vgl. hierzu auch [5]:

- **Takt/Fahrplan:** Betriebliche Zugfolge 7,5 min, Reserve 1 min. Die technische Zugfolge für die Auslegung muß also  $\leq 6,5$  min betragen. Die Fahrten sollen jeweils zur vollen Stunde in den Endstationen beginnen.
- **Fahrzeit:**  $\leq 25$  min (betrieblich) bei jeweils 1 min Haltezeit in den Durchgangsstationen. Daraus resultieren 5 min Aufenthaltszeit an den Endstationen bei Einsatz von 4 Zügen pro Stunde und Richtung. Die Auslegung soll möglichst 1 min Reserve beinhalten, um Verspätungen auszugleichen.
- **Zugwende:** 300 m vor Einfahrt in die Endstationen bzw. nach Ausfahrt aus den Endstationen erfolgt ein Wechsel auf das jeweils zu befahrende Gleis ohne zusätzlichen Zeitbedarf (Kurzkehre). Die fahrplanmäßige Standzeit von 5 min in den Endstationen soll neben Ein-/Aussteigevorgängen und ggf. Reinigung als betriebliche Pufferzeit zum Ausgleich von betriebsbedingten Verspätungen dienen.
- **Verfügbarkeit:** Alle Komponenten müssen teilredundant ausgeführt sein, so daß Einzelausfälle beliebiger Bauteile nicht zu erheblichen Verspätungen führen.
- **Gegenwind:** 15 km/h auf der gesamten Strecke.
- **Fahrzeuge:** Nach [12] beträgt die maximale Sitzplatzzahl 90 pro Bugsektion und 100 pro Mittelsektion. An dieser Stelle wird eine mittlere Passagierkapazität  $PK = 90$  pro Sektion angesetzt. Bei der betrieblichen Zugfolge  $ZF = 7,5$  min und dem Verkehrsaufkommen  $VA = 3500$  P/h errechnet sich dann die benötigte Anzahl der Sektionen  $n_s$  (auf eine ganze Zahl aufgerundet) zu

$$n_s = \frac{VA \cdot ZF}{PK} = \frac{3500 \text{ P/h} \cdot 7,5 \text{ min}}{90 \text{ P}} = 5$$

- **Massen:** Die mittlere Fahrzeugmasse  $m_{Fzg}$  betrage voll beladen 63,5 t/Sektion (vgl. [12]).
- **Motorkonstante:**  $c_M = 42,3$  N/A pro Sektion beidseitig.
- **Statorwicklung:** 300 mm<sup>2</sup> Alu.
- **Fahrkomfort:** Die maximale Beschleunigung  $a_{\text{enn}}$  betrage 0,8 m/s<sup>2</sup>. Beschleunigungsänderungen, insbesondere periodisch bei SAW, mindern den Fahrkomfort. Als tolerabel für den ungestörten Regelbetrieb wurden durch Testfahrten auf der Versuchsanlage Emsland (TVE) periodische Beschleunigungseinbrüche von bis zu 0,2 m/s<sup>2</sup> bei Änderungsgeschwindigkeiten von 0,2 m/s<sup>3</sup> ermittelt. Singuläre Beschleunigungsänderungen dürfen 0,5 m/s<sup>2</sup> betragen. Auch im Störbetrieb soll das Komfortkriterium verletzt werden.
- **Umrichterdaten:** Nennwert Zwischenkreisspannung:  $u_{ZK} = 2 \cdot 2,5 \text{ kV}$   
Nennspannung Trafobetrieb:  $u_{URTB} = 2 \cdot 2,15 \text{ kV} \cdot \ddot{u}$  (Strang)  
Nennspannung Direktbetrieb:  $u_{URDT} = 2,15 \text{ kV}$  (Strang)

Nennstrom Trafobetrieb:	$i_{URTB} = 1,2 \text{ kA} / \ddot{u}$ (Strang)
Nennstrom Direktbetrieb:	$i_{URDT} = 2 \cdot 1,0 \text{ kA}$ (Strang)
Maximale Frequenz:	$f_{\max} = 300 \text{ Hz}$

## 8 Maßnahmen zur Antriebsoptimierung

Dieses Kapitel untersucht verschiedene, alternative Ausführungen von Antriebskomponenten und gibt Einschätzungen, in wie weit einzelne Maßnahmen Optimierungspotential für das Gesamtsystem bieten. Ein Grundsatz hierbei lautet, daß die Systemkompatibilität erhalten bleiben muß und aufwendige Hardware-Neuentwicklungen möglichst vermieden werden sollen, damit eine kurz- oder mittelfristige Anwendbarkeit gegeben ist.

### 8.1 Ausgangstrafo

Die in den Antriebsblöcken enthaltenen Umrichter (UR) beinhalten z.B. nach [10] u.a. einen Ausgangstransformator (AT), siehe Anlage 8.1-1. Dieser gewährleistet eine optimale Anpassung der streckenseitigen Spannungsebene an die zu transportierende Leistung. Die Übersetzung  $\ddot{u}$  stellt normalerweise eine Konstante dar. Im folgenden wird die Bemessung der Übersetzung sowie das Frequenzverhalten untersucht.

#### 8.1.1 Maximale Übersetzung

Die verkettete Nennspannung der Statorwicklung beträgt nach [1]  $u_{NS} = 15 \text{ kV}$ . Will man diese voll ausnutzen, so berechnet sich die benötigte Übersetzung  $\ddot{u}$  ausgehend von  $u_{NS}$  wie folgt:

- Abzug der möglichen Spannungs-Überhöhung  $u_{\ddot{u}}$ , die aufgrund der wellenförmigen Ausbreitung der Spannung auf langen Streckenkabeln auftritt. Bei den zu erwartenden kurzen Kabellängen im Regionalverkehr wird dieser Effekt an dieser Stelle zunächst vernachlässigt.
- Berücksichtigung der UR-Gesamteffektivspannung  $u_{\text{eff}\Sigma}$ , nicht nur der Grundwellenspannung  $u_{\text{eff}1}$ . Beide Werte hängen von den verwendeten Steuerwinkeln der durch 3-Punkt-Wechselrichter erzeugten Phasenspannung ab (Anlage 8.1-2). Bei gegebenen Steuerwinkeln  $\alpha$  und Schwenkwinkeln  $\beta$  gilt nach [2]

$$\frac{u_{\text{eff}1}}{u_{\text{eff}\Sigma}} = \frac{\cos(\alpha) \cdot \cos(\beta)}{\sqrt{\sum_{n=1,5,7,11,\dots,\infty} (1/n \cdot \cos(n \cdot \alpha) \cdot \cos(n \cdot \beta))^2}}$$

wobei  $n$  alle positiven ganzen Zahlen umfaßt, die weder durch 2 (Symmetrie des Spannungsverlaufes) noch durch 3 (gegenseitige Aufhebung in dreiphasigen Drehstromsystemen) teilbar sind. Die Anlage 8.1-3 zeigt den Grundwelleneffektivwert und den Gesamteffektivwert der Oberwellen (bis zur 29. Harmonischen) der „Treppenkurve“ (=Zwischenkreisspannung  $u_{ZK}$ ) bei Variation der Steuer- und Schwenkwinkel.

Insgesamt berechnet sich die maximal zulässige Trafoübersetzung  $\ddot{u}_{\text{max}}$  unter Berücksichtigung der minimalen Winkel  $\alpha=0$  und  $\beta=0$  zu

$$\ddot{u}_{\text{max}} = \frac{u_{NS}}{u_{ZK} \cdot u_{\text{eff}\alpha\beta}} = \frac{15\text{kV}}{5\text{kV} \cdot \sqrt{3} \cdot 100\%} = 1,73$$

Betrieblich werden stets größere Werte für  $\alpha$  und  $\beta$  eingestellt, nicht zuletzt um die Form der Spannungsstufen so einstellen zu können, dass Resonanzanregungen der Strecke vermieden werden. Im Folgenden wird deshalb  $u_{\text{eff}\alpha\beta} = 86\%$  als betrieblich nutzbar angesetzt. Die Ausgangswerte des Standard-Umrichters im Nennpunkt betragen dann

$$u_{UR} = 5 \text{ kV} \cdot 86\% \cdot \sqrt{3} \cdot 1,73 = 12,9 \text{ kV (verkettet)}$$

$$i_{UR} = 1,2 \text{ kA} / 1,73 = 0,69 \text{ kA}$$

Bei Doppelspeisung stehen somit bis zu  $2 \cdot 0,69 \text{ kA} = 1,38 \text{ kA}$  im Stator zur Verfügung. Damit kann maximal (d.h. beim Anfahren, wenn die Fahrwiderstände 0 sind) folgende Beschleunigung  $a$  erzielt werden:

$$a = \frac{F_x}{m} = \frac{c_M \cdot i_s}{m} = \frac{42,3 \text{ N/A} \cdot 1,38 \text{ kA}}{63,5 \text{ t}} = 0,92 \text{ m/s}^2.$$

Dieser Wert liegt bereits über dem festgelegten Komfortgrenzwert, so daß eine niedrigere Übersetzung bei Doppelspeisung normalerweise keine Leistungsvorteile bringt.

### 8.1.2 Variable Übersetzung

Aus Leistungs- und Fahrtaktgründen bietet sich im Regionalverkehr Einfachspeisung an. Berechnungsbeispiel bei einer Trafoübersetzung von 1,15:

$$u_{UR} = 4,3 \text{ kV} \cdot \sqrt{3} \cdot 1,15 = 8,6 \text{ kV (verkettet)}$$

$$a = \frac{F_x}{m} = \frac{c_M \cdot i_s}{m} = \frac{42,3 \text{ N/A} \cdot 1,2 \text{ kA} / 1,15}{63,5 \text{ t}} = 0,70 \text{ m/s}^2$$

Man sieht, daß obwohl die Spannung deutlich unter dem zulässigen Grenzwert liegt und der Strom nicht ausreicht, um die Nennbeschleunigung zu erreichen, d.h. bei Einfachspeisung ergibt sich folgender Zielkonflikt: Einerseits soll die Spannung möglichst groß gewählt werden, um insbesondere bei hohen Geschwindigkeiten die induzierte Polradspannung und die Spannungsabfälle an den Streckenimpedanzen überwinden zu können. Andererseits soll insbesondere bei kleinen Geschwindigkeiten der verfügbare Strom so groß sein, daß die Beschleunigung wenigstens annähernd an die Komfortgrenzwerte heranreicht.

Eine Lösung können Ausgangstransformatoren mit mehreren, schaltbaren Sekundäranszapfungen — d.h. Übersetzungen — darstellen. Je nach Anforderung kann so während des Fahrbetriebes eine aus  $n$  verschiedenen Übersetzungen ausgewählt werden. Die Umschaltung sollte aus Komfortgründen mit dem Statorabschnittwechsel kombiniert werden.

Für Antriebskonzepte mit Einfachspeisung wird diese Möglichkeit in späteren Kapiteln näher untersucht.

### 8.1.3 Nennfrequenz

Die Ausgangstransformatoren des Transrapid stellen hinsichtlich ihrer Bemessung eine Sonderentwicklung dar, die aufgrund einer besonders „weichen“ Magnetisierungskennlinie Unsymmetrien der beiden angeschlossenen Wechselrichter tolerieren und die aufgrund der hohen Betriebsfrequenzen des Transrapid eine Nennfrequenz von 100 Hz aufweisen, d.h. erst ab einer Speisefrequenz von 100 Hz tritt bei Nennspannung keine Eisensättigung mehr auf, so daß die volle Nennspannung übertragen werden kann. Dies liegt daran, daß bei Hochgeschwindigkeitsanwendungen durch die geschwindigkeitsproportionale induzierte Polradspannung bei „kleinen“ Geschwindigkeiten der Spannungsbedarf geringe Werte aufweist, d.h. man kann es sich in diesem Bereich erlauben, die übertragbare Spannung proportional zu

abnehmenden Frequenzen zurückzunehmen, ohne daß dies zu nennenswerten Leistungsbeschränkungen im System führt.

Im Regionalverkehr liegt das Geschwindigkeitsniveau ca. um den Faktor zwei niedriger als bei Hochgeschwindigkeitsanwendungen. Dies bedeutet, daß die Nennspannung der Umrichter aufgrund der frequenzmäßigen Trafoauslegung evtl. nie ganz genutzt werden kann. Aus diesem Grunde bietet es sich an, die Trafoauslegung diesbezüglich anzupassen, z.B. durch Verlagerung des Nennpunktes auf 50 Hz. Dies erfordert eine Neubemessung dieser Transformatoren, insbesondere eine Verdoppelung des Eisenquerschnittes. Die Umschaltungen zwischen Trafobetrieb und Direkttaktbetrieb können dann bei entsprechend kleineren Frequenzen erfolgen.

#### 8.1.4 Entfall

Die oben genannten Nachteile der Leistungsübertragung einerseits und die aufgrund der kleinen Geschwindigkeiten im Regionalverkehr niedrigen Gegenspannung, d.h. kleinen erforderlichen Trafoübersetzung, legen es nahe, auf Ausgangstrafos ganz zu verzichten. Um die Spannung der zwei Wechselrichter in Reihe aber nutzen zu können, müßte dann eine direkte Reihenschaltung der GTO („gate turn-off“) -Wechselrichter erfolgen. Es ist jedoch bekannt daß es sich bei GTOs um empfindliche Bauteile handelt; technologisch sind somit bei Reihenschaltungen von GTOs Schwierigkeiten zu erwarten, da evtl. bei geringfügig abweichenden Ausschaltzeitpunkten kurzzeitig eine Spannungsüberlastung an einem GTO auftritt, die zur Zerstörung des Elementes führen kann. Eine Anordnung ohne Ausgangstrafo erfordert somit eine Nachentwicklung oder den Einsatz anderer Umrichtertechnologien wie z.B. konventionelle Thyristoren oder Integrated Gate Bipolar Transistors (IGBTs), die diesbezüglich weniger empfindlich sind.

## 8.2 **Umrichterkonzept**

### 8.2.1 Dezentraler Aufbau

Wenn Antriebsbereiche nur einen geringen Leistungsbedarf aufweisen, besteht neben der Möglichkeit, die Antriebsblöcke mit weniger Umrichtern zu bestücken, als eine Alternative der Hardwareeinsparung, die Umrichter (UR) selbst einfacher aufzubauen. Der konventionelle MSB-Umrichter besteht aus folgenden Leistungsbauteilen (siehe auch Anlage 8.1-1):

- Eingangstransformator zur Spannungsanpassung zwischen Versorgungsnetz und Netzstromrichter-Elektronik.
- Netzstromrichter zum Erzeugen der Zwischenkreis-Gleichspannung, zur Energierückspeisung ins Netz und zur Einstellung eines Leistungsfaktors nahe 1.
- Gleichspannungszwischenkreis für Wechselrichter.
- Wechselrichter zum Erzeugen der nach Phase, Frequenz und Amplitude benötigten Umrichter-Ausgangsspannung.
- Ausgangstransformator zur Spannungsanpassung zwischen Umrichter und Strecke.
- Kühlanlage zur Kühlung der Leistungshalbleiter.

Würde man die netzseitigen Komponenten nur einmal zentral aufbauen und anstatt der Drehstromeinspeisung die Gleichspannung an die einzelnen Umrichter heranzuführen, so ergäben sich folgende Einsparungen bei den Umrichtern:

- Eingangstrafo komplett.
- Netzstromrichter komplett.
- Gleichspannungszwischenkreis komplett.
- Kühlanlage ca. zur Hälfte.

Demgegenüber muß ein Kabel oder eine Stromschiene zur Verteilung der Gleichspannung auf die verschiedenen angeschlossenen Umrichter bzw. Unterwerke vorgesehen werden und natürlich muß mindestens jeweils eine der eingesparten Komponenten an der zentralen Stelle aufgebaut werden.

Bei sehr dichten Zugfolgen kann dies bedeuten, daß jeder Statorabschnitt seinen eigenen Wechselrichter erhält und somit auf eine Kabeltrasse ganz verzichtet werden kann.

Dieses Konzept brächte zudem den Vorteil, daß die rückgespeiste Energie eines Umrichters (Fahrzeuges) innerhalb des Antriebssystems von anderen Umrichtern (Fahrzeugen) ähnlich wie im DB-Netz wieder aufgenommen werden könnte, und daß dies an der Schnittstelle zum öffentlichen Netz als ein verminderter Energiebezug in Erscheinung tritt (der Energie-Bezugspreis ist i.allg. deutlich höher als die Vergütung rückgespeister Energie; zudem lassen einige Energieversorgungsunternehmen keine Rückspeisung zu).

Aufgrund des relativ geringen Spannungsniveaus des bislang verwendeten Zwischenkreises (2,2,5 kV) können hohe Leistungen nicht über große Entfernungen transportiert werden. Diese Maßnahme eignet sich daher

- entweder für Umrichter innerhalb eines Unterwerkes
- oder für Bereiche, in denen die Unterwerke aufgrund geringer Geschwindigkeiten bzw. kleiner Zugfolge sehr dicht nebeneinander stehen. Dies hätte u.U. zudem den Vorteil, daß bei entsprechend dichtem Takt so viele Wechselrichter vorhanden wären, daß alle Statorabschnitte direkt ohne Verwendung von Streckenkabeln gespeist werden könnten,
- oder bei Verwendung anderer Umrichtertypen mit höheren Zwischenkreisspannungen.

Ein Nachteil dieses Konzeptes besteht darin, daß zwischen den einzelnen Leistungsteilen (Netzstromrichter, Zwischenkreis und Wechselrichter) galvanische Verbindungen herzustellen sind, welche stets induktive Impedanzanteile aufweisen. Da jedoch die vorhandenen Standard GTO-Umrichter erfahrungsgemäß sehr empfindlich auf induktive Verkopplungen reagieren – z.B. wird eine spezielle niederinduktive Verschienung zwischen Zwischenkreiskondensatoren und Wechselrichtern benötigt – , kann eine technische Umsetzung dieses Konzeptes nicht ohne robustere, alternative Umrichter – etwa auf IGBT-Basis – sichergestellt werden, sondern stellt ein längerfristiges Optimierungspotential dar.

### 8.2.2 Leistungsreduktion

Der vorhandene GTO-Umrichter kann durch folgende Maßnahmen vereinfacht werden:

- Einsatz von nur einem statt zwei Netzstromrichtern: Da statorseitig hohe Blindleistungen benötigt werden, netzseitig jedoch beliebige Leistungsfaktoren eingestellt werden, insbesondere auch  $\cos\varphi=1$ , kommt man dort evtl. auch mit der halben installierten Leistung

zurecht. Die niederinduktive Verschienenung des Standardaufbaus braucht nicht verändert zu werden.

- Einsatz von nur einem Netzstromrichter und nur einem Wechselrichter pro Umrichter: Bei geringem Leistungsbedarf genügt evtl. auch eine 50%ige Wechselrichterleistung.

Siehe hierzu Anlage 8.2-1. Da im Direkttaktbetrieb keine Parallelschaltung der zwei Wechselrichter erfolgt, kann theoretisch der volle Nennstrom des Wechselrichters von 1,2 kA genutzt werden. Allerdings bedeutet der Verzicht auf den zweiten Wechselrichter, daß die Spannungsform nicht mehr fünfstufig (Strang) sondern nur noch dreistufig ist. Das Taktverfahren der Umrichter sollte deshalb geändert werden, da das Fehlen des 2. Wechselrichters keinen Schwenkwinkel mehr ermöglicht und somit die Kontrolle über das Oberschwingungsspektrum verloren gehen würde. Statt dessen bietet es sich z.B. an, anstelle der Vollblocktaktung eine Dreifachtaktung vorzusehen, da die Betriebsfrequenzen ohnehin in erster Näherung um bis zum Faktor 3 niedriger liegen als im Fernverkehr (ca. 100 Hz statt maximal 300 Hz). Bei Übergang auf alternative Umrichtertechnologien wie IGBTs stellt eine Erhöhung der Taktfrequenz auch auf noch größere Werte kein Problem dar, so daß die Anregung von Oberschwingungen immer weiter zurück geht.

Generell wäre ein Einsatz anderer Umrichter mit kleinerer Nennleistung denkbar, z.B. aus dem Bahnbereich. Dies erfordert jedoch Anpaßentwicklungen, insbesondere auch im Hinblick auf die Schnittstellen zur Regelung/Steuerung des Transrapid. Grundsätzlich ergeben sich so beliebig viele Nennparameter für Strom und Leistung. Im Einzelfall kann eine entsprechende Marktstudie zur Auswahl geeigneter Umrichter betrieben werden. Da mit dem „halben“ Standard-Umrichter der Einfluß der Umrichterleistung untersucht werden kann, werden andere Umrichtertypen hier aber nicht weiter betrachtet.

### **8.3 Betriebsleittechnik**

Obwohl die Betriebsleittechnik nicht dem Antrieb angehört, nimmt sie doch an bestimmten Stellen unmittelbar Einfluß auf die Antriebsauslegung. Aus diesem Grunde sind an dieser Stelle Modifikationen der Betriebsleittechnik-Dezentralen (BLD) vorgeschlagen, die sich günstig auf die Gesamtkosten des Antriebes auswirken können.

#### **8.3.1 Bildezeiten**

Aus sicherheitstechnischen Gründen erstreckt sich die Belegung der Antriebsbereiche (ABE) nicht nur auf die Zeit, in der sich das Fahrzeug tatsächlich im ABE aufhält, sondern zusätzlich auf eine steuerungstechnisch bedingte Räumzeit  $t_R$ , eine Bildezeit  $t_B$  sowie Überlappungszeiten durch die Längenausdehnung der Fahrzeuge, die im Folgenden in den Bilde- und Räumzeiten enthalten sind. Die Bildezeit stellt sicher, daß wenn z.B. aufgrund von Störungen im Betriebsablauf das Fahrzeug den ABE  $n$  nicht zur vorgesehenen Zeit verläßt, das nachfolgende Fahrzeug noch genügend Weg in seinem ABE  $n-1$  vorfindet, um mit Hilfe des sicheren Bremssystems noch rechtzeitig vor Erreichen des ABE  $n$  zum Stehen zu kommen (Anlage 8.3-1).

Als Haltepunkt vor der Antriebsbereichsgrenze (ABG) kommen nur Streckenabschnitte in Frage, die weder eine große Querneigung noch Längsneigung aufweisen. Geeignete Streckenbereiche müssen anhand der Trassierung definiert werden. Für erste Abschätzungen geht man davon aus, daß sich Haltepunkte innerhalb von  $\frac{1}{2}$  km vor den ABG befinden.

Bei Fahrzeiten zwischen Bremsensatzpunkt und ABG im Bereich von 1 min — je nach Anfangsgeschwindigkeit — stellt dieser Anteil somit zweistellige Prozentbeträge der im Regionalverkehr geforderten technischen Zugfolgezeiten von 4 bis 9 min dar, d.h. die Antriebsbereiche (ABE) müssen genau um diesen Zeitbetrag verkleinert werden, es müssen deshalb evtl. mehr Unterwerke als antriebstechnisch nötig gebaut werden.

Eine „Eliminierung“ dieser Bildezeiten läßt demzufolge u.U. Kosteneinsparungen durch Reduktion der Anzahl von Unterwerken erwarten, was zu folgendem Konzept führt (Anlage 8.3-2):

- Jeder ABE  $n$  erhält nicht nur eine Betriebsleittechnik Dezentrale (BLD)  $n$ , sondern zusätzlich eine zweite BLD  $m$ .
- Die zweite BLD  $m$  erstreckt sich mindestens über einen Streckenbereich im ABE  $n$ , der dem Bremsweg des nachfolgenden Fahrzeuges  $n-1$  entspricht.
- Das nachfolgende Fahrzeug  $n-1$  kann nun im Störfall in den Bereich dieser zweiten BLD  $m$  einfahren und mit Hilfe der sicheren Bremse zum Stehen kommen, ohne daß dies unmittelbar auf das Fahrzeug  $n$  zurückwirkt, denn die Statoren im BLD-Bereich  $m$  sind antriebsseitig abgeschaltet und die BLD  $m$  gewährleistet die vollständige Sicherung des Fahrzeuges  $n-1$ .
- Im störungsfreien Betrieb gelangt das Fahrzeug  $n-1$  nicht in den Bereich der BLD  $m$ , bevor nicht der ABE  $n$  frei geworden ist und dieser den Antrieb für das Fahrzeug  $n-1$  gewährleistet.
- Bei Überfahrt des Fahrzeuges vom Bereich der BLD  $m$  in den Bereich der BLD  $n$  findet wie bei Überfahrt von Antriebsbereichsgrenzen eine Übergabe der Sicherungsfunktionen statt. Der Antrieb hingegen braucht nicht weiterschaltet werden.

Bei kleinen Bildezeiten führt dies allerdings zu einer BLD-seitigen „Überdimensionierung“ von annähernd 100%. In diesen Fällen wäre es vorteilhafter, die BLD-Bereiche grundsätzlich von den Antriebsbereichen (ABE) zu trennen und den  $n$  ABE  $m$  BLD-Bereiche zu überlagern, mit  $m > n$  (Anlage 8.3-2): Die Belegungszeiten der  $m$  BLD-Bereiche sollen nun jeweils knapp unter der Fahrzeit pro ABE liegen, so daß der Takt ausschließlich durch die Fahrzeit bestimmt wird. ABE entfallen dann, wenn die Summe der eingesparten Bildezeiten ausreicht, um die Fahrzeit eines ABE auf die verbleibenden zu verteilen, ohne daß die Fahrzeiten größer als der Takt werden. Dieses Konzept bedingt folgende Änderungen:

- Die feste Zuordnung BLD-ABE entfällt.
- Die BLD muß in Abhängigkeit vom Ort erkennen können, welcher Antrieb mit den Steuerungsdaten zu versorgen und im Notfall sicher abzuschalten ist.
- Die Übergabe zwischen den BLD erfolgt wie bisher, jedoch i.allg. ohne Weiterschaltung des Antriebes.

Da die Bildezeiten im Fernverkehr aufgrund der langen Bremswege vergleichsweise große Beträge aufweisen, eignet sich dieses Konzept besonders dort, dennoch könnte das Konzept auch im Regionalverkehr Vorteile bringen.

Beide Alternativen erfordern Entwicklungsaufwand, insbesondere an den Schnittstellen Antrieb – Betriebsleittechnik und den Sicherungseinrichtungen (selektive Abschaltung des korrekten Antriebsbereiches im Fehlerfall).

### 8.3.2 Stationen

Die BLD stellt durch die direkte Zuordnung BLD-Bereich – Antriebsbereich (ABE) sicher, daß ein ABE stets nur einem Fahrzeug bereitgestellt wird. Während sich dieses Fahrzeug im ABE befindet, gilt dieser als belegt und kann für kein zweites Fahrzeug genutzt werden, selbst wenn das erste Fahrzeug an einer Station (Haltestelle) steht und den Antrieb eigentlich gar nicht in Anspruch nimmt.

Aus diesem Sachverhalt leitet sich folgende Optimierungsstrategie ab (vgl. Anlage 8.3-3):

- Die Antriebsbereichsgrenzen (ABG) sollten sich vorzugsweise in unmittelbarer Nähe von Stationen befinden. Dies läßt sich oftmals verwirklichen, da sich die Fahrzeuge in diesen Bereichen aufgrund der geringen Geschwindigkeiten besonders lange aufhalten, und so die Wahrscheinlichkeit groß ist, daß die zulässige Belegungszeit (gegeben durch den Takt) an diesen Stellen abläuft.
- Der Statorabschnitt, auf dem sich die Station befindet, sollte sowohl dem einen als auch dem anderen der beiden angrenzenden ABE  $n$  und  $n+1$  zuordenbar sein. Dies läßt sich durch entsprechende Schaltvorrichtungen in den Schaltstellen gewährleisten.
- Hält das einfahrende Fahrzeug  $n$  an, so kann es seinen Antrieb freigeben, da es ihn im Stillstand nicht mehr benötigt. Die BLD  $n$  sperrt zwar den betroffenen Streckenbereich, nicht jedoch den gesamten ABE, gegen weiteres Befahren, meldet das Fahrzeug als gesichert abgestellt ab und wird so ebenfalls frei für andere Aufgaben.
- Die somit frei gewordenen Komponenten BLD  $n$  und ABE  $n$  können unmittelbar zur Sicherung und zum Antrieb des nächsten Fahrzeuges verwendet werden. Gleichzeitig wird das vorausfahrende Fahrzeug  $n+1$  noch vom nächsten ABE  $n+1$  eingespeist und von der BLD  $n+1$  gesichert.
- Verläßt das vorausfahrende Fahrzeug  $n+1$  den ABE  $n+1$ , so kann dieser das noch haltende Fahrzeug  $n$  wieder anfahren.

Auf diese Weise reduziert sich die Belegungszeit um die Haltezeit, die ABE  $n$  bzw.  $n+1$  können räumlich weiter ausgedehnt werden, die Unterwerke müssen nicht so dicht stehen, evtl. lassen sich insgesamt Unterwerke einsparen. Außerdem entfällt die Bildezeit, da Haltepunkt und Station identisch sind und so der Bremsweg vollständig in der regulären Belegungszeit enthalten ist. Nachteil: Im Falle einer sicheren Antriebsabschaltung im Stationsbereich müssen beide angrenzenden ABE abgeschaltet werden, da diesen beide einspeisen können.

### 8.3.3 Moving Block

Aufgrund der Block-Charakteristik des stationären Langstatorantriebes bietet sich für das Leit- und Sicherungssystem ebenso ein „Fixed-Block“ System mit unmittelbarer Verknüpfung zum Antrieb an, wie es für Hochgeschwindigkeitsanwendungen ausgeführt ist. Andererseits entstehen gerade bei dichten Zugfolgen, wie sie im Regionalverkehr üblich sind, die oben beschriebenen Restriktionen durch einen Fixed Block, der zu einer hohen Zahl von BLD bzw. ABE führt. Würden hingegen „Moving Blocks“ eingesetzt, so könnte das Leit- und Sicherungssystem so vom Antrieb entkoppelt werden, daß lediglich die ABE selbst eine Begrenzung der Zugfolge festlegen, nicht jedoch die BLD. Da dies eine komplette Neuentwicklung des Leit- und Sicherungssystems bedeuten würde, kann dies sicher nicht kurz- oder mittelfristig realisiert werden.

## 8.4 Statorschaltung

### 8.4.1 Sternschaltung

Bislang kommt beim Langstatorantrieb der MSB ausschließlich die Sternschaltung (Anlage 8.4-1) zum Einsatz. Der Vorteil liegt darin, daß die Übertragung der Leistung mit hoher Spannung und geringem Strom erfolgen kann, d.h.

- die Übertragungsverluste sind gering,
- die zu installierende Leistung kann relativ gering sein,
- der Wirkungsgrad ist hoch.

Die Anlagen 8.4-1 und 8.4-2 zeigen beispielhaft Statoren, deren rechte und linke Seiten in Reihe geschaltet sind. Genau so gut können jedoch auch beide Seiten getrennt aufgebaut werden, siehe Abschnittswechselverfahren (Kap. 2.3).

### 8.4.2 Dreieckschaltung

Bei Anwendungen, die eine Reihenschaltung beider Statorseiten vorsehen, kann insbes. Bei langen Fahrzeugen oder hohen Geschwindigkeiten die induzierte Polradspannung so groß werden, daß die Nennspannung der Umrichter überschritten wird. Aus diesem Grunde wurde bislang die Reihenschaltung der Statorseiten für Einsätze außerhalb der Transrapid Versuchsanlage Emsland (TVE) nicht ernsthaft erwogen.

Da andererseits aber die Reihenschaltung die Anzahl der separat einzuspeisenden Statorsysteme halbiert, verspricht sie eine Halbierung der benötigten Umrichter in den Antriebsblöcken und damit auch eine Halbierung der zu installierenden Leistung.

Eine Dreieckschaltung (Anlage 8.4-1) eröffnet grundsätzlich diese Option, indem sie die benötigte Spannung der Umrichter um den Faktor  $1/\sqrt{3}$  reduziert. Zudem stellt die Reihenschaltung sicher, daß sich sämtliche Anschlüsse der Streckenkabel in der selben Schaltstelle befinden, was ansonsten aufgrund der räumlichen Ausdehnung der Statorabschnitte nicht der Fall wäre.

Die Dreieckschaltung bewirkt gegenüber der Sternschaltung folgende Änderungen:

- Reduktion der unterwerksseitig meßbaren Motorkonstante und damit der induzierten Polradspannung mit dem Faktor  $1/\sqrt{3}$ .
- Reduktion der wirksamen Statorimpedanz mit dem Faktor  $1/3$ .
- Erhöhung des zu transportierenden Stromes in den Streckenkabeln mit Faktor  $\sqrt{3}$ .

Insbesondere letztgenannte Eigenschaft kann zu unerwünscht hohen thermischen Belastungen der Streckenkabel führen. Deshalb sollte diese Schaltung nur verwendet werden, wenn der Strombedarf ohnehin klein ist oder wenn eine begrenzte verfügbare Spannung zu dieser Maßnahme zwingt.

### 8.4.3 Offene Sternschaltung

Neben den klassischen Schaltungsvarianten bietet der Langstatorantrieb noch eine dritte Möglichkeit, die Statorabschnitte (SA) an die Streckenkabel anzuschließen, nämlich in einer offenen Sternschaltung (Anlage 8.4-2): Die Streckenkabel werden an beiden Enden des SA angeschlossen und jeweils weiter bis zu den Umrichtern in den angrenzenden Unterwerken A und B geführt. Diese Schaltung setzt also zwingend eine Art Doppelspeisung voraus, auch wenn als Untervariante denkbar wäre, die Kabel wieder ins Unterwerk A zurückzuführen und dort an einen zweiten Umrichter B anzuschließen.

Im Gegensatz zur bislang bekannten Doppelspeisung erfolgt bei offener Sternschaltung keine *Stromaddition* der beiden Umrichter (UR) am Statorabschnitt (SA), sondern der Strom des UR A fließt über den Stator weiter in den zweiten Umrichter B. Statt dessen erfolgt eine *Spannungsaddition*, vgl. Ersatzschaltbild (Anlage 8.4-2). Ähnlich wie bei der Dreieckschaltung ermöglicht dies die Reihenschaltung beider Statorseiten auch bei großer Polradspannung. Die Anordnung besitzt folgende Eigenschaften:

- Die Höhe und Phasenlage des Stromes hängt von den Spannungen der beiden Umrichter  $\underline{u}_{URA}$  und  $\underline{u}_{URB}$  ab. Sind z.B. beide gleich, so fließt überhaupt kein Strom, ist eine der Spannungen 0, so herrschen mit Ausnahme des zusätzlichen Kabelweges zum zweiten Umrichter die gleichen Verhältnisse wie bei einer konventionellen Sternschaltung, sind beide Spannungen entgegengesetzt gleich wie im Anlage 8.4-2 dargestellt, so wirkt eine doppelt so große treibende Spannung auf den Strom.
- Sowohl das Potential gegen Erde (bzw. den Sternpunkt der Unterwerke) als auch die verkettete Spannung übersteigt an keiner Stelle die Werte, die ein einzelner Umrichter verursachen würde. Trotzdem fällt am Stator die doppelte Umrichterspannung  $u_{UR}$  ab, d.h. ohne die Stator-Nennspannung  $u_{NS} = 15 \text{ kV}$  (verkettet) zu verletzen, kann die Anordnung mit einer treibenden Spannung von bis zu 30 kV (verkettet), beaufschlagt werden.

Verzichtet man bei den Umrichtern auf den Ausgangsstrom, so erhält man in Summe eine speisende Spannung, die der eines Umrichters mit Trafoubersetzung 1:1 entspricht. Der verfügbare Strom wäre dann durch die Parallelschaltung der Wechselrichter in jedem Umrichter so hoch, daß eine Halbierung der Wechselrichteranzahl i.allg. ohne Beschränkung des Leistungsvermögens bleibt. Damit ergeben sich folgende Vorteile:

- Kostenreduktion durch Entfall der Trafos,
- Kostenreduktion durch Halbierung der Wechselrichter im Umrichter,
- keine Beschränkung der einspeisbaren Spannung durch die Magnetisierungseigenschaften der Trafos.
- Die aus Hochgeschwindigkeitsanwendungen bekannten GTO-Wechselrichter können unverändert eingesetzt werden, da keine direkte Reihenschaltung erfolgt (vgl. Kap. 6.1.4).

## 8.5 **Mischspeisung**

Beschleunigt man bei Nennleistung mit Werten von  $0,8 \text{ m/s}^2$ , so liefert das Wechselschrittverfahren (WSV) gemäß Kapitel 2 mit 50% Schubkrafteinbruch Beschleunigungseinbrüche von  $0,4 \text{ m/s}^2$ . Das Komfortkriterium „Beschleunigungseinbruch bis zu  $0,2 \text{ m/s}^2$ “ (Kap. 7) wird dadurch verletzt. Aus diesem Grunde wurden bei Fernverkehrsstrecken

bislang Dreischritt Antriebsbereiche (ABE) auf Beschleunigungsabschnitten vorgesehen, obwohl dies mit 50% Mehraufwand bei Antriebsblöcken und Streckenkabeln einher geht.

Um das Komfortkriterium zu erfüllen, darf theoretisch

$$\frac{0,2 \text{ m/s}^2}{0,8 \text{ m/s}^2} = 25\%$$

der verfügbaren Leistung ausfallen. Berücksichtigt man die Tatsache, daß bei Doppelspeisung insgesamt vier Umrichter für den ABE bereitstehen, so darf jeweils einer seine Speisetätigkeit unterbrechen. Aus dieser Überlegung heraus kann man ein Statorabschnittswchselfahren (SAWV) entwickeln, welches stets mindestens 75% der installierten Leistung bereitstellen kann (Anlage 8.5-1):

- Der prinzipielle Aufbau entspricht dem Wechselschrittverfahren.
- Davon abweichend beinhalten die Einspeise-Schaltstellen Vakuumschütze, die die Streckenkabelverbunde zwischen der Richtung vom Unterwerk A und der Richtung vom Unterwerk B auftrennen können (Trennschalter).
- Pro Streckenkabelverbund müssen daher zwei statt einem Kabelanschlußfeld vorgesehen werden, d.h. pro Verbund enthält eine Einspeise-Schaltstelle 5 statt 3 Mittelspannungsfelder.

Diese Anordnung gewährleistet, daß der Statorabschnittswchselfahren (SAW) gemäß Anlage 8.5-2 erfolgen kann:

- Der Umrichter B des abzusteuernden Stators n wird ruckbegrenzt auf 0 zurückgefahren, der Umrichter A speist den Stator n alleine ein (Einfachspeisung). Die Schubkraft beträgt nun nur noch 25% auf der betroffenen Seite. Die nicht wechselnde Seite liefert nach wie vor 50% in Doppelspeisung, so daß insgesamt 75% Schubkraft bereitstehen.
- Das Trennschütz im Streckenkabelverbund wird geöffnet.
- Der Stator n+1 wird zugeschaltet, obwohl Stator n immer noch eingespeist wird, und zwar vom Unterwerk A aus. Dies kann deshalb erfolgen, da die Verbindung zwischen Unterwerk A mit Stator n und Unterwerk B mit Stator n+1 unterbrochen wurde.
- Der Umrichter B steuert seinen Strom auf den Nennwert auf, noch bevor das Fahrzeug in den Stator n+1 einfährt.
- Das Fahrzeug fährt in den Stator n+1 ein und befindet sich nun teils im Stator n+1 und teils im Stator n. Da sowohl Umrichter A wie auch Umrichter B den gleichen Strom liefern, bleibt die Schubkraftsumme über beide Statoren konstant (nach wie vor 75%).
- Hat das Fahrzeug den Stator n verlassen, so steuert nun Umrichter A auf 0 ab.
- Der Stator n wird abgeschaltet.
- Der Streckenkabelverbund wird wieder durchverbunden. Dadurch erhält Umrichter A eine elektrische Verbindung zum Stator n+1.
- Umrichter A steuert nun ruckbegrenzt seinen Strom auf, bis wieder 100% der Schubkraft bereitstehen. Erst jetzt herrscht auf beiden Statorseiten wieder Doppelspeisung.

Da die Speisung der Statoren z.T. in Doppelspeisung und z.T. in Einfachspeisung erfolgt, wird das Statorabschnittswchselfahren (SAWV) im Weiteren als *Wechselschrittverfahren mit Mischspeisung* (MSV) bezeichnet. Dieses besitzt folgende Eigenschaften:

- Die Fahrkomfortgrenzwerte können ohne Zusatzaufwand in Antriebsblöcken und Streckenkabeln eingehalten werden.
- Der Zusatzaufwand besteht in zusätzlichen Schaltfeldern in den Schaltstellen.
- Hält man pro Umrichter  $25\% \cdot 4/3 = 33\%$  der Umrichter-Leistung vor, die man erst während der SAW einsetzt, so kann sogar ein völlig schubkrafteinbruchsfreier SAW erfolgen.
- Aufgrund der besseren Leistungsausnutzung erhält man bessere mittlere Beschleunigungen als beim herkömmlichen Wechselschrittverfahren.

Nachteil: Das Verfahren setzt zwingend Doppelspeisung voraus.

## 8.6 Leistungsvorhalt

Eine offensichtliche Methode, die Schubeinbrüche beim Wechselschrittverfahren zu reduzieren, besteht darin, außerhalb der Statorabschnittswchselfahren (SAW) Leistung vorzuhalten und diese dann während des Abschnittswchselfahren einzusetzen. Legt man beispielsweise die im obigen Kapitel angesetzte Nennbeschleunigung von  $0,8 \text{ m/s}^2$  zu Grunde, so erfolgen dann keine Schubkrafteinbrüche mehr, wenn diese Beschleunigung bereits von nur einer Statorseite erbracht werden kann. Außerhalb der Statorabschnittswchselfahren, d.h. bei Einsatz beider Statorseiten, besteht dann eine Leistungsreserve von 100%, die ungenutzt bleibt.

Für die als zulässig betrachteten Beschleunigungseinbrüche von  $0,2 \text{ m/s}^2$  genügt dementsprechend eine Leistungsreserve von 50%, d.h. eine Statorseite muß 75% der Beschleunigung von  $0,8 \text{ m/s}^2$  aufbringen ( $0,6 \text{ m/s}^2$ ), beide Statorseiten zusammen repräsentieren dann 150% Leistung ( $1,2 \text{ m/s}^2$ ), wovon 100% ( $0,8 \text{ m/s}^2$ ) genutzt werden.

Im umgekehrten Fall, nämlich daß die installierte Leistung aufgrund verfügbarer Umrichtertypen festliegt, bewirkt dieses Vorgehen, daß u.U. die gewünschte Nennbeschleunigung nicht erreicht werden kann.

Das Verfahren erfordert Änderungen in der Steuerungs- und Regelungssoftware, denn um entsprechend Leistung vorhalten zu können, muß die zur Verfügung stehende Leistung im SAW erst berechnet werden. Diese hängt nämlich vom einseitig erzielbaren Statorstrom ab, der wiederum durch die momentan gültigen Betriebspunktparameter wie Polradspannung, Spannungsverlust auf den Streckenkabeln und im Stator sowie Strom- und Spannungsgrenze der Umrichter bestimmt wird, was außerhalb der SAW eine Berechnung neben der eigentlichen Regelung erfordert.

Ein genereller Vorteil dieses Vorgehens gegenüber dem Dreischrittverfahren besteht darin, ca.  $\frac{1}{3}$  der Antriebstechnik einzusparen, ohne daß der Fahrkomfort unterschritten wird. Dies gelingt z.B. dann, wenn der tatsächliche Leistungsbedarf gegenüber der installierten Leistung klein ist, d.h. wenn wie im Regionalverkehr üblich relativ kleine Geschwindigkeiten vorliegen und gleichzeitig die Standard-Umrichter der Hochgeschwindigkeitsstrecken zum Einsatz kommen.

## 8.7 Teilschrittverfahren

### 8.7.1 Grundidee

Um Schubkrafteinbrüche beim Statorabschnittswechsel (SAW) zu vermeiden, muß bei den bekannten Verfahren stets eine Überdimensionierung an Umrichterleistung erfolgen, nämlich beim Bocksprungverfahren 100% (1 von 2 Umrichtern steht außerhalb des SAW still), beim Dreischrittverfahren 50% (1 von 3 Umrichtern steht außerhalb des SAW still) und beim weiter oben vorgestellten WSV mit MSP 33% (Leistungsreserve pro Umrichter, nur bei Doppelspeisung möglich!), bei Wechselschritt mit Leistungsvorhalt 50%-100%.

Dies liegt daran, daß der SAW bei allen bekannten Verfahren eine Verkopplung der Fahrzeugposition mit dem SA-Anfang bzw. –Ende herstellt, was stets ein Absinken der induzierten Polradspannung in mindestens einem der beteiligten Statorabschnitte (SA) und damit Schubverlust bewirkt, der durch zusätzliche Speisesysteme kompensiert werden muß.

Ein Lösungsansatz, um trotz ohne zusätzliche Leistung installieren zu müssen einen schubkrafteinbruchsfreien SAW zu erzeugen, kann daher nur in einer SA-Fortschaltung bestehen, die bereits erfolgt, *bevor* sich das Fahrzeug dem SA-Ende nähert und die Polradspannung einbricht.

Anlage 8.7-1 zeigt eine prinzipielle Anordnung beispielhaft in einer Sternschaltung der Statoren eines Streckenkabelverbundes. Folgender Ablauf wäre denkbar:

1. Das Fahrzeug befindet sich im Statorabschnitt (SA)  $n$ ; dieser wird eingespeist, allerdings mit offenem Sternpunkt. Der SA  $n+1$  ist nicht wie alle anderen SA abgeschaltet, sondern befindet sich in Reihe zum SA  $n$  und wird somit vom selben Statorstrom  $i_S$  durchflossen. Erst am Ende dieses SA  $n+1$  befindet sich ein geschlossener Sternpunkt, der den Stromfluß erst ermöglicht.
2. Der SA  $n+2$  wird ebenfalls mit geschlossenem Sternpunkt in Reihe zu den SA  $n$  und  $n+1$  geschaltet. Dieser bleibt zunächst trotzdem stromlos, da sich der eingespeiste Strom bereits über den Sternpunkt des SA  $n+1$  schließt.
3. Das Fahrzeug fährt in den SA  $n+1$  ein. Dabei entsteht kein Schubkrafteinbruch, da beide SA durch die Reihenschaltung wie ein einziger SA wirken.
4. Spätestens wenn sich das Fahrzeug vollständig im SA  $n+1$  befindet, wird dessen Sternpunktschalter geöffnet. Der Strom fließt nun über alle 3 in Reihe geschalteten SA.
5. Die Einspeisung des SA  $n+1$  wird zugeschaltet. Dadurch stehen dem Strom zwei Wege zur Verfügung, auf die er sich aufteilt, nämlich über das zum SA  $n$  parallel liegende Streckenkabel (kleine Impedanz, hoher Anteil) und über den SA  $n$  selbst (hohe Impedanz, kleiner Anteil).
6. Der Einspeiseschalter des SA  $n$  wird geöffnet, da dieser Strompfad nicht mehr benötigt wird, der Strom kann vollständig über die Einspeisung des SA  $n+1$  eingespeist werden. Die Steuerung beginnt wieder von vorne.

Auf diese Weise können theoretisch alle Abschnittswechsel ohne Schubkrafteinbruch erfolgen, ohne zusätzliche Verbunde/Umrichter zu benötigen. Da man stets nur Teile des gerade eingespeisten Statorbereiches weiterschaltet, wird dieses Verfahren im Weiteren als *Teilschrittverfahren* (TSV) bezeichnet. Alternativ wäre auch ein Ablauf denkbar, bei dem anstatt kurzzeitig drei SA in Reihe zu schalten, kurzzeitig nur ein SA eingespeist wird.

Das TSV stößt allerdings auf folgende Schwierigkeiten:

- Die Schaltvorgänge erfolgen nicht mehr stromlos, sondern unter Last.
- Die Impedanzen bleiben während des SAW nicht konstant. Soll auch bei der Reihenschaltung dreier SA noch Nennstrom fließen, so müssen die Einzelimpedanzen der SA klein sein, d.h. die Schaltstellen dementsprechend dicht stehen (hohe Anzahl der Schaltstellen). Andernfalls muß mit Schubkrafteinbrüchen während dieser Zeitbereiche gerechnet werden.
- Während der Schaltzeiten sind die Streckenimpedanzen nicht klar definiert, bzw. die Streckenimpedanzen ändern sich zu nicht exakt bestimmbar Zeitpunkten. Dies führt normalerweise zu Änderungen der Statorströme, die ausgeglet werden müssen.

Diese Punkte bedürfen einer weitergehenden Untersuchung, bevor das Verfahren als Alternative in die weiteren Optimierungsüberlegungen einfließen kann.

### 8.7.2 Belastung Schaltelemente

Die Vakuumschütze in den Schaltstellen müssen folgende Lastfälle beherrschen:

- Einschalten unter Last: Dies ist normalerweise unkritisch, da während des Schaltvorganges noch kein Strom fließt. Dieser beginnt sich erst nach Kontaktierung mit der Zeitkonstante  $\tau$  der Strecke aufzubauen, so daß das Einschalten keine besonderen Anforderungen an die Schaltgeräte stellt.
- Ausschalten unter Last: Die Schaltgeräte können den Nennstrom bei der Nennfrequenz von 50 Hz ohnehin problemlos schalten. Desweiteren wird unterstellt, daß die durch die Schaltvorgänge ausgelösten, transienten Spannungüberhöhungen an den Schaltelementen ebenfalls durch die Auslegung der Schalter abgedeckt sind.
- Beim Transrapid reicht der Frequenzbereich bis hinab zu 0 Hz (Stillstand). Zwischen 0 Hz und einer Mindestfrequenz (ca. 30 Hz) garantieren die Schaltgeräte keine sichere Stromflußunterbrechung. Andererseits erfolgt bei dem vorgestellten Konzept kein Abschaltvorgang, ohne daß dem Strom ein alternativer Pfad zur Verfügung gestellt wird, so daß dieser bei Erhöhung der Impedanz im Schaltgerät (Lösen der Kontakte) mit der Zeitkonstante  $\tau$  in diesen alternativen Strompfad kommutieren kann und somit das Öffnen des Schalters evtl. trotzdem gewährleistet.

Die Zeitkonstante beträgt in erster Näherung

$$\tau = \frac{L_T + L_A + L_S}{R_T + R_A + R_S}$$

mit den Induktivitäten  $L_T$ ,  $L_A$  und  $L_S$  des Ausgangstrafos, der Streckenkabel vom Unterwerk A und des Stators sowie den entsprechenden Widerständen. Sie liegt i.allg. in einem Bereich zwischen 10 ms und 20 ms. Ob diese Zeitkonstante klein genug ist, um den Strom hinreichend schnell abzukommutieren, müßten Versuche zeigen. Für den Fall, daß dies nicht immer der Fall ist, darf das Verfahren nicht unterhalb von ca. 30 Hz zum Einsatz kommen. Dies betrifft aber normalerweise nur singuläre Statorabschnittswchsel (SAW), da meist schneller als 30 Hz gefahren wird.

### 8.7.3 Stationäre Stromfehler

Fehlerhafte Statorströme  $\underline{i}_S$  können aus Modellfehlern in der Regelung resultieren: Als Meßgröße für den Statorstrom  $\underline{i}_S$  steht nur der Strom am Unterwerks-Ausgang  $\underline{i}_A$  zur Verfügung. Die Antriebsregelung/-steuerung (ARS) rechnet deshalb  $\underline{i}_A$  anhand von Streckenmodellen auf  $\underline{i}_S$  um.

Solange die Wellenlänge  $\lambda_A$  des eingespeisten Drehstromsystems um ca. zwei Zehnerpotenzen unter der Übertragungslänge  $d_A$  zwischen Unterwerk und Schaltstelle liegt, genügt als Modell ein aus diskreten Bauelementen R und L aufgebauter Stromkreis. Hier gilt dann stets  $\underline{i}_A = \underline{i}_S$ , so daß grundsätzlich kein stationärer Fehler auftritt.

Aus Fernverkehrsprojektierungen des Transrapid ist bekannt, daß Modelle der Wellentheorie Anwendung finden. Dann gilt z.B. für den Strom zwischen Unterwerk A ( $\underline{i}_A$ ) und der Schaltstelle ( $\underline{i}_{SSA}$ )

$$\underline{i}_A = \underline{i}_{SSA} \cdot \frac{1}{2} \cdot (e^{\gamma_A \cdot d_A} + e^{-\gamma_A \cdot d_A}) + \underline{u}_{SS} \cdot \frac{1}{2} \cdot (e^{\gamma_A \cdot d_A} - e^{-\gamma_A \cdot d_A}) \cdot \frac{1}{Z_{WK}}$$

mit dem Ausbreitungsmaß der Streckenkabel  $\gamma_A$ , dem Abstand Unterwerk-Schaltstelle  $d_A$ , der Spannung an der Schaltstelle  $\underline{u}_{SS}$  und dem Wellenwiderstand der Kabel  $Z_{WK}$ . In analoger Form gilt dies auch für den Stator.

Man sieht, daß der Strom am Unterwerk i.allg. weder in Amplitude noch in Phase mit dem Strom im Stator übereinstimmt. Ändert sich die Strecke während eines Umschaltvorganges, so bedeutet dies eine Änderung von  $d_A$  (bzw. für den Stator  $d_S$ ), so daß die Berechnung von  $\underline{i}_S$  Fehler enthält, die auf die Längendifferenz  $\Delta d_A$  bzw.  $\Delta d_S$  zurückzuführen sind.

Beispielhafte Berechnungen zeigen jedoch, daß die hier angedachten Betriebsfälle keine Wellenansätze erfordern und somit grundsätzlich keine stationären Stromfehler auftreten.

### 8.7.4 Transiente Stromfehler

Unterstellt man vereinfachend, daß sich die Streckenimpedanz schlagartig ändert, die angelegte Umrichterspannung  $\underline{u}_A$  jedoch zunächst konstant bleibt, so stellt sich mit der Zeitkonstante der Strecke  $\tau$  eine Abweichung des Stromes vom Sollwert ein.

Je nachdem, wie schnell der Stromregler auf die Abweichung reagieren kann, wird ein Endwert des Stromes entweder erreicht oder schon vorher abgeregelt. Der Endwert des Statorstromes  $\underline{i}_{Snach}$  läßt sich einfach aus einer stationären Betrachtung ableiten, wenn die vor dem Schaltvorgang gültige Unterwerksspannung  $\underline{u}_{Avor}$  auf die nach dem Schaltvorgang gültige Impedanz  $Z_{nach}$  angelegt wird:

$$\underline{i}_{Snach} - \underline{i}_{Svor} = \frac{\underline{u}_{Avor}}{Z_{nach}} - \frac{\underline{u}_{Avor}}{Z_{vor}} = \frac{\underline{u}_{Avor} \cdot (Z_{vor} - Z_{nach})}{Z_{vor} \cdot Z_{nach}} = \frac{(\underline{u}_p + \underline{i}_{Svor} \cdot Z_{vor}) \cdot (Z_{vor} - Z_{nach})}{Z_{vor} \cdot Z_{nach}}$$

Die Abweichung der Ströme wird also groß, wenn

- die Polradspannung  $\underline{u}_p$  groß ist,
- der Statorstrom  $\underline{i}_{Svor}$  groß ist,

- die Impedanzdifferenz relativ gesehen groß ist. Dies begünstigt im Übrigen die Variante mit kurzzeitig drei SA in Reihe (Impedanzerhöhung 33%) gegenüber kurzzeitig ein SA (Impedanzminderung 50%).

Man muß unbedingt vermeiden, daß  $i_{\text{Snach}} \gg i_{\text{Svor}}$ , da dies Beschädigungen der Antriebskomponenten durch Überstrom nach sich ziehen kann. Aus diesem Grunde sollte auch der dritte SA n+2 zugeschaltet werden, bevor die Einspeisung des ersten SA n überbrückt wird, da sonst über 50% der Impedanz entfielen und der Strom kurzzeitig ansteigen könnte.

Folgender worst-case-Ansatz berechnet die maximale *positive* Abweichung des Statorstromes:

- $u_p$  bei Nenngeschwindigkeit und maximaler Sektionszahl.
- Angenommener Nennstrom des Antriebsbereiches.
- Reduktion der Impedanz von 3 Statoren in Reihe auf 2 Statoren in Reihe und Parallelschaltung aus einem Stator und Streckenkabeln.

Diese Berechnung müßte nach Aufbau jedes Antriebsbereiches durchgeführt werden, so daß der Abstand des Nennstromes zum betrieblich nutzbaren Strom definiert werden kann.

Eine beispielhafte Berechnung dieses Falles bei 200 km/h, 1 kA Nennstrom und einheitlichen Teil-Statorabschnitten von 0,5 km Länge ergibt eine maximale Stromabweichung ca. 30% (300 A bei 1000 A Nennstrom), und zwar je nach Änderungsrichtung der Impedanz positiv oder negativ. Die Stromspitze kann in ca. 20 ms von einem integralen Stromregler mit einer Nachstellzeit von 10 ms ausgeglichen werden.

Eine Stromreserve von 300 A zu schaffen, stellt jedoch keine befriedigende Lösung dar. Deshalb sollte das unten beschriebene Konzept mit einem „Spannungshalter“ verfolgt werden.

#### 8.7.5 Spannungshalter

Die oben ermittelte Stromabweichung entspricht einer Beschleunigungsänderung um weniger als  $0,2 \text{ m/s}^2$ . Somit folgt, daß eine kurzfristige Ausregelung dieser Fehlerströme eigentlich gar nicht unbedingt erforderlich wäre. Daraus resultiert folgendes Konzept (vgl. Anlage 8.7-2):

- Im Abstand von ca. 10 ms vor Punkt 5 der Ablaufsteuerung (Zuschaltung Einspeisung SA n+1) blockiert die ARS ihren konventionellen Stromregler (insbesondere auch den Integrator) und schaltet statt dessen auf einen speziellen „Spannungshalter“ um.
- Der Spannungshalter erhält als Sollwert die Spannung  $u_A$ , die für den Sollwert des Statorstromes und die Impedanz *nach* Abschluß des SAW einzustellen wäre. Dies führt zunächst zu einem Einbruch des Stromes, da die Impedanz zu diesem Zeitpunkt noch größer ist.
- Der Spannungshalter regelt diese Spannung als konstanten Wert ein. Dies bewirkt, daß sich der Statorstrom in Abhängigkeit von der Impedanz verändert, aber nicht aktiv nachgeregelt wird. Insbesondere geht der Strom vom anfangs zu kleinen Wert auf den geforderten Endwert über.
- Unmittelbar nach Punkt 5 der Ablaufsteuerung (Kap. 6.7.1) wird der Spannungshalter gesperrt und statt dessen der konventionelle Stromregler wieder freigegeben.

Anlage 8.7-3 zeigt den Verlauf des Statorstrombetrages und der Beschleunigung, wenn die Schaltvorgänge in einem angenommenen Abstand von 100 ms erfolgen (real liegen voraussichtlich

größere Abstände vor). Ergebnis: Die Stromeinbrüche betragen ca. 0,3 kA (entspricht ca.  $0,2 \text{ m/s}^2$ ) und stehen über einen Zeitraum an, der sich beim ersten Schalten durch die Dynamik des Stromreglers und beim zweiten Schalten überwiegend durch die Zeit zwischen Einschalten des Spannungshalters und dem tatsächlichen Schalten der Vakuumschütze bestimmt.

Nach Abschalten des Spannungshalters stellt sich im untersuchten Beispiel eine kleine Stromschwankung von ca. 10 bis 20 A ein. Diese resultiert daraus, daß der nun wieder freigegebene Integrator des Stromreglers aufgrund ungenauer Streckenmodellierungen nicht den exakt benötigten Wert aufweist. Dieses Phänomen kann auch real auftreten.

Da der Ruck sehr große Beträge aufweist (ca.  $10 \text{ m/s}^3$ ), kann der Fahrkomfort voraussichtlich nur dann akzeptiert werden, wenn die Einwirkdauer, d.h. die Schaltdauer, unterhalb der Wahrnehmungsschwelle liegt. Welche Einwirkdauer in Verbindung mit der vorhandenen Fahrzeugfederung in Fahrzeug-Längsrichtung noch zu spürbaren Krafteinwirkungen führt, wäre gesondert zu untersuchen. Ggf. müßten die Schaltzeiten verkleinert werden. Eine Möglichkeit der Verkürzung von Schaltvorgängen besteht z.B. darin, die Steuerung für die nicht wie bisher als Ablaufsteuerung, sondern als Interruptsteuerung zu realisieren.

Gesicherte Aussagen zum Fahrkomfort lassen sich jedoch erfahrungsgemäß erst durch Meßfahrten mit Probanden gewinnen.

#### 8.7.6 Ausführungsformen

Das TSV läßt sich sowohl in Einfach- als auch in Doppelspeisung, mit getrennten oder in Reihe geschalteten Statoren betreiben. Für den Regionalverkehr bieten sich insbesondere Ausführungsformen an, die möglichst wenig Hardware in Unterwerken benötigen. Deshalb werden hier beispielhaft Schaltungen beschrieben, die in Einfachspeisung mit in Reihe geschalteten Statoren auskommen.

*Sternschaltung:* Anlage 8.7-4 zeigt eine sinnvolle Anordnung in Sternschaltung. Pro Schaltstelle liegen fünf Schalter vor, nämlich neben dem üblichen Einspeiseschalter und Sternpunktschalter zusätzlich ein „Reihenschalter“ für die Reihenschaltung der Statoren rechts und links und zwei „Verlängerungsschalter“ zur Verlängerung bzw. Verkürzung der Statorabschnitte auf beiden Seiten.

*Dreieckschaltung:* Die Dreieckschaltung benötigt keinen Sternpunktschalter, ansonsten entspricht die Anordnung der Sternschaltung (Anlage 8.7.-5).

Eine offene Sternschaltung erfordert einen erhöhten Hardwareaufwand (Doppelspeisung) und wird deshalb nicht weiter betrachtet.

*Ablauf:* Entsprechend dem oben beschriebenen Steuerungsablauf erfolgt zunächst eine Zuschaltung des nächsten (Teil-) SA. Bezüglich der Abschaltung kann es sich u.U. als günstig erweisen, nicht gleich den gesamten, ersten (Teil-) SA abzuschalten, sondern den rechten und den linken (Teil-) SA nacheinander (Anlage 8.7-6). Vorteil: Die Impedanzsprünge und damit die Beschleunigungseinbrüche betragen nur noch die Hälfte.

*Redundanz:* Die Anordnung enthält nur noch ein einziges Speisesystem. Dies widerspricht zunächst dem Redundanzprinzip, wonach Einzelausfälle nicht zu Betriebsstillstand führen dürfen. Anstatt jedoch ein zweites, redundantes Speisesystem aufzubauen, gelingt es auch mit Hilfe anderer, einfacherer Maßnahmen, die möglichen Einzelausfälle zu beherrschen, nämlich:

- Ein Reserve-Umrichter im Unterwerk, z.B. zuständig für alle vier angrenzenden Antriebsbereiche.
- Umgehung defekter Streckenkabelbereiche über einzelne Teil-SA (Beispiel Anlage 8.7-7). Dies erfordert allerdings ein- und ausgangsseitige Trenner im Strompfad der Streckenkabel innerhalb der Schaltstellen und führt zu höheren betrieblichen Impedanzen im Störfall.
- Liegt aus anderen Gründen mehr als ein Streckenkabelsystem parallel, so können diese in zwei Einspeiseverbunde aufgeteilt werden, die normalerweise parallel geschaltet sind. Die SA befinden sich wechselweise am einen oder anderen Verbund. Weist ein Kabelsystem einen Defekt auf, so heben Trennvorrichtungen in den Schaltstellen die Parallelschaltung auf, die Einspeisung erfolgt nur noch über einen der Kabelverbunde. Jeweils einer der SA, die an den intakten Verbund angeschlossen sind, übernimmt die Einspeisung (Beispiel in Anlage 8.7-7). Die intakten Kabel werden während des Störbetriebes u.U. thermisch stark belastet (je nach Außentemperatur), was die Lebensdauer reduzieren kann.
- Umgehung defekter SA durch Streckenkabel (Beispiel Anlage 8.7-7): Hierzu sind ohnehin bereits ausreichend Schaltelemente vorhanden.

Da diese Störfallmaßnahmen noch mehr Schaltgeräte erfordern, wird im Weiteren ein kostenmäßig günstigerer Aufbau gemäß Anlage 8.7-8 verwendet, bei dem nicht alle SA komplett ausgestattet werden. Daraus resultieren Einschränkungen in Störfällen dergestalt, daß nicht nur der defekte Abschnitt sondern auch noch der folgende Abschnitt bis zum nächsten Schalter zu umgehen ist.

#### 8.7.7 Anwendbarkeit

Aus obigen Ausführungen lassen sich folgende Fragestellungen zur Anwendbarkeit des TSV zusammenstellen:

- Inwieweit die Antriebsregelung/-Steuerung tatsächlich die Schaltvorgänge unter Last regelungstechnisch bewältigen kann, müßte durch Versuche verifiziert werden.
- Es treten während der Abschaltvorgänge Zeitbereiche auf, in denen der Strom nicht geregelt wird, sondern lediglich eine Spannungshaltung erfolgt. Ob dieses System wie beschrieben funktioniert und ob insbesondere keine unzulässigen Stromspitzen auftreten – auch bedingt durch kapazitive Effekte – müßte ebenfalls versuchstechnisch verifiziert werden.
- Es treten Beschleunigungsänderungen im Bereich von  $0,2 \text{ m/s}^2$  auf, die aber nur während der Schaltvorgänge anstehen (real ca. 0,1 bis 0,2 s). Der mittlere Ruck beträgt dabei ca.  $10 \text{ m/s}^3$ , beschränkt sich aber auf sehr kurze Zeitintervalle (abhängig von Streckenzeitkonstante, ca. 0,02 s). Ob diese Beschleunigungsänderung in Verbindung mit dem Federungssystem des Fahrzeuges noch spürbar ist, bzw. ob der Fahrkomfort beeinträchtigt wird müßte durch Fahrversuche geklärt werden.
- Der Aufwand an Schaltstellen steigt stark an. Inwiefern dies Kosteneinsparungen bei Unterwerken wieder kompensiert, muß sich im Rahmen der Auslegungsbeispiele zeigen.

## 8.8 Energieversorgungskonzept

Aufgrund der relativ großen Abstände der Unterwerke sowie der relativ hohen Leistungen pro Unterwerk wird für Fernverkehrsstrecken des Transrapid jeweils eine Hochspannungsanlage pro Unterwerk vorgesehen. Im Regionalverkehr hingegen liegt sowohl der Abstand zwischen den Unterwerken als auch die benötigte Leistung niedriger. Aus diesem Grunde wäre es z.B. denkbar, nur jedes zweite oder dritte Unterwerk mit einer Hochspannungsanlage auszurüsten und die benötigte Energie für die restlichen Unterwerke mittels Mittelspannungskabeln zu übertragen. Dazu wird die momentan im System gebräuchliche Spannungsebene 20 kV angesetzt.

Welche Kabel hierzu thermisch und impedanzmäßig nötig wären, sei am Beispiel eines Kabels mit 500 mm<sup>2</sup> Leiterquerschnitt im Anlage 8.8-1 bei max.  $u_{ab} = 1$  kV Spannungsabfall dargestellt. Berechnungsformeln:

Strom  $i = P / (u_N - u_{ab})$  (mit Leistung P und Nennspannung  $u_N$ )

Länge  $l = u_{ab} / i / R'$  (mit Widerstandsbelag  $R'$ ).

Die thermische Grenze (bei 603 A nach [4]) beträgt hier knapp 20 MW (Effektivwert).

Aus Redundanzgründen müßten mindestens zwei Kabel pro Unterwerk vorgesehen werden. Die Kosten der Kabel wären den Kosten der eingesparten Hochspannungsanlagen gegenzurechnen.

## 8.9 Rangierkonzept

An den Endstationen entsteht grundsätzlich ein Problem hinsichtlich der Bewegung von Fahrzeugen: Eine Langkehre erfordert Fahrzeugbewegungen unabhängig vom Fahrbetrieb auf der Strecke. Eine Kurzkehre bedeutet, daß Fahrzeuge ihre Spur entweder vor Erreichen der Station oder nach Abfahrt aus der Station verlassen müssen und somit in den gegenüberliegenden Antriebsbereich (ABE) einfahren und diesen belegen. Dies kann zu unzulässigen Doppelbelegungen führen und verursacht unerwünschte Verkopplungen der Fahrpläne beider Richtungen. Aus diesen Gründen muß der Wendevorgang mit Hilfe von Rangierstrategien optimiert werden.

Folgende Rangiermöglichkeiten sind für den Transrapid bekannt:

1. Einbeziehen der Umsetzfahrten in den Fahrplan bzw. streckenseitigen Antriebsbereich: Aufgrund der kleinen Wendegeschwindigkeiten und der großen Standzeiten (Fahrplan-Puffer) in den Endstationen ergeben sich sehr große Belegungszeiten. Dies führt zu unnötig kurzen ABE, d.h. unnötig vielen Unterwerken.
2. Zusätzlicher Rangierantrieb: Dies ermöglicht vom Fahrbetrieb unabhängige Rangierfahrten an den Endstationen, erfordert aber zusätzliche Rangier-Unterwerke kleinerer Leistung. Einsatz sowohl bei Kurzkehre als auch Langkehre möglich.
3. Antriebsloses Rangieren mit Schleppfahrzeugen: Dies erfordert zwar nur einen geringen Aufwand an Hardware, führt aber zu großen Wendezeiten, da die Schleppfahrzeuge nur langsam fahren können, erfordert Personal mit Sicherheitsverantwortung und schließt Kurzkehren aus, erzwingt also Fahrweg-Mehrlängen hinter den Stationen. Diese Gründe schließen einen Einsatz für Umsetzvorgänge in den Endstationen praktisch aus.

Alle bekannten Varianten befriedigen nicht. Legt man eine Kurzkehre zugrunde, so kann man eine Verkopplung und gegenseitige Störung der beiden beteiligten Spuren bzw. Antriebsbereiche (ABE) nur dann erreichen, wenn das jeweils ein- bzw. ausfahrende Fahrzeug „seinen“ ABE nicht verläßt, obwohl es die Spur wechselt. Daraus resultiert folgender Konzeptvorschlag:

- Der erste und der letzte Statorabschnitt (SA) der Strecke kann wahlweise dem ABE der Spur a oder der Spur b zugeordnet werden.
- Die Zuordnung korrespondiert eindeutig mit der Weichenstellung der Kurzkehr-Überleitverbindung.
- Der SA wird über eine Trennvorrichtung mechanisch mit der Weichenlage entweder an die Einspeisung des einen oder anderen ABE geschaltet (Anlage 8.9-1).

Dies beinhaltet folgenden Entwicklungsbedarf:

- Die Betriebsleittechnik Dezentrale (BLD) muß – etwa anhand der Weichenlage - sicher erkennen können, welche Spur welchem ABE und damit welcher BLD zugeordnet ist.
- BLD und ABE müssen dergestalt miteinander kommunizieren, daß Weichenbewegungen von der BLD angekündigt und vom Antrieb mit Stromlosschalten des SA und Umstellung der Streckenparameter in den Reglern quittiert werden.
- Die Trennvorrichtungen müssen konstruiert und einer sicherheitstechnischen Abnahme unterzogen werden. Dabei muß eine ausreichend große Löschstrecke für Lichtbögen Berücksichtigung finden, die stets eine sichere Abtrennung des nicht zuständigen ABE gewährleistet, auch wenn dieser fehlerhafter Weise einen Strom einprägt. Die Lebensdauerfestigkeit (im fehlerfreien Betrieb) muß gewährleistet sein. Dies erfordert Maßnahmen hinsichtlich Korrosion, Verschmutzungsschutz etc.

Eine technisch einfacher umsetzbare Möglichkeit besteht darin, die jeweiligen Streckenenden mittels einer zusätzlichen „Umschaltstelle“ beliebig an den jeweils zuständigen Antrieb zu schalten. Prinzipbedingt ist diese Umschaltung aber nicht sicher, denn die derzeit verfügbaren Vakuumschütze können – insbesondere bei kleinen Speisefrequenzen – einen Antriebsstrom nicht sicher unterbrechen. Deshalb muß die Betriebsleittechnik aus Sicherheitsgründen unterstellen, daß über die Umschaltstelle eine galvanische Verkopplung der Antriebe beider Spuren hergestellt wird. Im Falle einer Sicherheitsabschaltung des Antriebes auf einer Spur muß deshalb zwangsläufig auch die andere Spur mit abgeschaltet werden.

Indem man entweder diesen betrieblichen Nachteil in Kauf nimmt oder aber eine Entwicklung einer sicheren, z.B weichenlagenabhängigen, Trennvorrichtung durchführt, kann man auf zusätzliche Rangiereinrichtungen verzichten.

## 9 Definition Antriebsvarianten

Wie man den obigen Kapiteln entnehmen kann, lassen sich durch Kombination verschiedener Antriebskomponenten bzw. –Verfahren quasi beliebig viele verschiedene Antriebsvarianten definieren. Das Ziel dieser Arbeit besteht darin, die bezogen auf die Referenzstrecke kostengünstigste Variante zu bestimmen, welche das geforderte Leistungsprofil noch erfüllt. Dabei muß eine Risikoabwägung hinsichtlich des Einsatzes neuer Techniken erfolgen. Aus diesem Grunde soll jeweils eine Auslegung für folgende drei verschiedenen Varianten erfolgen:

1. *Referenz*: Diese Variante soll ausschließlich auf Komponenten und Verfahren zurückgreifen, wie sie aus Fernverkehrsprojektierungen bekannt bzw. durch Versuche auf der Versuchsanlage erprobt sind. Damit erhält man einen Referenz-Antrieb, anhand dessen die Wirksamkeit von Optimierungsmaßnahmen quantifizierbar wird.
2. *Konservative Optimierung*: Diese Variante soll alle Verfahren und Komponenten berücksichtigen, die eine nennenswerte Einsparung an Hardware und damit an Kosten erwarten lassen, die aber gleichzeitig keine unwägbaren Risiken hinsichtlich erforderlicher Entwicklungen beinhalten. Mit Hilfe dieser Variante lassen sich relativ kurzfristig erzielbare Kosteneinsparungen beziffern.
3. *Progressive Optimierung*: Diese Variante soll sämtliche Komponenten und Verfahren berücksichtigen, die auf der vorhandenen Technologie basieren und die Einsparungen erwarten lassen. Unwägbarkeiten hinsichtlich der Realisierbarkeit bzw. des Nachentwicklungsbedarfes – zumindest bei Software – werden dabei ignoriert. Diese Variante dient dazu, evtl. mittel- oder langfristig erreichbare Kosteneinsparungen abzuschätzen.

### 9.1 Variante 1

Dieser Variante liegen alle bislang aus Hochgeschwindigkeitsanwendungen vorhandenen und erprobten Komponenten zugrunde. Anhand des Anforderungsprofils gelangt man zu folgenden Ausgangsparametern für die Auslegung der Referenz-Variante:

- *Unterwerke*: Die kleinen Taktzeiten bewirken in Verbindung mit dem niedrigen Geschwindigkeitsniveau sehr kleine Unterwerksabstände. Deshalb kommen aus Kostengründen nur Typen in Frage, die ein Minimum an Unterwerksstandorten gewährleisten, d.h. Einfachspeisung in Verbindung mit Unterwerks-Typ 2.
- *Statorabschnittswchselverfahren*: Die aufgrund der zahlreichen Haltestellen häufigen Beschleunigungsvorgänge erfordern standardmäßig das Dreischrittverfahren, in Anlehnung an die Auslegung in Shanghai. Zwar stellt dies angesichts der großen Diskrepanz zwischen installierter und tatsächlich benötigter Leistung einen überproportional hohen Aufwand dar, so daß eine realistische Projektierung wahrscheinlich auf Alternativen zurückgreifen wird. Dennoch eignet sich dieses Verfahren an dieser Stelle als Referenz.
- *Statorschaltung*: Da einerseits die Statoren rechts und links separat betrieben werden und das Geschwindigkeitsniveau sehr niedrig liegt, bleibt der Spannungsbedarf klein. Die Sternschaltung genügt diesen Anforderungen und verursacht gleichzeitig aufgrund des geringen zu übertragenden Stromes geringe Komponentenbelastungen, so daß günstige Komponentenauslegungen möglich werden.

- *Rangierkonzept*: Falls ausreichend Zeit zur Verfügung steht, kann die Kehrfahrt in den Fahrplanbetrieb mit integriert werden. Sonst Rangierunterwerke in den Endstationen.

Die Auslegung der sich daraus ergebenden Antriebskomponenten erfolgt in den weiteren Kapiteln.

## 9.2 Variante 2

Ausgehend von der Variante 1 können folgende konservative Optimierungen erfolgen:

- *Unterwerk*: Keine Änderung gegenüber Referenz-Variante erkennbar.
- *Statorabschnittswchselverfahren (SAWV)*: SAWV, die gegenüber der Referenz besonders große Einsparungen an Hardware ermöglichen, sind das Kurzschlußverfahren (KSV) und das Teilschrittverfahren (TSV). Das KSV scheidet aus Komfortgründen grundsätzlich aus, das TSV beinhaltet dagegen sehr hohe Entwicklungsrisiken, so daß letztlich als Kompromiss auf das Wechselschrittverfahren (WSV) zurückgegriffen wird. Zur Komfortverbesserung soll 50% der Leistung als Reserve vorgehalten werden.
- *Statorschaltung*: Wie Referenz-Variante, mit gleicher Begründung.
- *Ausgangstrafos*: Anstelle einer festen Trafoübersetzung soll eine in zwei Stufen schaltbare Übersetzung zum Einsatz kommen, um die Speisespannung besser auf den Leistungsbedarf abstimmen zu können. Außerdem soll die Nennfrequenz 50 Hz betragen.
- *Umrichterkonzept*: Es sollen falls möglich Umrichter mit 50% der Nennleistung der Standard-Umrichter verwendet werden. Der damit einhergehende Leistungsverlust soll durch andere Maßnahmen soweit möglich ausgeglichen werden, siehe insbes. Ausgangstrafos.
- *Energieversorgungskonzept*: Anhand der Leistungsverläufe ist zu untersuchen, ob sich Einsparungen durch Entfall von Hochspannungsanlagen ergeben.
- *Betriebsleittechnik Dezentralen (BLD)*: Für die derzeit vorliegende BLD wurden bereits Überlappungen von Antriebsbereichen (ABE) über einig 100 m projektiert (siehe Endbereiche der Strecke Berlin-Hamburg), d.h. Haltestellen können in naher Zukunft bereits – je nach Erfordernis – dem einen oder anderen ABE zugeordnet werden. Die Haltezeiten belegungszeitmäßig entfallen zu lassen stellt daher kein nennenswertes Projektierungsrisiko mehr dar und sollte genutzt werden. BLD ohne feste Zuordnung zu ABE bzw. ABE mit 2 BLD entsprechen nicht dem derzeitigen Leistungsprofil des Transrapid und werden hier deshalb nicht angesetzt.
- *Rangierkonzept*: Mit einer Umschaltvorrichtung ohne Entwicklung gemäß Kap. 8.9.

## 9.3 Variante 3

Ausgehend vom Referenz-Konzept können folgende progressive Optimierungen erfolgen:

- *Unterwerk*: Keine Änderung gegenüber Referenz möglich.
- *Statorabschnittswchselverfahren (SAWV)*: Zur Ermittlung eines möglichen Optimierungspotentials erfolgen die SAW im Teilschrittverfahren (TSV) mit in Reihe geschalteten Statorseiten. Dabei wird vorausgesetzt, daß die aufgezeigten Probleme durch entsprechende Nachentwicklungen und Versuche bewältigt werden.

- *Statorschaltung*: Durch die Reihenschaltung der rechten und linken Statorseite verdoppelt sich der Spannungsbedarf in etwa. Zur Minimierung der Kabelbelastung soll dennoch eine Sternschaltung angesetzt werden, falls dies aus Spannungsgründen möglich ist. Alternativ kann eine Dreieckschaltung vorgesehen werden. Eine offene Sternschaltung sollte vermieden werden, da dies Doppelspeisung und somit mehr Unterwerke erfordert.
- *Ausgangstrafos*: Da sich beim TSV normalerweise stets alle Umrichter im Einsatz befinden, stehen keine „Pausen“ zum Umschalten verschiedener Übersetzungen zur Verfügung. Pro ABE soll deshalb nur eine feste Übersetzung pro Antriebsbereich (ABE) verwendet werden. Die Nennfrequenz soll jedoch 50 Hz betragen.
- *Umrichterkonzept*: Je nach Leistungsbedarf sollen falls möglich Umrichter mit 50% Leistung zum Einsatz kommen.
- *Energieversorgungskonzept*: Vorgehen wie Variante 2.
- *Betriebsleittechnik Dezentralne (BLD)*: Wie schon bei der konservativen Auslegung erfolgt eine Eliminierung der Belegungszeit von Haltestellen an Antriebsbereichsgrenzen. Desweiteren werden mehrere BLD pro ABE zugelassen.
- *Rangierkonzept*: Mit weichengesteuerten Trennvorrichtungen.

## 10 Vorabauslegung

Prinzipiell beeinflussen sich sämtliche Auslegungsparameter des Langstatorantriebes gegenseitig, z.B. nimmt die Auslegung der Streckenkabel und der Statorabschnittslängen Einfluß auf die Impedanz und wirkt so auf die Fahrdynamik, die Belegungszeit der Antriebsbereiche und die thermische Belastung der Kabel. Aus diesem Grunde müßten die Auslegungen sämtlicher Komponenten streng genommen iterativ erfolgen. Schätzt man jedoch die Parameter verschiedener Komponenten anhand von Erfahrungswerten im Voraus ab, so genügen ein bis zwei Iterationsschritte, um annähernd optimale Werte für alle Parameter zu erhalten.

Die Unterwerke sind so zu plazieren, daß sowohl in der einen wie auch der anderen Fahrtrichtung Belegungszeiten entstehen, die unter der technisch geforderten Grenze liegen. Hierzu benötigt man Weg-Zeit-Diagramme der beiden Fahrtrichtungen. Da diese zu Beginn der Auslegung noch nicht vorliegen können – die Fahrdynamik des Transrapid hängt eben von dieser Auslegung ab – muß diese Fahrdynamik anhand einer „Vorab-Auslegung“ ermittelt werden.

Diese Vorab-Auslegung kann prinzipiell beliebig ausgestaltet sein, es bieten sich jedoch folgende Eigenschaften an:

- *Streckenkabel*: Dimensionierung so, daß damit voraussichtlich keine ungewollten fahrdynamischen Einschränkungen resultieren. Die Streckenkabel können später kostenoptimiert werden. Ansatz: Kabelauslegung wie Transrapid Versuchsanlage Emsland (TVE, vgl. [5]).
- *Trafoübersetzung*: Die Übersetzung sollte so klein gewählt werden, daß bei Einsatz des „Standard-Umrichters“ genügend Strom zum Erreichen der Nennbeschleunigung zum Anfahren vorhanden ist, andererseits aber keine Spannungsbegrenzungen bei Höchstgeschwindigkeit auftreten. Abschätzung Anfahrbereich mit  $F = m_{Fzg} \cdot a_{nenn}$  und  $F = c_M \cdot i_{S \text{ Anfahr}}$ :

$$i_{S \text{ Anfahr}} = \frac{m_{Fzg} \cdot a_{nenn}}{c_M} = \frac{63,5 \text{ t} \cdot 0,8 \text{ m/s}^2}{43,3 \text{ N/A}} = 1,17 \text{ kA}$$

Nachdem die Wechselrichter 1,2 kA Nennstrom liefern, bietet sich zunächst eine Übersetzung von 1:1 an. Die verfügbare Spannung beträgt dann

$$u = u_{WR \text{ nenn}} = 4,3 \text{ kV.}$$

Dies liegt deutlich unter dem zulässigen Grenzwert und genügt hinsichtlich der Polradspannung  $u_p$  für folgende theoretische Endgeschwindigkeit (aus  $P = 2 \cdot 3 \cdot u_p \cdot i_s$  und  $P = c_M \cdot i_s \cdot v_{\text{End}}$ ):

$$v_{\text{End}} = \frac{6 \cdot u_p}{n_s \cdot c_M} = \frac{6 \cdot 4,3 \text{ kV}}{5 \cdot 43,3 \text{ N/A}} = 119 \text{ m/s}$$

Dieser Wert liegt deutlich über den betrieblich zu fahrenden Geschwindigkeiten.

- *Statorabschnittslängen*: Es werden Abschnittslängen von  $d_{as} = 1,2 \text{ km}$  projiziert. Dieser Wert entspricht der durchschnittlichen Länge der MSB Berlin-Hamburg und auch Shanghai. Im Rahmen der Auslegung der einzelnen Varianten können je nach Bedarf Verkürzungen oder Verlängerungen erfolgen.

Als Statorabschnittsverfahren wird Dreischritt als Referenz angesetzt.

## 11 Auslegung Unterwerke

### 11.1 Vorgehensweise

Liegen die Weg-Zeit-Diagramme der Vorabauslegung vor, so läßt sich die Anzahl der benötigten Antriebsbereiche  $n_{\text{ABE}}$  wie folgt mittels der geforderten technischen Fahrzeit  $t_{\text{Fahrzeit}}$ , des technischen Taktes  $t_{\text{Takt}}$  und der vorerst geschätzten Belegungszeit durch die Betriebsleittechnik  $t_{\text{BLT}} = 1 \text{ min}$  abschätzen:

$$n_{\text{ABE}} = \frac{t_{\text{Fahrzeit}}}{(t_{\text{Takt}} - t_{\text{BLT}})} = \frac{25 \text{ min}}{(6,5 \text{ min} - 1 \text{ min})},$$

wobei  $n_{\text{ABE}}$  stets auf die nächste ganze Zahl aufzurunden ist und somit 5 ergibt. Die Antriebsbereichsgrenzen (ABG) liegen dann in einem zeitlichen Abstand von  $t_{\text{Fahrzeit}}/n_{\text{ABE}} = 5 \text{ min}$ , die sich durch die Weg-Zeit-Diagramme auf bestimmte Orte für Hin- bzw. Rückfahrt festlegen lassen.

Beim Unterwerkstyp 2 in Einfachspeisung muß an jeder zweiten ABG ein Unterwerk (UW) stehen. Da ein UW jeweils beide Fahrtrichtungen einspeist, muß sich der Standort an den entsprechenden zwei ABG der beiden Fahrtrichtungen orientieren, d.h. in dem Bereich zwischen diesen ABG liegen. Dabei muß beachtet werden, daß die ABG entweder zwingend außerhalb von Stationen oder möglichst in Stationen liegt – je nach BLT-Ausführung. Im letztgenannten Fall reduziert sich dann die anzusetzende Fahrzeit um die jeweils eingesparten Haltezeiten, so daß entsprechend obiger Formel evtl. weniger ABE benötigt werden. Sinnvollerweise legt man danach die ABG der beiden Richtungen an den Unterwerks-Standort (Anlage 11.1-1).

Sind Unterwerksstandorte aus städtebaulichen Gründen nicht realisierbar, so müssen entweder Zuleitungen zwischen den Unterwerken und den ABG verlegt werden oder es muss stattdessen der UW Typ 1 eingesetzt werden. Bei diesem kann das UW mehr oder weniger beliebig innerhalb des ABE plziert werden. Diese Problematik wird hier jedoch nicht näher betrachtet.

Nach Abschluß der Komponentenauslegung, d.h. wenn die tatsächliche Fahrkurve und die tatsächliche Belegungszeit durch die BLT vorliegt, müssen die tatsächlichen Belegungszeiten jedes ABE berechnet und die Lage der UW nochmals überprüft werden.

### 11.2 Ergebnisse

Anlage 11.2-1 zeigt die Weg-Zeit-Diagramme der Vorab-Auslegung in beiden Fahrtrichtungen. Bei einem Zeitraster von 270 s kommen die Antriebsbereichsgrenzen (ABG) in etwa bei km 0, 6, 16, 25, 33 und 38 zu liegen. Festlegungen:

Variante 1: Die 5 Antriebsbereiche (ABE) erfordern drei Unterwerke. Diese werden bei km 6, 25 und 38 plziert. Die Kurzkehre erfordert ca. 0,5 min (Fahrzeit der ersten bzw. letzten 300 m). Berücksichtigt man zusätzlich eine Weichenstellzeit von 0,5 min in der Belegungszeit dieser Bereiche, so ergibt sich unter Berücksichtigung einer Fahrzeit von 25 min und den oben beschriebenen Abfahrtszeiten folgende Belegungssituation in den Endstationen, abhängig davon, ob die Kehre bei Ankunft oder Abfahrt von Zügen erfolgt (vgl. Anlage 11.2-2); Beispiel:

abfahrende Fahrzeuge belegen			ankommende Fahrzeuge belegen		
ABE/Spur	von	bis	ABE/Spur	von	bis
Abfahrt	:00	:01	Ankunft	:58	:02
Abfahrt	:00,5	:04,5	Abfahrt	:02	:03
Abfahrt	:07,5	:08,5	Ankunft	:05,5	:09,5
Abfahrt	:08	:12	Ankunft	:09,5	:10,5
Ankunft	:15	:16	Ankunft	:13	:17
Abfahrt	:15,5	:19,5	Ankunft	:17	:18

Der vorliegende Fahrplan verursacht stets unzulässige Doppelbelegungen von ABE und erfordert deshalb eine Abkopplung der Spurenden vom restlichen ABE, d.h. zusätzliche Rangierunterwerke. Alternativ wäre eine Verschiebung des Fahrplanes denkbar, indem z.B. im die Abfahrtszeit einer Endstation um 3 min verschoben wird. Die Belegungen der Abfahrts- und Ankunftsgleise liegen dann jeweils „auf Lücke“.

Ein 7,5-min-Takt ohne zusätzliche Unterwerke wäre somit zwar denkbar, die Fahrplan-Forderung nach Abfahrten jeweils zur vollen Stunde kann aber nur mit zusätzlichen Rangierunterwerken erfüllt werden kann. Aus Kostengründen werden diese in die vorhandenen Streckenunterwerke integriert.

Variante 2: Günstiger Weise sollten möglichst viele ABG an Haltestellen liegen, um die Bildezeiten zu sparen. In Frage kommen die km 16.5, 25.2, und 34. Damit ergeben sich schätzungsweise folgende Belegungszeiten (abzulesen aus dem Weg-Zeit-Diagramm):

ABE 1: 270 s

ABE 2: ca. 250 s + Bildezeit

ABE 3: ca.260 s

ABE 4: ca. 240 s

ABE 5: ca. 150 s

Ein Unterwerk kann dann eingespart werden, wenn durch Zusammenfassung zweier ABE (und ggf. Verschiebung der anderen) der Takt unter 6,5 min (390 s) bleibt. Bei der vorliegenden Musterstrecke ist dies jedoch nicht möglich. Die Einsparungen an Belegungszeit sind zu gering im Verhältnis zum Takt und können lediglich die Pufferzeiten erhöhen. Dies kann evtl. Freiheiten bei Auslegung anderer Komponenten schaffen.

Variante 3: Entfällt grundsätzlich die Bildezeit, so gilt für die Anzahl der benötigten ABE:

$$n_{\text{ABE}} = \frac{t_{\text{Fahrzeit}}}{t_{\text{Takt}}} = \frac{25 \text{ min}}{6,5 \text{ min}} = 4$$

Der zeitliche Abstand beträgt dann  $25 \text{ min} / 4 = 6 \frac{1}{4} \text{ min} = 375 \text{ s}$  bzw. in der Vorab-Auslegung  $23 \text{ min} / 4 = 5 \frac{3}{4} \text{ min}$ . Dies entspricht in etwa folgenden Standorten:

ABG 1: km 0 kein Unterwerk

ABG 2: km 9 Unterwerk 1

ABG 3: km 19 kein Unterwerk

ABG 4: km 29,5 Unterwerk 2

ABG 5: km 38 kein Unterwerk

Die BLD-Bereiche können dabei z.B. der Variante 2 entsprechen. Daraus folgt, daß ein BLD-Bereich jeweils Teile zweier ABE beinhaltet.

Rangierunterwerke werden in dieser Variante grundsätzlich nicht benötigt, da die weichenlagenabhängige Zuordnung zwischen ABE und Spuren Doppelbelegungen ausschließt.

Hinweise:

- Im vorliegenden Beispiel konnte durch Entfall der Bildezeit ein Antriebsbereich (ABE) eingespart werden, nicht aber durch Verlagerung der Antriebsbereichsgrenzen (ABG) in Stationen. Dies liegt an den gegebenen Abständen der Haltestellen im Verhältnis zur Taktzeit – die Haltestellen liegen zufällig nahezu in einem Raster von 5 Taktperioden (ABE). Bei anderen Abständen bzw. Taktzeiten wäre ebenso der umgekehrte Fall möglich.
- Die Fahrzeit der Vorab-Auslegung weist noch Reserven zur geforderten Fahrzeit auf. Sinnvoller Weise nutzt man diese Reserven zu Geschwindigkeitsreduktionen in Bereichen, in denen kurzzeitig höhere Geschwindigkeiten gefahren werden. Hierzu bietet sich der Bereich zwischen km 8,5 und 11,5 sowie 25 und 34. Die Belegungszeiten verschieben sich dadurch noch etwas. Bei Bedarf müßten ABG nochmals angepaßt werden.

## 12 Auslegung Streckenkabel

### 12.1 Vorgehensweise

Zwei Faktoren wirken auf die Auslegung der Streckenkabel, nämlich

- die Kabelimpedanz (Spannungsbedarf) und
- die thermische Belastung der Kabel.

Da sich die Streckenimpedanz neben den Kabeln in starkem Maße durch die Statorabschnittslänge regulieren läßt, steht die thermische Belastung der Kabel im Vordergrund bei der Dimensionierung der Streckenverkabelung.

Die im Kabel umgesetzte Verlustleistung  $P_{VK}$  bestimmt sich aus dem effektiven Kabelwiderstand  $R_{Keff}$  einerseits und dem effektiven Kabelstrom  $i_{Keff}$  andererseits:

$$P_{VK} = 3 \cdot R_{Keff} \cdot i_{Keff}^2$$

Der effektive Strom ergibt sich aus dem Fahrspiel der Vorab-Auslegung zzgl. eines Zuschlages für Stromüberschwingungen. Diese berechnen sich in Abhängigkeit von den Kabeldaten und dem Steuer- und Schwenkwinkel einer 5-stufigen Spannungsform mit Fourieranalyse nach [2] (vgl. auch Kap. 8.1). Die Werte des Klirrfaktors streuen je nach Parametersatz um zweistellige Prozentbeträge, der Gesamteffektivwert liegt dementsprechend nur wenige Prozent oder Prozentbruchteile über dem Grundwellenwert.

Der effektive Widerstand berechnet sich nach [7] aus der maximalen Leitertemperatur, dem Kabelaufbau und der Stromfrequenz. Dabei wird auf Eingangsdaten des Herstellers [4] zurückgegriffen.

Ebenfalls mit Hilfe von umfangreichen Formelwerken des Herstellers [3] lassen sich mittels Berechnung thermischer Widerstände der Kabel und des Bodens bzw. der Umgebungsluft unter Beachtung der Verlegedichte, gegenseitiger thermischer Beeinflussungen, Bodenaustrocknungsprozessen etc. schließlich zulässige Grenzwerte für den Kabelstrom angeben, mit Reduktionsfaktoren für parallel verlegte Kabel.

Berechnungsergebnisse für 50-Hz-Anwendungen finden sich in [3] und [4]. Dies entspricht Fahrzeuggeschwindigkeiten von ca. 100 km/h, was gleichzeitig dem Mittelwert des angestrebten Geschwindigkeitsbereiches zwischen 0 und 200 km/h entspricht. Deshalb wird an dieser Stelle auf eine Neuberechnung der Strombelastbarkeiten verzichtet.

Statt dessen erfolgt hier eine Berechnung des effektiven Stromes in jedem ABE und eine Auswahl von Kabeln gemäß dem Tabellenwerk aus [3] dergestalt, daß die Kabelanzahl möglichst gering ausfällt, um die Kosten niedrig zu halten. Der Typ wurde dabei auf die Reihe NA2XS2Y 3.../.. 6/10 kV beschränkt. Begründung:

- Diese Kabel weisen besonders niedrige Induktivitäten auf und nehmen somit wenig Blindleistung auf.
- Aufgrund der Einfachspeisung liegt das Spannungsniveau so niedrig, daß die Nennspannung dieser Kabel von 10 kV den Anforderungen genügt.

Um den Strom-Klirrfaktor, etwas verringerte Stromtragfähigkeiten aufgrund von Frequenzen >50 Hz sowie Reserven für starken Gegenwind, thermische Einflüsse anderer Kabel (der

Energieversorgung) u.ä. abzudecken, wird die nominelle Stromtragfähigkeit der Kabelanordnung hier mindestens 15% über dem ermittelten Stromeffektivwert des Fahrspiels festgelegt.

Im Gegensatz zur Doppelspeisung, wo die Kabelbelastung über die gesamte Kabeltrasse im Antriebsbereich (ABE) in etwa konstant bleibt, nimmt die Belastung bei Einfachspeisung mit zunehmender Entfernung vom Unterwerk immer weiter ab. Deshalb kann evtl. die Systemzahl in Abhängigkeit von der Unterwerksentfernung abnehmen.

## 12.2 Ergebnisse

Anlage 12.2-1 zeigt die Beträge der Statorstromverläufe  $i_s$  der Vorab-Auslegung. Mit Hilfe des Tabellen-Kalkulationsprogrammes EXCEL wurde für jeden ABE der effektive Strom  $i_{\text{eff}}$  wie folgt berechnet:

$$i_{\text{Eff}} = \sqrt{\frac{\sum i_s^2 \cdot dt}{t_{\text{Takt}}}} \cdot 115\% \quad (\text{mit } t_{\text{Takt}} = 6,5 \text{ min}).$$

Die Zeitintervalle  $dt$  ergeben sich dabei aus der gewählten Simulationsschrittweite. Einflüsse des Statorabschnittswechsels wurden vernachlässigt, bis auf einen Korrekturfaktor von  $\sqrt{\frac{2}{3}}$  beim

Dreischrittverfahren (DSV) zur Berücksichtigung der stromlosen Zeiten (beim DSV sind außerhalb der Abschnittwechsel immer nur 2 von 3 Verbunden aktiv).

Hinweis: Die Fahrdynamik und damit der Statorstrom der Varianten 1 bis 3 kann gegenüber der Vorab-Auslegung geringfügig abnehmen. Dadurch ergeben sich zusätzliche thermische Reserven. Ergebnisse:

Belastung / A	Variante 1		Variante 2		Variante 3	
	Spur a	Spur b	Spur a	Spur b	Spur a	Spur b
<b>ABE 1</b>	630	485	772	593	811	636
<b>ABE 2</b>	417	463	580	673	734	730
<b>ABE 3</b>	562	630	666	706	736	715
<b>ABE 4</b>	577	501	772	768	813	920
<b>ABE 5</b>	630	671	672	681	-	-

Wie zu erwarten war, liegen die Effektivströme in ABE mit überwiegender Konstantfahrt am niedrigsten (ABE 2) und in Bereichen mit Bremsvorgängen und langer Aufenthaltsdauer am höchsten (ABE 4/5). Demgegenüber stehen folgende Belastbarkeiten der Kabel nach [3], wenn folgende Annahmen bzgl. Der Verlegeparameter angesetzt werden:

- Max. zulässige Leitertemperatur: 90°C. Dies entspricht dem thermisch zulässigen Maximalwert. Darüber können Langzeitschäden entstehen.
- Bodentemperatur im Mittel 25 °C. Dies ist ein willkürlicher Ansatz. Die tatsächlichen Bodentemperaturen über die Betriebszeit sind in Abhängigkeit von den örtlichen Klimaverhältnissen zu bestimmen.
- Bodenleitwert 2,5 Km/W. Dies entspricht dem worst-case-Boden. Durch Vorort-Untersuchungen könnten sich bessere Werte ergeben.

- Maximaler Lastfaktor und Berücksichtigung des Umstandes, daß bei Verfahren mit rechts und links getrennt gespeisten Statoren stets 2 Verbunde gleichzeitig aktiv sind dadurch, daß für diese Verfahren die Korrekturfaktoren für doppelt so viele Systeme verwendet wurden.

Ergebnisse:

Belastbarkeit / A bei 90° Leitertemp., 25° Bodentemp., 2,5 Km/W Bodenleitwert bei Wechselschritt, Dreischritt u.ä. Verfahren mit 2 gleichzeitig aktiven Verbunden				
NA2XS2Y 3x...	...120/16...	...150/25...	...185/25...	...240/25 6/10 kV
<b>1 System</b>	184	206	234	272
<b>2 Systeme</b>	304	341	388	450
<b>3 Systeme</b>	450	505	573	666
<b>4 Systeme</b>	558	626	710	826
<b>5 Systeme</b>	602	676	767	891

Belastbarkeit / A bei 90° Leitertemp., 25° Bodentemp., 2,5 Km/W Bodenleitwert bei Verfahren mit 1 aktivem Verbund				
NA2XS2Y 3x...	...120/16...	...150/25...	...185/25...	...240/25 6/10 kV
<b>1 System</b>	216	242	274	319
<b>2 Systeme</b>	368	413	468	544
<b>3 Systeme</b>	488	548	622	723
<b>4 Systeme</b>	609	683	775	901
<b>5 Systeme</b>	708	794	901	1048

Man sieht z.B. anhand der Werte von 5 Systemen 185 mm<sup>2</sup> und 4 Systemen 240 mm<sup>2</sup>, daß unter den angesetzten Randbedingungen höhere Systemzahlen als 5 keine Vorteile gegenüber Querschnittsvergrößerungen bringen.

Setzt man möglichst geringe Systemzahlen an, so ergibt sich unter Berücksichtigung der 15%-Reserve für die einzelnen ABE folgende Kabelauslegung mit den Anzahlen  $n_V$  (Kabelsysteme pro Verbund) und  $n_G$  (Kabelsysteme gesamt) am Unterwerk:

Benötigte Kabelsysteme Variante 1						
	Spur a			Spur b		
	Typ NA2XS2Y 3x...	$n_V$	$n_G$	Typ NA2XS2Y 3x...	$n_V$	$n_G$
<b>ABE 1</b>	...240/25 6/10 kV	3	<b>9</b>	...185/25 6/10 kV	3	<b>9</b>
<b>ABE 2</b>	...240/25 6/10 kV	2	<b>6</b>	...185/25 6/10 kV	3	<b>9</b>
<b>ABE 3</b>	...185/25 6/10 kV	3	<b>9</b>	...240/25 6/10 kV	3	<b>9</b>
<b>ABE 4</b>	...240/25 6/10 kV	3	<b>9</b>	...185/25 6/10 kV	3	<b>9</b>
<b>ABE 5</b>	...240/25 6/10 kV	3	<b>9</b>	...185/25 6/10 kV	4	<b>12</b>

Benötigte Kabelsysteme Variante 2						
	Spur a			Spur b		
	Typ NA2XS2Y 3x...	n <sub>v</sub>	n <sub>G</sub>	Typ NA2XS2Y 3x...	n <sub>v</sub>	n <sub>G</sub>
<b>ABE 1</b>	...240/25 6/10 kV	4	8	...240/25 6/10 kV	3	6
<b>ABE 2</b>	...240/25 6/10 kV	3	6	...185/25 6/10 kV	4	8
<b>ABE 3</b>	...240/25 6/10 kV	3	6	...185/25 6/10 kV	4	8
<b>ABE 4</b>	...240/25 6/10 kV	4	8	...240/25 6/10 kV	4	8
<b>ABE 5</b>	...185/25 6/10 kV	4	8	...185/25 6/10 kV	4	8

Benötigte Kabelsysteme Variante 3						
	Spur a			Spur b		
	Typ NA2XS2Y 3x...	n <sub>v</sub>	n <sub>G</sub>	Typ NA2XS2Y 3x...	n <sub>v</sub>	n <sub>G</sub>
<b>ABE 1</b>	...240/25 6/10 kV	4	4	...240/25 6/10 kV	3	3
<b>ABE 2</b>	...185/25 6/10 kV	4	4	...185/25 6/10 kV	4	4
<b>ABE 3</b>	...185/25 6/10 kV	4	4	...240/25 6/10 kV	3	3
<b>ABE 4</b>	...240/25 6/10 kV	4	4	...240/25 6/10 kV	5	5

Man sieht:

- Bedingt durch die dichte Zugfolge und die häufigen Beschleunigungs- und Bremsvorgänge treten höhere thermische Belastungen auf, als dies von Hochgeschwindigkeitsstrecken her bekannt ist, obwohl die Leistung eher auf niedrigem Niveau liegt (kleine Polradspannung). Dieser systembedingte Nachteil ließe sich nur durch Umkonstruktion der Stator- und Tragsmagnetgeometrie beseitigen, indem die Motorkonstante erhöht wird, was im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht betrachtet wird.
- Durch die großen Ströme werden Kabel mit großen Querschnitten und großen Systemzahlen bis zu 5 benötigt.
- Es kommen ausschließlich die Leiterquerschnitte 185 mm<sup>2</sup> und 240 mm<sup>2</sup> zum Einsatz. Aus Logistik-Gründen könnte man evtl. grundsätzlich nur einen Kabeltyp verwenden (z.B. 240 mm<sup>2</sup>). Aus Kostengründen wird jedoch die oben beschriebene Mischung angesetzt.
- Obwohl das Wechselschrittverfahren der Variante 2 gegenüber dem Dreischrittverfahren der Variante 1 mit einem Verbund weniger auskommt, schlägt sich dies bei der benötigten Gesamt-Kabelsystemzahl nicht immer zu Buche, da die thermische Belastung der einzelnen Systeme aufgrund der fehlenden Speiselücken ansteigt.
- Theoretisch ergeben sich bei Variante 3 gegenüber den anderen Varianten mindestens 50% weniger Kabel dadurch, daß nur ein statt zwei oder drei Verbunde benötigt werden. Da jedoch gleichzeitig ein ABE eingespart wurde, erhöht sich die thermische Belastung in den verbleibenden 4 ABE und die Kabelreduktion erreicht nicht ganz 50% gegenüber Variante 2.
- Liegen andere thermische Verhältnisse vor, so können sich dementsprechend günstigere Kabelauslegungen ergeben. Insbesondere bei Luftverlegung steigt die thermische Belastbarkeit stark an. Die für die Luftverlegung bislang bekannten Konzepte (Betonkanäle oder

Stahltragwerke) sind jedoch so teuer, daß diese Lösung i.allg. nicht wirtschaftlich ist und deshalb nur dort eingesetzt wird, wo unzureichende Platzverhältnisse dies erfordern.

Reduktion der Systemzahlen in Unterwerksferne: Da die exakten Statorabschnittsgrenzen noch nicht vorliegen und da andererseits gerade in Unterwerksferne niedrigere Impedanzen wünschenswert wären, erfolgt zunächst keine Reduktion der Systemzahlen.

## 13 Auslegung Trafoübersetzung

### 13.1 Vorgehensweise

Aus Gründen der Ersatzbeschaffung kann gefordert sein, einheitliche Trafotypen zu verwenden, d.h. es ist die auf die Gesamtstrecke bezogene optimale Übersetzung zu ermitteln.

Die Auswahl der Trafoübersetzung für die Vorab-Auslegung wurde bereits bei der Vorgehensweise zur Auslegung der Unterwerke erläutert. Erreicht die Spannung am Unterwerk eines Antriebsbereiches (ABE) im Verlauf des Fahrspieles häufig den Grenzwert, so bedeutet dies, daß der Statorstrom durch mangelnde Spannung ungewollt begrenzt wird, was zu Fahrzeitverlängerungen durch fehlende Schubkraft führt. In diesem Fall kann man die Trafoübersetzung so lange erhöhen, bis die Gesamtfahrzeit ein Minimum erreicht.

Steht eine zweite oder dritte Übersetzung zur Verfügung, so kann diese gezielt dort eingesetzt werden, wo entsprechend wenig Strom oder aber wenig Spannung zur Verfügung steht.

### 13.2 Ergebnisse

#### Variante 1:

Minimale Fahrzeiten ergeben sich bei einer Trafoübersetzung von 1,1:1 über die gesamte Strecke. Da sich aber zwischen Übersetzungen von 1,0:1 bis 1,2:1 nur ca. 5 Sekunden Fahrzeitunterschied ergeben, wird im Weiteren mit einer Übersetzung von 1,2:1 gerechnet, um evtl. größere Statorabschnittslängen erreichen zu können, zumal die absoluten Fahrzeiten von gut 22 ½ min noch Reserven bieten.

#### Variante 2:

Da nur „halbe“ Standard-Umrichter zum Einsatz kommen, verändern sich die Leistungsdaten gegenüber Variante 1 wie folgt:

	neuer Wert	entspricht
Nennstrom DT	1,2 kA	60%
Nennspannung DT	2,15 kV	100%
Nennstrom TB	1,2 kA	100%
Nennspannung TB	2,15 kV	50%

Dazu kommt, daß jeweils ¼ der verfügbaren Schubkraft außerhalb der Statorabschnittwechsel als Reserve vorgehalten werden muß, um die Beschleunigungseinbrüche entsprechend klein zu halten. Unter Beachtung dieser Randbedingungen ergibt sich, daß die Fahrzeiten gegenüber Variante 1 ansteigen. Bei einer Übersetzung von 1,2:1 über die gesamte Strecke kann die Fahrzeitvorgabe aber gerade noch erfüllt werden. Zur Schaffung von Reserven wird mit 1,6:1 eine zweite Übersetzung vorgesehen, die bei höheren Geschwindigkeiten zum Einsatz kommt. Anlage 13.2-1 und 13.2-2 zeigen die somit erzielbaren Ergebnisse für Strom und Spannung: Die vorhandenen Nennwerte können gut genutzt werden, die Zeitverbesserungen betragen ca. 10 Sekunden. Die Beschleunigungshübe liegen in der erwarteten Größenordnung von 0,2 m/s<sup>2</sup> (Anlage 13.2-3).

#### Variante 3:

Aufgrund der Reihenschaltung beider Statorseiten verdoppelt sich aus elektrischer Sicht die Statorabschnittslänge (SAL). Ein Ansatz mit den SAL der Vorabauslegung kann deshalb nicht

zum Ziel führen, weswegen zunächst eine Halbierung der mechanischen SAL auf 600 m angesetzt wurde.

Die Simulationen zum Teilschrittverfahren (TSV) erfolgten ersatzweise mit Bocksprungverfahren (BSV). Begründung: Da die Statorabschnittswechsel (SAW) des TSV in Sekundenbruchteilen ablaufen sollen, kann man deren Effekte vernachlässigen und es ergibt sich praktisch die gleiche Schubcharakteristik wie im BSV. Die Umschaltungen von Direkttakt- in Trafobetrieb im Kurzschlußverfahren wurden ebenfalls vernachlässigt.

Als günstige Einheitsübersetzung für die Gesamtstrecke erweist sich 1,8:1. Damit wird die Fahrzeitanforderung knapp erfüllt. Da keine stromlosen SAW zur Umschaltung von Trafoübersetzungen vorliegen, wird keine zweite Übersetzung vorgesehen.

Hinweis: Eine Übersetzung von 1,8:1 würde beim Standard-Umrichter die Bemessungsspannung der Betriebsmittel bereits überschreiten. Da jedoch „halbe“ Umrichter mit 2,5 kV Zwischenkreisnennspannung zum Einsatz kommen, beträgt die maximale verkettete Effektivspannung der Umrichter:

$$u_{\max} = 2,5 \text{ kV} \cdot \sqrt{3} \cdot 1,8 = 7,8 \text{ kV}.$$

Dieser Wert liegt deutlich unterhalb des Bemessungswertes von 12 kV. Somit besteht keine Notwendigkeit, Maßnahmen zur Reduktion der benötigten Spannung zu treffen, wie etwa Verwendung von Dreieckschaltungen.

## 14 Auslegung Statorabschnitte

### 14.1 Vorgehensweise

Die Berechnung der Impedanz des Stators kann z.B. in [5] nachgelesen werden. Die Daten der 300-AI-Wicklung sind im Simulationsprogramm hinterlegt.

Solange im Fahrspiel die Spannungsgrenze in einem Statorabschnitt (SA) nicht erreicht wird, kann dieser verlängert werden. Ebenso kann evtl. eine Verlängerung erfolgen, obwohl die Spannung am Grenzwert liegt, wenn der Fahrzeitverlust entsprechend gering bleibt, d.h. die geforderte Fahrzeit trotzdem eingehalten wird.

Enden die SA beider Fahrspuren an der selben Stelle, so lassen sich die beiden Schaltstellen planungstechnisch und aufwandsseitig günstig zusammenfassen. Deshalb werden die Längen auf beiden Spuren identisch projektiert, solange nicht gravierend unterschiedliche Leistungsanforderungen vorliegen, was hier nicht der Fall ist.

Besonderes Augenmerk verlangen die Bereiche, in denen Umschaltungen erfolgen, z.B. vom Direkttakt- in den Trafobetrieb, da sich dort die elektrischen Nennwerte ändern, oder Antriebsbereichsgrenzen (ABG), da sich dort die Zuordnung der Belegungszeit ändert. Deshalb müssen die Statorabschnittsgrenzen in diesen Bereichen sorgfältig projektiert werden:

- Es sollen keine SA-Grenzen in unmittelbarer Nähe von Stationen liegen, da sonst ein Umschalten in den Trafobetrieb nicht rechtzeitig möglich wird und somit zusätzlich noch eine ganze SAL im Direkttakt bewältigt werden muß. Günstig sind Abstände von ca. 300 m bis 800 m, da diese Strecken einerseits lang genug sind, um die nötige Umschaltgeschwindigkeit an SA-Ende zu erreichen und andererseits kurz genug, um die Impedanz klein zu halten.
- Umgekehrt sollten SA-Grenzen in Nähe der ABG liegen, denn die ABG muß mit SA-Grenzen zusammenfallen. Ansonsten ergeben sich ungünstige Belegungszeiten der ABE.

Thermische Begrenzungen werden aufgrund der guten Luftkühlung der Statorwicklung sowie der im Vergleich zu den Streckenkabeln geringen Einschalt Dauern hier vernachlässigt.

### 14.2 Ergebnisse

#### Variante 1:

Die Variante 1 beinhaltet große Leistungsreserven. Aus diesem Grunde kann man es sich leisten, zur Kostenminimierung selbst in Beschleunigungsbereichen sehr große SAL zu wählen. Gibt man die Statorabschnittsgrenzen im Bereich der ABE-Grenzen und der Stationen mit einem Abstand von einigen 100 m vor, so lassen sich die verbleibenden Bereiche mit SAL von ca. 2½ bis 3½ km auffüllen, vgl. Anlage 14.2-1.

#### Variante 2:

Hier bestehen kaum Leistungsreserven. Nachdem eine Festlegung der SA-Grenzen ähnlich wie bei Variante 1 erfolgt ist, müssen die verbleibenden Beschleunigungsbereiche mit möglichst unveränderter SAL von ca. 1,2 km aufgefüllt werden, die Beharrungsbereiche können anschließend mit größeren SAL von ca. 2 km versehen werden vgl. Anlage 14.2-2.

Variante 3:

Da einerseits keine Leistungsreserven bestehen und andererseits Längenänderungen der Teilabschnitte zu neuen steuerungstechnischen Problemen führen, da sich die Impedanz vor und nach dem Teilabschnittswechsel deutlich ändert und somit der Spannungshalter modifiziert werden müßte, wurde auf eine ortsbezogene Optimierung der SAL verzichtet. Durch die kurzen Teil-SA ergeben sich automatisch immer günstige Lagen der SA-Grenzen hinsichtlich ABE-Grenzen und Umschaltungen in den Trafobetrieb.

## 15 Auslegung Energieversorgung

### 15.1 Vorgehen

Aus Gründen der Redundanz sollten mindestens zwei Hochspannungsanlagen vorgesehen werden. Damit ergeben sich folgende Möglichkeiten:

- Redundante Hochspannungsanlage an jedem Unterwerk (Konzept bei Standard-Hochgeschwindigkeitsantrieb)
- Versorgung der zwei oder drei Unterwerke von ein oder mehreren Standorten aus mit gegenseitiger Teilredundanz durch 20 kV Kabelverbindungen.

Letzteres soll bei den optimierten Varianten zum Einsatz kommen. Erste Priorität hat dabei die Reduktion von Standorten, zweite Priorität der Verzicht auf Redundanzen. Dazu ist der Leistungsverlauf jedes Antriebsbereiches (ABE) zu bestimmen und die Summenleistung der Unterwerke auf einzelne Hochspannungsanlagen zu verteilen.

### 15.2 Ergebnisse

#### Variante 1:

Da die Standardauslegung zum Einsatz kommen soll, erhalten alle drei Unterwerke eine redundante Hochspannungsanlage ohne Kabelverbindung.

#### Variante 2:

Da drei Unterwerke vorhanden sind, kann mindestens ein Standort gewählt werden, der keine Hochspannungsanlage erhält. Die Leistungsverläufe einer Hin- und einer Rückfahrt zeigt Anlage 15.2-1: Die einzelnen Leistungsspitzen liegen im Bereich von ca. 10 MW, die tatsächlich erforderliche Übertragungsleistung ergibt sich jedoch durch Überlagerung der Leistungen aller Fahrzeuge im fraglichen Wirkungsbereich des Unterwerkes. Betrachtet man die vorliegende Konfiguration (siehe Kap. 11.2), so ergibt sich folgendes Bild:

- Der Übertragungsweg zwischen Unterwerk (UW) Nr. 1 (km 6) und UW 2 (km 25,2) beträgt ca. 19 km, der Übertragungsweg zwischen UW 2 und UW 3 (km 38) beträgt ca. 13 km.
- Die UW 1 und 3 versorgen jeweils 4 ABE, d.h. bis zu 4 Fahrzeuge, das UW 3 nur 2.
- UW 1 (Anlagen 15.2-2): In Zeitabschnitten, in denen sich nur 2 Fahrzeuge im Wirkungsbereich der UW befinden, betragen die Leistungsspitzen zwischen 10 und 15 MW. Wenn weitere zwei Fahrzeuge einfahren, erhöht sich die Spitzenleistung bis auf knapp 30 MW.
- UW 2 (Anlagen 15.2-3): Auch hier befinden sich zeitweise vier Fahrzeuge im UW-Bereich. Die Spitzen liegen zwischen 20 und 25 MVA.
- UW 3 (Anlagen 15.2-4): Fahrplanmäßig werden immer nur 2 Fahrzeuge gleichzeitig betrieben. Deshalb beträgt die Spitzenleistung nur ca. 10 MW.

Betrachtet man gleichzeitig die mögliche Übertragungsleistung eines 20 kV-Kabelsystems (Anlage 8.9-1), so bietet sich folgendes Konzept an:

- UW 3 benötigt *keine* Hochspannungsanlage sondern wird vom UW 2 aus mitversorgt. Da nur bis zu 2 Fahrzeuge gleichzeitig zu betreiben sind, genügt aus elektrotechnischer Sicht eine

einfache Kabelverbindung, die jedoch aus Redundanzgründen zweifach aufgebaut werden sollte.

- UW 2 erhält eine redundante Hochspannungsanlage, damit auch UW 3 stets redundant versorgt werden kann.
- UW 1 benötigt selbst eine hohe Leistung (für bis zu 4 Fahrzeuge), so daß auch im Hinblick auf die relativ große Entfernung zum UW 2 eine Kabelverbindung als einzige Einspeisequelle aus thermischen und energetischen Gründen keine gute Lösung darstellt. Es erscheint jedoch sinnvoll, das UW 1 nur mit einer einfachen Hochspannungsanlage auszurüsten und als Redundanz eine einfache 20 kV-Kabelverbindung zum UW 2 herzustellen. Diese kann zwar nicht die volle benötigte Leistung bereitstellen, ermöglicht jedoch einen Betrieb mit reduzierter Leistung, ähnlich einem Ausfall von Umrichtern.

#### Variante 3:

Es existieren nur 2 Unterwerke. Die Leistungsverläufe der Fahrten in beide Richtungen zeigt Anlage 15.2-5. Die Spitzen liegen etwas niedriger als bei Variante 2. Dennoch folgt in Analogie zu Variante 2 unmittelbar, daß beide UW eine nicht redundante Hochspannungsanlage erhalten, mit einer Kabelverbindung als gegenseitige Teilredundanz. Begründung:

- Ein UW speist die meiste Zeit 4 Fahrzeuge gleichzeitig. Für eine Anbindung über Kabel bedeutet dies eine sehr hohe thermische und energetisch ungünstige Belastung, deshalb erhält jedes UW seine eigene Hochspannungsanlage.
- Im Fehlerfall genügt die Kabelverbindung zur Aufrechterhaltung eines leistungsreduzierten Betriebes.

## 16 Nachoptimierungen

Die vorangegangenen Kapitel beschreiben Optimierungsvorgänge einzelner Komponenten, die weitgehend unabhängig voneinander abgelaufen sind. Da jedoch Änderungen einzelner Komponenten des Langstatorantriebes stets Rückwirkungen auf andere Komponenten verursachen, muß abschließend nochmals überprüft werden, inwieweit die einzelnen Optimierungsvorgänge Nachoptimierungen erforderlich machen.

### 16.1 Variante 1

Unterwerke: Die Auslegungen führen zu Veränderungen des Beschleunigungsverhaltens und damit der Fahrzeiten in den einzelnen Antriebsbereiche (ABE). Aus diesem Grunde empfiehlt sich eine erneute Überprüfung der gewählten Antriebsbereichsgrenzen (ABG). Dazu müssen die folgenden Randbedingungen berücksichtigt werden:

- Im Gegensatz zur erreichbaren Fahrzeit der Auslegung soll die Fahrzeit im Betrieb ca. 25 min betragen. An dieser Stelle wird dies dadurch verwirklicht, daß die Höchstgeschwindigkeit auf 150 km/h zurückgenommen wird, vgl. Kapitel 17.2.
- Die Bilde- und Räumzeiten werden nun in Abhängigkeit von den örtlichen Geschwindigkeiten gemäß Anlage 8.3-1 mit berücksichtigt. Dazu wird unterstellt, daß sich die Betriebshalteplätze in einer Entfernung von 300 m vom Gefahrenpunkt – d.h. der ABG – befinden, oder in einer nahegelegenen Station. Der Versatz an den Bereichsgrenzen soll 0 betragen, um keine zusätzlichen Belegungszeiten zu erzeugen.

Ergebnis: die ABG sollten etwas verschoben werden, damit nicht unnötig große Bildezeiten auftreten und damit eine Angleichung der einzelnen Belegungszeiten erreicht wird; neue Grenzen:

1. km 0 (Streckenbeginn)
2. km 0,3 (Überleitung)
3. km 6,0 (Standort UW 1)
4. km 15,8 (kein Unterwerk)
5. km 23,2 (Standort UW 2)
6. km 30,8 (kein Unterwerk)
7. km 37,7 (Überleitung)
8. km 38 (Streckenende, Standort UW 3)

Streckenkabel: Die Statorabschnittslängen wurden deutlich erhöht, was aufgrund der höheren Impedanz zu Beschränkungen der einsetzbaren Spitzenleistungen führt. Dies kann positive Auswirkungen auf die thermische Belastung der Kabel haben. Außerdem liegen nach Festlegung der Zuordnung der einzelnen Statorabschnitte die tatsächlichen Belastungen der drei Speisesysteme vor, so daß sich eine erneute Überprüfung lohnt. Dabei tritt ein unerwarteter Vorteil zu Tage:

- Geht man davon aus, daß Statorabschnitte (SA), die „direkt“ am Unterwerk beginnen, auch „direkt“ – d.h. mit einer kleinen Kabellänge vom Unterwerk zur Schaltstelle (Ansatz: 100 m) – eingespeist werden, so geht die Belastung dieser SA nicht in die übrigen Streckenkabel ein. Da

die SA meist sehr lang sind, betrifft dies große Streckenbereiche. Im Endeffekt ergeben sich so kurze, stark belastete und längere, weniger stark belastete Kabelabschnitte.

- Legt man desweiteren zu Grunde, daß die Kabeltrasse nur bis an das in Unterwerksrichtung liegende Ende des jeweils letzten SA des ABE herangeführt werden muß, so erhält man große Streckenbereiche, in denen überhaupt keine Streckenkabel zu verlegen sind.

Allerdings müssen die „Rangier“-Umrichter für den Streckenanfang zusätzliche Kabelzuleitungen zum UW 1 erhalten.

Anlage 16.1-1 zeigt die nunmehr vorliegenden Stromverläufe bewispielhaft für Spur a. Eine erneute Auswertung in Analogie zu Kap. 12 führt zu folgendem Ergebnis, wenn die vorliegenden Effektivströme mit 15% beaufschlagt und die tatsächlich benötigten Längen und Belastungen wie oben beschrieben angesetzt werden:

Spur a	Verbund 1				Verbund 2				Verbund 3				Σ 185	Σ 240
	ieff/kA	mm <sup>2</sup>	n	km	ieff/kA	mm <sup>2</sup>	n	km	ieff/kA	mm <sup>2</sup>	n	km	km	km
ABE "0"	391	240	2	5,8	391	240	2	5,8	0			0	0	25,52
ABE 1	599	240	3	3,3				0	609	240	3	3,6	0	22,77
	0			0	316	185	2	0,1	679	185	4	0,1	0,66	0
ABE 2	312	185	2	0,1	312	185	2	0,1	0			0	0,44	0
	234	240	1	3,2	223	240	1	6,7	354	185	2	7	15,4	10,89
ABE 3	651	240	3	5,9	581	240	3	5,5	295	185	2	2,5	5,5	37,62
	0			0	585	240	3	0,1	301	185	2	0,1	0,22	0,33
ABE 4	712	240	4	0,1	607	240	3	0,1	0			0	0	0,77
	396	240	2	2,8	131	185	1	5,1	422	240	2	5,5	5,61	18,26
ABE 5	653	240	3	4,7	363	185	2	1,5	582	240	3	2,5	3,3	23,76
	0			0	537	185	3	0,1	716	240	4	0,1	0,33	0,44
ABE "6"	332	185	2	0,1	332	185	2	0,1	0			0	0,44	0
Spur b	Verbund 1				Verbund 2				Verbund 3				Σ 185	Σ 240
	ieff/kA	mm <sup>2</sup>	n	km	ieff/kA	mm <sup>2</sup>	n	km	ieff/kA	mm <sup>2</sup>	n	km	km	km
ABE "0"	333	185	2	5,8	333	185	2	5,8	0			0	25,52	0
ABE 1	595	240	3	3,3	0			0	617	240	3	3,6	0	22,77
	0			0	241	240	1	0,1	649	240	3	0,1	0	0,44
ABE 2	315	185	2	0,1	363	185	2	0,1	0			0	0,44	0
	227	240	1	3,2	287	185	2	6,7	384	185	2	7	30,14	3,52
ABE 3	617	240	3	5,9	599	240	3	5,5	214	185	1	2,5	2,75	37,62
	0			0	654	240	3	0,1	362	240	3	0,1	0	0,66
ABE 4	651	240	3	0,1	586	240	3	0,1	0			0	0	0,66
	309	185	2	2,8	125	185	1	5,1	386	185	2	5,5	23,87	0
ABE 5	711	240	4	4,7	392	240	2	1,5	594	240	3	2,5	0	32,23
	0			0	564	185	3	0,1	689	185	4	0,1	0,77	0
ABE "6"	390	240	2	0,1	390	240	2	0,1	0			0	0	0,44
<b>Summe</b>													<b>115,39</b>	<b>238,7</b>

Die Gesamtsummen der Kabelkilometer beinhalten einen Verlegefaktor von 110%. Man sieht:

- Aufgrund der sehr großen Statorabschnittslängen (SAL) ergeben sich stark unterschiedliche Belastungen der drei Verbunde eines ABE, nämlich abhängig davon, wie viele Statoren eines Verbundes sich im ABE befinden und an welchen Orten (Beschleunigungs- oder Beharrungsbereiche). Dies rechtfertigt die oben durchgeführte separate Auslegung für jeden Verbund.
- Die Längen der einzelnen Kabelverbunde sind ebenfalls unterschiedlich, nämlich abhängig davon, ob der ABE mit einem Stator des fraglichen Verbundes endet – dann erstrecken sich die Kabel über den ABE abzüglich der Länge des letzten SA – oder nicht (dann ist der zu verkabelnde Bereich noch kürzer).

Insgesamt ergibt sich durch die Nachoptimierung nochmals eine deutliche Reduktion der Kabelkilometer in Summe.

#### Trafoübersetzung:

Die Trafoübersetzung hat bei der ersten Optimierung nur einen relativ geringen Einfluß auf die Leistungsfähigkeit ausgeübt. Da jedoch mit der nachoptimierten Kabelauslegung die Impedanzen verändert wurden, empfiehlt sich trotzdem eine Überprüfung der Übersetzung.

Ergebnis: Aufgrund der höheren Impedanz verschiebt sich das Optimum der Trafoübersetzung deutlich nach oben. Wie in Kap. 8.1.1 gezeigt, läßt sich die maximal zulässige Übersetzung aus der Zwischenkreisspannung (5 kV) und der Bemessungsspannung der Betriebsmittel bestimmen. Da die streckenseitigen Komponenten mit 12 kV Nennspannung (effektiv verkettet) angesetzt wurden, ergibt sich:

$$\ddot{u}_{\max} = \frac{12 \text{ kV}}{\sqrt{3} \cdot 5 \text{ kV}} = 1,38$$

Um die thermische Auslegung nicht nochmals deutlich zu verändern, was zudem aus Gründen der Fahrdynamik nicht erforderlich wäre, wird auf die volle Nutzung dieser Übersetzung verzichtet und statt dessen eine Übersetzung von 1,3:1 eingestellt.

#### Statorabschnittslängen (SAL):

Die SAL müssen an die veränderten ABG angepaßt werden. Andere Veränderungen sind praktisch ohnehin nicht möglich, da die großen Längen eine verfeinerte Längenabstufung nicht mehr zulassen, denn die ABE beinhalten z.T. nur aus 3 Statorabschnitten (SA), d.h. durch Hinzufügen oder Weglassen von SA ergeben sich sofort drastisch veränderte Längen.

#### Energieversorgung:

Die Nachoptimierungen beeinflussen das Konzept nicht.

#### Schlußbetrachtung:

Das Ergebnis der Auslegung zeigt Anlage 16.1-2. Die erzielbaren Nennwerte der Umrichter über der Frequenz zeigt Anlage 16.1-3.

## 16.2 Variante 2

### Unterwerke:

Aufgrund der durch die Stationen gegebenen Antriebsbereichsgrenzen kann praktisch keine Nachoptimierung erfolgen, mit Ausnahme der Grenze bei km 6. Dort zeigt sich, daß sich eine Vorverlegung günstig auswirkt. Im Weiteren wird die Grenze auf km 5 gelegt.

### Streckenkelabel:

Zwar haben sich die SAL im Gegensatz zur Variante 1 nur geringfügig verändert, dafür nimmt aber die Halbierung der Umrichterleistung Einfluß auf die Stromverläufe. Deshalb erfolgt auch hier eine Nachoptimierung der Kabelauslegung. Ergebnisse:

Spur a	Verbund 1				Verbund 2				$\Sigma$ 185	$\Sigma$ 240
	ieff/kA	mm <sup>2</sup>	n	km	ieff/kA	mm <sup>2</sup>	n	km	km	km
ABE 1	755	240	4	4,1	745	240	4	3,8	0	34,76
ABE 2	516	185	3	11	507	185	3	11,3	73,59	0
ABE 3	674	185	4	8,3	674	185	4	8	71,72	0
ABE 4	715	240	4	8,2	715	240	4	8,8	0	74,8
ABE 5	652	240	3	3,8	652	240	3	4,4	0	27,06
Spur b	Verbund 1				Verbund 2				$\Sigma$ 185	$\Sigma$ 240
	ieff/kA	mm <sup>2</sup>	n	km	ieff/kA	mm <sup>2</sup>	n	km	km	km
ABE 1	690	185	4	4,1	692	185	4	3,8	34,76	0
ABE 2	573	185	3	11	569	185	3	11,3	73,59	0
ABE 3	686	185	4	8,3	686	185	4	8	71,72	0
ABE 4	708	185	4	8,2	708	185	4	8,8	74,8	0
ABE 5	657	240	3	3,8	657	240	3	4,4	0	27,06
<b>Summe</b>									<b>400,18</b>	<b>163,7</b>

Man sieht:

- Im Gegensatz zu Variante 1 ergeben sich nur relativ kleine Unterschiede zwischen den einzelnen Verbunden oder auch den ABE. Dies liegt daran, daß die ABE-Grenzen meist mit Stationen zusammenfallen und somit eine gleichmäßige Verteilung der Lasten erfolgt, nämlich annähernd gleiche Abschnittslängen der Verbunde (rechter Stator, linker Stator) und annähernd symmetrische Stromverteilungen (Bremsströme im ABE vor der Station, Antriebsströme im ABE nach der Station). Deshalb lohnt sich auch der Versuch einer weitere Unterteilung der Kabel in vermeintlich schwach belastete Abschnitte zur Einsparung von Systemen nicht.
- Der Einsatz des Wechselschrittverfahrens anstelle des Dreischrittverfahrens sowie die Reduktion der installierten Leistung schlägt sich hier nicht in einer deutlichen Kabelreduktion nieder. Gründe: Die langen Statorabschnitte der Variante 1 führen zu erheblichen Einsparungen an Kabelmengen, die hier nicht wirksam werden. Obwohl die Leistungsspitzen gegenüber Variante 1 zurückgehen, wirkt sich dies nur teilweise auf die effektive thermische Belastung aus, da die Beschleunigungsvorgänge dementsprechend länger dauern.

Trafoübersetzung, Statorabschnittslängen:

Da sich die Kabelauslegung nur unwesentlich verändert hat, wird auf weitere Nachoptimierungen verzichtet.

Energieversorgung:

Aufgrund der größer gewordenen Entfernung zwischen den Unterwerken (UW) 1 und 2 ergeben sich nun günstigere Kosten bei Aufbau einer redundanten Hochspannungsanlage im UW 1 statt einer Kabelverbindung.

Schlußbetrachtung:

Das Ergebnis der Auslegung zeigt Anlage 16.2-1. Die erzielbaren Nennwerte der Umrichter über der Frequenz zeigt Anlage 16.2-2.

### 16.3 Variante 3

Unterwerke:

Keine Änderung.

Strecken-kabel:

Wie bei Variante 2 sind auch hier evtl. Änderungen durch die reduzierte installierte Leistung zu erwarten. Eine erneute Auslegung ergibt:

Spur a	Verbund 1				$\Sigma$ 185	$\Sigma$ 240
	ieff/kA	mm <sup>2</sup>	n	km	km	km
ABE 1	747	185	4	8,8	38,72	0
ABE 2	660	240	3	9,8	0	32,34
ABE 3	685	240	3	10,8	0	35,64
ABE 4	768	185	4	7,8	34,32	0
Spur b	Verbund 1				$\Sigma$ 185	$\Sigma$ 240
	ieff/kA	mm <sup>2</sup>	n	km	km	km
ABE 1	707	240	3	8,8	0	29,04
ABE 2	668	240	3	9,8	0	32,34
ABE 3	676	240	3	10,8	0	35,64
ABE 4	803	240	4	7,8	0	34,32
<b>Summe</b>					<b>73,04</b>	<b>199,3</b>

Man sieht:

- Die Belastungen sind relativ gut ausgeglichen, allerdings auf hohem Niveau, da die ABE etwas länger sind.
- Die Kabelmengen konnten gegenüber der ersten Optimierung noch etwas reduziert werden.
- Absolut gesehen kommt diese Variante mit den geringsten Kabelkilometern aus.

Trafoübersetzung/Statorabschnittslängen:

Die Variante 3 erfüllt die Fahrzeitanforderungen nur sehr knapp. Eine erneute Überprüfung der Trafoübersetzung ergab, daß mit 1,8:1 nach wie vor der optimale Wert vorliegt. Auf eine weitere Reduktion der Statorabschnittslänge (SAL) wird jedoch, da die Teilstatorabschnitte mit einer Länge von 300 m bereits extrem kleine Werte aufweisen. Eine Verlängerung der SA würde hingegen dazu führen, daß die geforderte Fahrzeit nicht mehr eingehalten werden kann.

Energieversorgung:

Da sich die Kabelauslegung nur unwesentlich verändert hat, wird auf weitere Nachoptimierungen verzichtet.

Schlußbetrachtung:

Das Ergebnis der Auslegung zeigt Anlage 16.3-1. Die erzielbaren Nennwerte der Umrichter über der Frequenz zeigt Anlage 16.3-2.

## 17 Fahrspielergebnisse

Auf Basis der endgültigen Auslegungen erfolgten nochmals Fahrspiele zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit der einzelnen Varianten nach verschiedenen Gesichtspunkten:

### 17.1 Mindestfahrzeit

Die Mindestfahrzeit wird durch die Auslegung sichergestellt und gibt letztlich an, welche betriebliche Reserven das System hinsichtlich des Aufholens von Verspätungen bereitstellt. Dazu erfolgten die Simulationen unter Einsatz der gesamten verfügbaren Leistung. Im Gegensatz zur Auslegung, wo die Maschine im Kippunkt betrieben wird, wurde hier auch noch der Schwenkwinkel auf maximalen Schub eingestellt. Begründung:

Die Schubreserve durch Schwenkwinkeloptimierung kann normalerweise zum Ausgleich von erschwerten Betriebsbedingungen wie starker Gegenwind oder Leistungsverlusten dienen und bedeutet eine Verschlechterung des Wirkungsgrades und damit erhöhte Energiekosten. Deshalb wurde sie bei der Auslegung nicht berücksichtigt. Da jedoch betriebliche Verspätungen u.U. mit höchster Priorität abzubauen sind, werden diese Reserven ggf. auch hier zum Einsatz kommen, ohne Rücksicht auf den Energiebedarf. Dann ergeben sich:

	Variante 1	Variante 2	Variante 3
<b>Spur 1</b>	23,2 min	23,7 min	23,6 min
<b>Spur 2</b>	23,5 min	23,8 min	23,7 min
<b>Summe</b>	46,7 min	47,5 min	47,3 min
<b>Umlaufreserve</b>	3,3 min	2,5 min	2,7 min

Obwohl im Rahmen der Auslegung versucht wurde, die drei Varianten leistungsmäßig im Sinne einer besseren Vergleichbarkeit anzugleichen, erreicht Variante 1 um ca. ½ min kleinere Fahrzeiten, was jedoch angesichts der sehr hohen installierten Leistung nicht verwundern darf. Entsprechend hoch fällt die Zeitereserve aus, die sich bei Hin- und Rückfahrt allein durch die technisch mögliche Fahrzeit ergibt. Die Varianten 2 und 3 sind diesbezüglich etwa gleichwertig und erfüllen die Anforderung. Grafische Darstellungen zeigen die Anlagen 17.1-1 und 17.1-2.

### 17.2 Energiebedarf

Zur Ermittlung des Energiebedarfs muß man zunächst die Fahrzeiten auf die fahrplanmäßigen 25 min einstellen. Hierfür bestehen mehrere Möglichkeiten:

- Erhöhung der Haltezeiten: Dies schafft zusätzlich betriebliche Reserven, bringt jedoch keine Einsparungen beim Energiebedarf.
- Erniedrigung der Maximalgeschwindigkeit: Da der Leistungs- und damit Energiebedarf mit der Geschwindigkeit zunimmt, führt dieser Weg zu Energieeinsparungen. Im Vorliegenden Fall bietet es sich insbesondere an, auf die kurze Zwischenbeschleunigung auf 220 km/h bei km 9 zu verzichten.
- Regelungstechnische Begrenzung des Maximalstromes: Mit zurückgehendem Strom sinkt auch die Schubkraft und die Fahrzeit erhöht sich. Da die Verluste mit dem Stromquadrat eingehen, verspricht diese Methode eine Wirkungsgradverbesserung und somit eine Energieeinsparung.



Spur 2	von	bis	von	bis				
BLD	km	km	min	min	Fahrzeit	Bilzeit	Räumzeit	Belegung
6	38,0	37,7	0,0	0,4	0,4 min	0,2 min	0,4 min	1,0 min
5	37,7	30,8	0,4	5,6	5,2 min	0,3 min	0,4 min	5,9 min
4	30,8	23,2	5,6	10,7	5,1 min	1,0 min	0,4 min	6,5 min
3	23,2	15,8	10,7	15,6	4,9 min	0,9 min	0,4 min	6,2 min
2	15,8	6,0	15,6	19,7	4,1 min	1,0 min	0,4 min	5,5 min
1	6,0	0,3	19,7	24,2	4,5 min	1,0 min	0,5 min	6,0 min
0	0,3	0,0	24,2	24,9	0,7 min	1,0 min	0,4 min	2,1 min
<b>Maximum</b>					<b>6,5 min</b>			

Man sieht, daß die Bilde- und Räumzeiten die Belegung gegenüber der Fahrzeit nochmals deutlich erhöhen. Obwohl die Antriebsbereichsgrenzen etwas weiter von den Stationen entfernt wurden, um die Wege mit kleiner Geschwindigkeit und damit die Bilzeiten für Spur 1 zu minimieren, kann die geforderte Maximalbelegungszeit von 6,5 min insbesondere auf Spur 1 nur knapp erreicht werden.

Für den Fahrplan werden 8 Fahrzeuge im Umlauf benötigt.

Variante 2:

Da die Haltezeit nicht mehr in die Belegung eingeht, ergeben sich günstigere minimale Taktzeiten. Die Auswertung des Bildfahrplanes (Anlage 17.3-2) ergibt:

Spur 1	von	bis	von	bis				
BLD	km	km	min	min	Fahrzeit	Bilzeit	Räumzeit	Belegung
1	0,0	5,0	0,0	4,7	4,7 min	0,2 min	0,4 min	5,3 min
2	5,0	16,5	4,7	9,7	5,0 min	1,0 min	0,4 min	6,4 min
3	16,5	25,2	10,7	15,3	4,6 min	0,2 min	0,4 min	5,2 min
4	25,2	34,0	16,3	21,0	4,7 min	0,2 min	0,4 min	5,3 min
5	34,0	38,0	22,0	24,7	2,7 min	0,2 min	0,4 min	3,3 min
<b>Maximum</b>					<b>6,4 min</b>			

Spur 2	von	bis	von	bis				
BLD	km	km	min	min	Fahrzeit	Bilzeit	Räumzeit	Belegung
5	38,0	34,0	0,0	2,7	2,7 min	0,2 min	0,4 min	3,3 min
4	34,0	25,2	3,7	8,4	4,7 min	0,2 min	0,4 min	5,3 min
3	25,2	16,5	9,4	14,0	4,6 min	0,2 min	0,4 min	5,2 min
2	16,5	5,0	15,0	20,2	5,2 min	0,2 min	0,4 min	5,8 min
1	5,0	0,0	20,2	24,8	4,6 min	1,0 min	0,4 min	6,0 min
<b>Maximum</b>					<b>6,0 min</b>			

Der minimal mögliche Takt hat sich somit gegenüber Variante 1 etwas verbessert, insbesondere auf Spur 2.

Variante 3:

Da die BLD-Grenzen hier nach Belieben anders gelegt werden als die Antriebsbereichsgrenzen, muß man zwischen zwei unterschiedlichen Belegungen unterscheiden, nämlich

- BLD-Belegungen (wie bisher auch) und
- ABE-Belegungen ohne Beachtung der BLD.

Aus diesem Grunde erfolgten zwei unterschiedliche Auswertungen gemäß Anlage 17.3-3 (BLD-Belegungen) und Anlage 17.3-4 (ABE-Belegungen ohne BLD):

Spur 1 ABE	von km	bis km	von min	bis min	Fahrzeit	Bilzeit	Räumzeit	Belegung
1	0,0	9,0	0,0	6,3	6,3 min	0,0 min	0,1 min	6,4 min
2	9,0	19,0	6,3	12,4	6,1 min	0,0 min	0,1 min	6,2 min
3	19,0	29,5	12,4	18,7	6,3 min	0,0 min	0,1 min	6,4 min
4	29,5	38,0	18,7	24,8	6,1 min	0,0 min	0,1 min	6,2 min
<b>Maximum</b>								<b>6,4 min</b>

Spur 2 ABE	von km	bis km	von min	bis min	Fahrzeit	Bilzeit	Räumzeit	Belegung
4	38,0	29,5	0,0	6,3	6,3 min	0,0 min	0,1 min	6,4 min
3	29,5	19,0	6,3	12,6	6,3 min	0,0 min	0,1 min	6,4 min
2	19,0	9,0	12,6	18,7	6,1 min	0,0 min	0,1 min	6,2 min
1	9,0	0,0	18,7	24,8	6,1 min	0,0 min	0,1 min	6,2 min
<b>Maximum</b>								<b>6,4 min</b>

Spur 1 BLD	von km	bis km	von min	bis min	Fahrzeit	Bilzeit	Räumzeit	Belegung
1	0,0	5,0	0,0	4,8	4,8 min	0,2 min	0,4 min	5,4 min
2	5,0	16,5	4,8	9,7	4,9 min	1,0 min	0,4 min	6,3 min
3	16,5	25,2	10,7	15,4	4,7 min	0,2 min	0,4 min	5,3 min
4	25,2	34,0	16,4	21,0	4,6 min	0,2 min	0,4 min	5,2 min
5	34,0	38,0	22,0	24,8	2,8 min	0,2 min	0,4 min	3,4 min
<b>Maximum</b>								<b>6,3 min</b>

Spur 2 BLD	von km	bis km	von min	bis min	Fahrzeit	Bilzeit	Räumzeit	Belegung
5	38,0	34,0	0,0	2,8	2,8 min	0,2 min	0,4 min	3,4 min
4	34,0	25,2	3,8	8,5	4,7 min	0,2 min	0,4 min	5,3 min
3	25,2	16,5	9,5	14,1	4,6 min	0,2 min	0,4 min	5,2 min
2	16,5	5,0	15,1	20,3	5,2 min	0,2 min	0,4 min	5,8 min
1	5,0	0,0	20,3	24,8	4,5 min	1,0 min	0,4 min	5,9 min
<b>Maximum</b>								<b>5,9 min</b>

Für die reine Antriebsbelegung (ABE 1 bis 4) wurden pauschal 0,1 min Räumzeit zur Abdeckung von Überlappungen angesetzt. Bei der typischen Geschwindigkeit von 150 km/h entspricht dies einer Länge von ca. 250 m. Damit läßt sich die gewünschte Taktzeit leicht erreichen.

Die BLD-Grenzen wurden wie bei Variante 2 gewählt, d.h. ebenfalls mit Eliminierung der Belegung durch die Haltezeiten an Stationen. Auch die Belegung der BLD (1 bis 5) ermöglicht die gewünschten Taktzeiten von 6,5 min.

## 18 Kostenvergleich

### 18.1 Festlegung der Einheitskosten

Die Kosten industrieller Güter hängen von vielen Faktoren ab, wie Material- und Lohnkosten am Fertigungsort, geordneten Stückzahlen, Marktsituation, Vertriebspolitik etc. Aus diesen Gründen versucht dieses Werk erst gar nicht, exakte Preise für verschiedene Antriebsvarianten anzugeben. Statt dessen wird versucht, mit Hilfe von veröffentlichten Einheitskosten des Projektes Berlin-Hamburg [9] beispielhaft Größenordnungen zu definieren, in denen sich die Kosten voraussichtlich bewegen. Zum Aufzeigen von Tendenzen und zur Beurteilung der Wirksamkeit von Optimierungsmaßnahmen reicht dies aus. Die Angaben lagen damals noch in DM vor und wurden grob auf Euro umgerechnet.

Angaben zu einzelnen Komponenten ergeben sich aus groben Hochrechnungen und werden mit einer Genauigkeit von 2 Stellen verwendet:

- *Umrichter*: [9] enthält keine Angaben zu Umrickerkosten  $K_{UR}$ . Statt dessen sind für alle Unterwerke Komplettpreise für die Antriebsblöcke (incl. Gebäude) angegeben. Einen guten Anhaltswert für einen Umricker-Komplettpreis erhält man somit unter Vernachlässigung zentraler Antriebsregelungs/-Steuerungs (ARS) –Komponenten durch Division aller Unterwerks-Antriebsblöcke durch die Gesamtzahl der Strecken-Umrichter:

$$K_{UR} = \frac{233 \text{ Mio } \text{€}}{54 \text{ Umrichter}} = 4,3 \text{ Mio } \text{€} / \text{Umrichter}$$

Diese beinhalten keine Einrichtungen zur Energierückspeisung. Da dies aber gerade auf kurzen Strecken mit vielen Bremsvorgängen von politischer Bedeutung ist, wird unterstellt, daß diese benötigt werden. Mit diesen Einrichtungen wird der Umricker-Preis incl. Gebäudeanteil, Schaltanlagen, Kühlanlagen, Steuerung, Montage etc. mit 5 Mio. € angesetzt.

- *Schaltstellen*: Nach [9] beträgt der Komplettpreis einer Schaltstelle im Mittel 0,23 Mio. €. Diese beinhaltet 6 Mittelspannungsfelder, Schutz und Steuereinrichtungen sowie Eigenbedarfseinrichtungen. Für das TSV gemäß Anlage 8.7-4 benötigt man bereits 6 Felder pro Fahrspur, d.h. die Schaltstellen für beide Fahrspuren werden doppelt so groß. Konservativ werden hierfür auch die doppelten Kosten angesetzt.
- *Strecken-kabel*: Bei Streckenkabeln bestehen besonders große Preisschwankungen je nach Marktsituation und Fertigungslängen sowie in Abhängigkeit von den Montageverhältnissen. Insbesondere in städtischen Bereichen sind andere Kabelwege, Wasser- und Gasleitungen, Straßen etc. zu kreuzen, die Montagebereiche sind beengt u.s.w. Ohne konkrete Vorort-Untersuchungen und Angebote kann deshalb nur ein spekulativer Kostenansatz erfolgen. Dieser wird hier wie folgt festgelegt:

Auf die Kabelhohlpreise werde ein Mengenrabatt von 30% auf die Listenpreise für Bestellmengen ab 1000 m bei „ungängigen Typen“ nach [11] gewährt.

Der Cu-Preis betrage 175 €/100 kg, der Alu-Preis 145 €/kg. Für jeden Kabeltyp errechnet sich daraus der Metallpreis über die Leiter- und Schirmquerschnitte.

Die Verlegekosten betragen nach [9] im Mittel 0,48 Mio. €/km für 8 bis 12 Systeme Antriebskabel und je ein System Stator-, Energie- und Eigenbedarfskabel. Im Mittel ergeben

sich daraus in etwa 40 T€/Systemkilometer. In erster Näherung erfolgt keine Unterscheidung nach dem Kabeltyp.

Ergebnisse:

<b>angesetzte Kabel-Systempreise in T€ / km</b>				
Typ	Hohlpreis	Metallpreis	Verlegepreis	Gesamtpreis
NA2XS2Y 3x120/16 6/10 kV	14,3	1,9	40	<b>56</b>
NA2XS2Y 3x150/16 6/10 kV	15,7	2,4	40	<b>58</b>
NA2XS2Y 3x185/25 6/10 kV	17,8	2,8	40	<b>61</b>
NA2XS2Y 3x240/25 6/10 kV	19,9	3,5	40	<b>63</b>
N2XS2Y 1x300/25 12/20 kV	36,1	5,5	40	<b>82</b>
N2XS2Y 1x400/25 12/20 kV	42,5	7,4	40	<b>90</b>
N2XS2Y 1x500/25 12/20 kV	43,9	9,1	40	<b>93</b>

- *Umrichter halber Leistung*: In erster Näherung erfolgt eine Halbierung der benötigten Hardware, insbesondere bei der teureren Leistungselektronik. Da aber andererseits andere Teile wie Steuerung oder Trafos nicht proportional verbilligt werden können, wird hier als Ansatz eine Gesamtkosteneinsparung von 33% zugrunde gelegt.
- *Redundanz-Schaltanlage/Umschaltanlagen*: Zur Schaltung eines Reserve-Umrichters auf einen der vier ABL benötigt man eine Schaltanlage. Diese beinhaltet vergleichbare Komponenten wie eine Schaltstelle und wird deshalb mit 0,23 Mio. € veranschlagt. Das Gleiche gilt für andere Umschaltanlagen wie z.B. an den Überleitstellen.

Die Antriebsauslegung wirkt sich unmittelbar auf die Kosten verschiedener Komponenten anderer Subsysteme aus. Deshalb müssen diese in den Kostenvergleich einfließen:

- *Betriebsleittechnik-Dezentrale*: Gemäß [9] 4,3 Mio. € für Leittechnik Unterwerk, d.h. im wesentlichen für 2 BLD. Daraus ergeben sich 2,2 Mio. € pro BLD.
- *Hochspannungsanlage*: Die Kosten der Hochspannungsanlage sind bei Verwendung standardisierter Einheitstypen weitgehend leistungsunabhängig und werden gemäß [9] mit 48 Mio. € für 12 doppelte Anlagen = 2,0 Mio. € pro Anlage angesetzt.
- *Energieversorgung Strecke*: Die Einrichtungen entlang der Strecke wie Stromschienen, Schaltstellen, Funkmaste, Weichen etc. müssen mit Energie versorgt werden. Nach [9] geschieht dies über Trafostationen, wobei der Typ 1 ausschließlich Schaltstellen und Funkmaste versorgt. Ansatz: Aus Redundanzgründen werden 2 Trafostationen pro ABE (z.B. getrennt nach rechtem und linkem Stator) vom Typ 1 mit einem Preis von 0,28 Mio. € benötigt, die insgesamt 5 Schaltstellen versorgen können. Ansatz für die Teuerung für mehr Schaltstellen:  $(\text{Zahl Schaltstellen} / 5)^{0,75}$ .
- *Energieversorgung Unterwerk*: Jedes Unterwerk benötigt Einrichtungen zur Versorgung der Umrichter (Trafos, Schaltanlagen, USV-Anlagen, Niederspannungsverteilung etc.). Nach [9] betragen die Kosten pro Rangier-Unterwerk (2 Umrichter) 3,22 Mio. € und für ein Strecken-Unterwerk (5 Umrichter) 4,31 Mio. €. Dementsprechend kommt hier folgender Ansatz zur Anwendung:

Grundkosten Energieversorgung: 2,5 Mio. € pro Unterwerk,

Zusatzkosten Energieversorgung: 0,37 Mio. € pro Umrichter.

Neben den Investitionskosten müssen auch die Betriebskosten in eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung einfließen. Deshalb wurden auch die Betriebskosten ermittelt, die sich unmittelbar aus der Antriebsauslegung ergeben:

- *Energie:* Der Energiepreis ergibt sich aus Verhandlungen mit den Energieversorgungsunternehmen. Hier werden 3,8 c/kWh für aufgenommene und 1,8 c/kWh für zurückgespeiste Energie angesetzt. Der Leistungspreis betrage 75 €/kW im Jahr.
- *Instandhaltung:* Der Aufwand an Personal und Material (Ersatzteilen) hängt stark vom Umfang der installierten Hardware ab. Aus diesem Grunde werden die Instandhaltungskosten vereinfacht mit pauschal 1,5% der Gesamt-Investitionskosten p.a. angesetzt.

Gemäß [17] stellen diese beiden Faktoren die wesentlichen technisch bedingten Betriebskostenanteile dar (vgl. Anlage 18.1-1). Hierbei ist anzumerken, dass bei der Magnetbahn die Energiekosten einen überproportional hohen Anteil gegenüber der S-Bahn darstellen. Dies liegt im gewählten Beispiel [17] u.a. daran, dass für die Magnetbahn ein ungleich höheres Geschwindigkeitsniveau (350 km/h) als bei der S-Bahn (160 km/h) angesetzt wurde. Dennoch kann die Magnetbahn in der Gesamtbilanz diese Mehrkosten annähernd ausgleichen, da sie weniger Instandhaltung benötigt und mit weniger Personal auskommt.

## 18.2 Ergebnisse Investitionskosten

Stellt man sämtliche Antriebskomponenten der drei Varianten zusammen, so erhält man die im Folgenden dargestellten Tabellen. An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, daß die dort angegebenen Zahlen nur einen beispielhaften Charakter haben, da Mengenpreise ohne konkrete Angebote abgeschätzt wurden. Auch sind Planungs- und Projektierungskosten für die Gesamtanlage nicht betrachtet.

Komponente	Variante 1		
	Menge	Mengenpreis*	Gesamtpreis
Umrichter	30 Stk	5 Mio €	150,0 Mio €
"halbe" Umrichter	8 Stk	3,4 Mio €	27,2 Mio €
Schaltstellen 6 Felder	34 Stk	0,23 Mio €	7,8 Mio €
Umschalteinrichtungen	0 Stk	0,23 Mio €	0,0 Mio €
Strecken-kabel 185	115 km	61 T€/km	7,0 Mio €
Strecken-kabel 240	239 km	64 T€/km	15,3 Mio €
<b>Antrieb gerundet</b>			<b>207 Mio €</b>
BLD	14 Stk	2,2 Mio €	30,8 Mio €
Hochspannungsanlage	6 Stk	2 Mio €	12,0 Mio €
20 kV-Kabel	0 km	93 T€/km	0,0 Mio €
Trafostationen 5 SS	10 Stk	0,28 Mio €	2,8 Mio €
Energieversorgung UW	3 Stk	2,5 Mio €	7,5 Mio €
Energieversorgung UR	38 Stk	0,37 Mio €	14,1 Mio €
<b>übrige gerundet</b>			<b>67 Mio €</b>
<b>Gesamtsumme</b>			<b>274 Mio €</b>

\*beispielhaft gem. Kap. 18.1

Komponente	Variante 2		
	Menge	Mengenpreis*	Gesamtpreis
Umrichter	0 Stk	5 Mio €	0,0 Mio €
"halbe" Umrichter	20 Stk	3,4 Mio €	68,0 Mio €
Schaltstellen 6 Felder	56 Stk	0,23 Mio €	12,9 Mio €
Umschalteinrichtungen	10 Stk	0,23 Mio €	2,3 Mio €
Strecken-kabel 185	400 km	61 T€/km	24,4 Mio €
Strecken-kabel 240	164 km	64 T€/km	10,5 Mio €
<b>Antrieb gerundet</b>			<b>118 Mio €</b>
BLD	10 Stk	2,2 Mio €	22,0 Mio €
Hochspannungsanlage	4 Stk	2 Mio €	8,0 Mio €
20 kV-Kabel	28,2 km	93 T€/km	2,6 Mio €
Trafostationen 6 SS	10 Stk	0,32 Mio €	3,2 Mio €
Energieversorgung UW	3 Stk	2,5 Mio €	7,5 Mio €
Energieversorgung UR	20 Stk	0,37 Mio €	7,4 Mio €
<b>übrige gerundet</b>			<b>51 Mio €</b>
<b>Gesamtsumme</b>			<b>169 Mio €</b>

\*beispielhaft gem. Kap. 18.1

Komponente	Variante 3		
	Menge	Mengenpreis*	Gesamtpreis
Umrichter	0 Stk	5 Mio €	0,0 Mio €
"halbe" Umrichter	10 Stk	3,4 Mio €	34,0 Mio €
Schaltstellen 12 Felder	128 Stk	0,46 Mio €	58,9 Mio €
Umschalteinrichtungen	4 Stk	0,23 Mio €	0,9 Mio €
Strecken-kabel 185	73 km	61 T€/km	4,5 Mio €
Strecken-kabel 240	199 km	64 T€/km	12,8 Mio €
<b>Antrieb gerundet</b>			<b>111 Mio €</b>
BLD	10 Stk	2,2 Mio €	22,0 Mio €
Hochspannungsanlage	2 Stk	2 Mio €	4,0 Mio €
20 kV-Kabel	22,6 km	93 T€/km	2,1 Mio €
Trafostationen 13 SS	10 Stk	0,58 Mio €	5,8 Mio €
Energieversorgung UW	2 Stk	2,5 Mio €	5,0 Mio €
Energieversorgung UR	10 Stk	0,37 Mio €	3,7 Mio €
<b>übrige gerundet</b>			<b>43 Mio €</b>
<b>Gesamtsumme</b>			<b>154 Mio €</b>

\*beispielhaft gem. Kap. 18.1

Man sieht:

- Insgesamt wird deutlich, daß höhere Einsparungen mit unkonventionelleren Lösungen, d.h. höheren Entwicklungsrisiken verbunden sind.
- Die Strategie, die kostenintensivsten Elemente – nämlich die Umrichter – möglichst weit zu reduzieren geht auf. Die Variante mit den kleinsten Umrichterzahlen erweist sich auch als die preisgünstigste.

- Bereits die Variante 2 reduziert die Kosten nachhaltig, insbesondere beim Antrieb selbst. Dies ist insofern wichtig, da Variante 2 mit relativ geringem Entwicklungsrisiko realisierbar ist.
- Die Kostenstrukturen verändern sich deutlich: Während bei Variante 1 die Umrichter Kosten bei Weitem überwiegen, fallen bei Variante 3 sogar die Schaltstellen mehr ins Gewicht. Bei Variante 2 spielen auch die Kabel eine große Rolle. Daraus folgt, daß sich bei Veränderungen der Kostenansätze auch prozentual andere Einsparpotentiale ergeben. Verteuern sich z.B. die Schaltstellen und verbilligen sich die Kabel, so wirkt sich dies positiv auf Variante 2 und negativ auf Variante 3 aus und umgekehrt.
- Aus der Tatsache, daß bei Variante 3 die Kosten für Schaltstellen höher liegen, als für die Umrichter oder Kabel, kann man schließen, daß hier die installierte Leistung bereits zu gering angesetzt wurde. Begründung: Erhöht man die Wechselrichterleistung z.B. um den Faktor 2, vorzugsweise zugunsten einer höheren Spannung, so ergibt sich daraus nach Kap. 18.1 eine Kostenerhöhung um ca. 50% (d.h. +17 Mio. €). Andererseits darf man durch eine doppelt so hohe Umrichterspannung in erster Näherung mit einer Verlängerung der Statorabschnitte um 100% rechnen, d.h. die Stückzahl und damit die Kosten für die Schaltstellen halbieren sich um 50% (d.h. –29 Mio. €). Dieser Kostenvorteil ergibt sich allerdings primär aufgrund der konservativen Kostenansätze im Kap. 18.1, wonach die Kostenreduktion bei Halbierung der Umrichterleistung nur 33% beträgt, die Kostenerhöhung bei Verdoppelung Schaltstellengröße aber 100%. Ähnliches gilt für das Verhältnis von Schaltstellen und Kabel: Setzt man anstelle der Stern- eine Dreieckschaltung an, so ergeben sich durch den Impedanzvorteil Einsparungen bei den Schaltstellen auf Kosten der Kabel.

*Dies verdeutlicht, daß sich eine abschließende, optimale Antriebsauslegung stets an den momentan am Markt erzielbaren Stückpreisen der verschiedenen Komponenten orientieren muß.*

### **18.3 Betriebskosten**

Die Betriebskosten bestehen aus Instandhaltungsaufwendungen, Energiekosten und Leistungskosten. Letztere seien an dieser Stelle vernachlässigt, da die mittlere Leistung über 15 min in allen Varianten vergleichbare Werte aufzeigen wird, weil zwar einige Varianten eine größere Spitzenleistung aufweisen als andere, dafür aber diese Leistung über einen längeren Zeitraum aufbringen müssen, um die gleiche Fahrzeit zu erreichen.

Für den Energiebedarf werden folgende Ansätze getroffen:

- 8 Zugpaare pro Stunde und 20 Stunden Betrieb am Tag; Traktionsenergiebedarf gemäß Kapitel 17.2.
- Eigenbedarf Schaltstelle: 1 kW über 24 h gemäß [6].

Eigenbedarf Umrichter: Nach [6] beträgt der Eigenbedarf für ein Unterwerk „Typ S“ 160 kW während des Betriebes und 80 kW während der Betriebspause. Da in den 3 Varianten Umrichter unterschiedlicher Leistung und damit auch einem unterschiedlichem Leistungsbedarf zum Einsatz kommen, erfolgt eine Abschätzung des Leistungsbedarfs eines Umrichters unter der Annahme, daß „Typ S“ 6 Standard-Umrichter enthält wie folgt:

- Standard-Umrichter:  $160 \text{ kW} / 6 = 27 \text{ kW}$  im Betrieb, sonst die Hälfte.

- „halber“ Umrichter: In Analogie zu Kap. 18.1 33% weniger, d.h. 18 kW im Betrieb, 9 sonst.

Damit erhält man folgende Aufstellung:

	Variante 1	Variante 2	Variante 3
<b>Traktionsenergie pro Zugpaar</b>	3,14 MWh	2,48 MWh	2,06 MWh
<b>Traktionsenergie p.a.</b>	183,4 GWh	144,8 GWh	120,3 GWh
<b>Eigenbedarf UR p.a.</b>	6,5 GWh	2,9 GWh	1,2 GWh
<b>Eigenbedarf SS p.a.</b>	0,30 GWh	0,58 GWh	1,16 GWh
<b>Summe Energiebedarf p.a.</b>	190,2 GWh	148,3 GWh	122,6 GWh
<b>Energiekosten p.a.</b>	7,1 Mio €	5,6 Mio €	4,6 Mio €
<b>Rückspeisung p.a.</b>	2,9 GWh	9,9 GWh	15,2 GWh
<b>Rückvergütung p.a.</b>	0,1 Mio €	0,2 Mio DM	0,3 Mio DM
<b>Gesamtenergiekosten p.a.</b>	<b>7,1 Mio €</b>	<b>5,4 Mio €</b>	<b>4,3 Mio €</b>

Rechnet man in erster Näherung die jährliche Instandhaltung mit 1,5% der Investitionskosten p.a., so ergeben sich folgende Summen:

	Variante 1	Variante 2	Variante 3
<b>Energiekosten p.a.</b>	7,1 Mio €	5,4 Mio €	4,3 Mio €
<b>Instandhaltung p.a.</b>	4,1 Mio €	2,5 Mio €	2,3 Mio €
<b>Lfd. Kosten in Summe p.a.</b>	<b>11,2 Mio €</b>	<b>7,9 Mio €</b>	<b>6,6 Mio €</b>

Man sieht, daß sich auch bei den laufenden Kosten ähnliche Unterschiede zwischen den drei Varianten ergeben, wie schon bei den Investitionskosten.

Auch hier gilt, daß Variante 3 bei den getroffenen Ansätzen mit mehr Umrichterleistung und weniger Schaltstellen etwas günstigere Werte liefern würde.

Im Vergleich zu [17] ergeben sich auf den ersten Blick überproportional hohe Energiekosten im Vergleich zu den Instandhaltungskosten. Das liegt jedoch daran, dass in dieser Arbeit hinsichtlich der Kosten im Wesentlichen nur der Antrieb der Magnetbahn betrachtet wird, in [17] hingegen das Gesamtsystem inkl. Stationen, Tunneln, Fahrzeugen und Fahrweg. Weiterhin ist zu bedenken, dass die hier gewählte Strecke aufgrund der vielen Halte und Anfahrvorgänge ungünstige Randbedingungen für den Energiebedarf der Magnetbahn schafft. Schließlich konnten aber durch Optimierung der Antriebsauslegung die Energiekosten um 40% gesenkt werden. Ein weiteres Einsparpotenzial ist durch eine Optimierung der Strecke und des Betriebskonzeptes zu erwarten.

#### 18.4 Lebenszykluskosten

Betriebswirtschaftlich relevant zur Beurteilung einer Anlage sind immer die Lebenszykluskosten. Diese setzen sich aus dem Investitionsvolumen und den laufenden Kosten zusammen. Je nach Finanzierung sind dabei auch noch Zinsen für die Investitionskredite anzusetzen. An dieser Stelle sei vereinfachend angenommen, daß die Investitionen ohne weitere Aufschläge über eine angesetzte Lebensdauer der Komponenten von 30 a betrachtet werden (nur Antrieb und die sonstigen in Kap. 18.2 aufgeführten Komponenten):

	Variante 1	Variante 2	Variante 3
<b>Lfd. Kosten in Summe p.a.</b>	11,2 Mio €	7,9 Mio €	6,6 Mio €
<b>Investition Antrieb p.a.</b>	6,9 Mio €	3,9 Mio €	3,7 Mio €
<b>Investition sonstige p.a.</b>	2,2 Mio €	1,7 Mio €	1,4 Mio €
<b>Gesamtumme p.a.</b>	<b>20,3 Mio €</b>	<b>13,5 Mio €</b>	<b>11,7 Mio €</b>

Ergebnisse:

- Es treten wieder ähnliche Kostenunterschiede in den drei Varianten auf wie schon in den obigen Kapiteln.
- Bemerkenswert ist, daß die laufenden Kosten den größeren Teil der Gesamtkosten ausmachen. Dies bedeutet, daß ein wirtschaftlicherer Betrieb in erster Linie auf die Reduktion dieser Kosten abzielen sollte, z.B. durch Energieeinsparungen durch Zurücknahme der Fahrzeitanforderung oder durch ein optimiertes Instandhaltungskonzept. Hier wirken sich ebenfalls die optimierten Varianten positiv aus, da dort wenig teure Ersatzteile zu beschaffen sind (Leistungselektronik bei Variante 3, Leistungselektronik und Schalter bei Variante 2).

An dieser Stelle ist anzumerken, dass die Invest- und Lebenszykluskosten zwar eine bedeutende Rolle bei Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen spielen, jedoch auf der anderen Seite auch die Attraktivität und damit die Einnahmesituation einer modernen, schnellen Verkehrsverbindung wichtig ist: In einer Gesamtwirtschaftlichkeitsbetrachtung am Beispiel eines Vergleiches mit einer S-Bahn nach [17] (Anlage 18.1-2) schlagen bei der Magnetbahn zunächst die Investitionskosten negativ zu Buche, welche bei der S-Bahn wegen der Nutzbarkeit vorhandener Infrastrukturen bzw. Zuwendungen aus der öffentlichen Hand nicht anfallen. Trotzdem liegt die Magnetbahn langfristig in der Gesamtwirtschaftlichkeitsbetrachtung klar vorne, da sie aufgrund ihrer höheren Attraktivität (die S-Bahn benötigt in dem Beispiel eine um 70% längere Fahrzeit) ein deutlich besseres Fahrgastaufkommen aufweist und somit deutlich höhere Einnahmen generiert.

## 19 Zusammenfassung und Ergebnisdiskussion

Ausgehend von einer Musterstrecke für den Regionalverkehr wurden drei Auslegungsvarianten für den Antrieb mit unterschiedlichen Entwicklungsrisiken untersucht. Diese unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit wie folgt:

- Leistungsfähigkeit: Variante 1 (Auslegung gemäß Hochgeschwindigkeitsstrecken) beinhaltet aufgrund der unverhältnismäßig hohen installierten Wechselrichterleistung etwas größere Fahrzeitreserven als die anderen beiden Varianten, bei der erreichbaren Zugfolge bieten jedoch eher die optimierten Varianten Vorteile. Die betrieblichen Anforderungen werden durch alle Varianten erfüllt.
- Fahrkomfort: Variante 1 weist den besten antriebsbedingten Fahrkomfort auf. Die anderen Varianten erfüllen zwar die Komfortanforderungen, weisen aber diesbezüglich Nachteile auf, und zwar bei Variante 2 durch periodische Beschleunigungsänderungen beim Abschnittwechsel und bei Variante 2 – vorausgesetzt die sehr kurzen Abschnittwechsel sind nicht spürbar – durch Umschaltungen von Direkttakt- auf Trafobetrieb bei jedem Anfahr- und Bremsvorgang.
- Entwicklung: Variante 2, die sich mit relativ geringem Entwicklungsaufwand realisieren läßt, ermöglicht bereits erhebliche Einsparungen im Mengengerüst. Der hohe Entwicklungsaufwand der Variante 3 hingegen bietet gegenüber Variante 2 nur noch eher geringe Kostenvorteile, z.T. auch deswegen, weil hier die installierte Leistung unter den getroffenen Kostenansätzen bereits zu knapp angesetzt wurde.
- Kostenstruktur: Neben dem Mengengerüst, d.h. den Investitionskosten, gilt auch für die Betriebskosten, daß mit zunehmender Abweichung von der Auslegung für Hochgeschwindigkeitsstrecken erhebliche Einsparungen erzielt werden können. Zudem verändert sich bei den verschiedenen Maßnahmen die Kostenstruktur – z.B. liefern bei Variante 2 die Kabel einen hohen Kostenbeitrag, bei Variante 3 hingegen die Schaltstellen – so daß prinzipiell Möglichkeiten gegeben sind, auf Veränderungen der Stückpreise durch andere Auslegungskonzepte zu reagieren. Auch innerhalb der Varianten sind grundsätzlich Kostenverlagerungen und damit Optimierungen möglich, z.B. Verringerung von Schaltstellenzahlen zu Lasten von Kabelsystemen oder Erniedrigung von Umrichterleistung zu Lasten von Schaltstellenzahlen.
- Optimierungserfolg: Die kostenmäßig am stärksten greifenden Maßnahmen, die unmittelbar zu Reduzierungen beim Mengengerüst führen, und zwar in erster Linie bei der installierten Wechselrichterleistung, wurden nur dadurch ermöglicht, daß auf Leistungsspitzen verzichtet wurde. Dies bedeutet in erster Linie den Verzicht auf sehr hohe Geschwindigkeiten, aber auch den Verzicht auf sehr hohe Beschleunigungen.

Zusammenstellung diverser numerischer und spezifischer Auswertungen der erzielten Ergebnisse:

installierte Wechselrichter- Leistung	Variante 1	Variante 2	Variante 3
- der Strecke	526,3 MVA	154,8 MVA	77,4 MVA
- pro km	6,9 MVA	2,0 MVA	1,0 MVA
- pro Fahrzeug im Umlauf	65,8 MVA	19,4 MVA	9,7 MVA
- gleichzeitig einsetzbar pro Fahrzeug*	31,0 MVA	11,6 MVA	7,7 MVA

\* außerhalb von Statorabschnittswcheln

Insbesondere die Werte der Variante 3 zeigen deutlich, mit wieviel Einsparung an installierter Leistung sich die im Regionalverkehr üblichen verkehrlichen Anforderungen bewältigen lassen, ohne daß dadurch nennenswerte Einbußen an Fahrdynamik resultieren. Die installierte Leistung der Variante 1 hingegen bleibt weitgehend ungenutzt.

benötigte streckenseitige Antriebsanlagen	Variante 1	Variante 2	Variante 3
- Kabel	354 km	564 km	272 km
- Schaltstellen und Umschaltanlagen	34 Stk	66 Stk	132 Stk

Aufgrund der großen Leistungsreserven kommt Variante 1 mit wenig streckenseitigen Anlagen aus. Bei Variante 2 und 3 ergeben sich gegenläufige Mengenentwicklungen für Kabel und Schaltstellen. Die Ursache hierfür liegt einerseits in den unterschiedlichen Statorabschnittsweselfverfahren und andererseits darin, daß bei Variante 3 die geringe installierte Leistung in Verbindung mit der geforderten Fahrdynamik keine großen Statorabschnittslängen mehr zuläßt, wenn die Sternschaltung beibehalten wird. Wie die folgenden Auswertungen zeigen, spielen die streckenseitigen Einrichtungen bei den Gesamtkosten gegenüber den Unterwerken allerdings eine i.d.R. weniger bedeutende Rolle, was den Erfolg der Optimierungsbemühungen gewährleistet:

Investitionskosten Auslegung*	Variante 1	Variante 2	Variante 3
- der Strecke	274,0 Mio €	169,0 Mio €	154,0 Mio €
- pro km	3,6 Mio €	2,2 Mio €	2,0 Mio €
- pro betriebenen Fahrzeug	34,3 Mio €	21,1 Mio €	19,3 Mio €

\*Antrieb und durch Antrieb beeinflusste Komponenten gemäß Ansatz Kap. 18

Zwischen den spezifischen Kosten der Varianten 1 und 3 liegt annähernd der Faktor 2. Auch Variante 2 ermöglicht bereits einen sehr großen Teil der Kosteneinsparungen. Dies ist insofern von Bedeutung, als daß Variante 2 die kurzfristig erzielbaren Optimierungen mit geringem Entwicklungsrisiko repräsentiert.

Auch bei den Betriebskosten ergibt sich ein ähnliches Bild wie bei den Investitionskosten, nicht zuletzt dadurch, daß die Instandhaltung maßgeblich durch die Menge der installierten Technik bestimmt wird, aber auch aufgrund der unterschiedlichen Wirkungsgrade der Varianten:

Betriebskosten p.a.*	Variante 1	Variante 2	Variante 3
- der Strecke	11,2 Mio €	7,9 Mio €	6,6 Mio €
- pro km	0,15 Mio €	0,10 Mio €	0,09 Mio €
- pro betriebenen Fahrzeug	1,4 Mio €	1,0 Mio €	0,8 Mio €

\*Antrieb und durch Antrieb beeinflusste Komponenten gemäß Ansatz Kap. 18

**Insgesamt erhöht sich die Wirtschaftlichkeit des Antriebes mit zunehmender Anpassung an die Erfordernisse des Regionalverkehrs nachhaltig, insbesondere durch Rücknahme der Leistungsanforderungen bzw. Höchstgeschwindigkeiten gegenüber dem Fernverkehr.**

## Anhang

### Abkürzungsverzeichnis

<b>Abkürzung</b>	<b>ausgeschrieben</b>	<b>Beschreibung</b>
ABE	Antriebsbereich	Bereich, in dem sich nur ein Fahrzeug befinden darf; definiert durch die Kabelgruppe, die in den zugehörigen, angrenzenden Unterwerken endet
ABG	Antriebsbereichsgrenze	Übergangsbereich zwischen zwei Antriebsbereichen
ABL	Antriebsblock	Teil des Unterwerkes, der einem bestimmten Antriebsbereich zugeordnet ist; besteht aus Umrichtern und Antriebsregelung/Steuerung
ARS	Antriebsregelung/-Steuerung	Einrichtung zur Regelung und Steuerung des Antriebes
BLD	Betriebsleittechnik-Dezentrale	Einrichtung im Unterwerk zur Sicherung und Steuerung des Betriebes in einem Antriebsbereich
BLT	Betriebsleittechnik	Übergeordnetes Sicherungs- und Steuerungssystem
BSV	Bocksprungverfahren	Schubkrafteinbruchsfreies Statorabschnittswchselverfahren mit zwei Streckenkabelverbunden
DSV	Dreischrittverfahren	Schubkrafteinbruchsfreies Statorabschnittswchselverfahren mit drei Streckenkabelverbunden
DSP	Doppelspeisung	Speisung der Statorabschnitte aus 2 Unterwerken
ESP	Einfachspeisung	Speisung der Statorabschnitte aus einem Unterwerk
FaPro	Fahrspielprogramm	Fahrdynamik- und Antriebs-Simulationsprogramm für Langstatorantriebe
HS	Hochspannungsanlage	Schnittstelle zum öffentlichen Hochspannungsnetz im Unterwerk
KSV	Kurzschlußverfahren	Statorabschnittswchselverfahren mit nur einem Streckenkabelverbund
MSP	Mischspeisung	Mischung zwischen Einfach- und Doppelspeisung
SA	Statorabschnitt	Teil des Langstators
SK	Streckenkabel	Antriebskabel entlang der Strecke
SKV	Streckenkabelverbund	Summe der Streckenkabel, die einem Umrichter zugeordnet sind
SKG	Streckenkabelgruppe	Summe der Streckenkabelverbunde, die zum Antriebsbereich einer Fahrspur gehören

SAL	Statorabschnittslänge	Länge eines separat einspeisbaren Statorabschnittes
SAW	Statorabschnitts-wechsel	Vorgang der Umschaltung der Einspeisung/Schubkraft von einem Statorabschnitt auf den nächsten
SAWV	Statorabschnitts-wechselverfahren	Verfahren, welches die Fortschaltung der Schubkraft von aufeinanderfolgenden Statorabschnitten bewerkstelligt; benötigt bestimmte Verschaltungen von Kabeln/Schaltstellen/Statoren
SS	Schaltstelle	Schaltbare Verbindung zwischen ein oder mehreren Statorabschnitten und ein oder mehreren Streckenkabeln
TSV	Teilschrittverfahren	Statorabschnittswechselverfahren, in dem immer nur Teile des eingespeisten Statorabschnittes weitergeschaltet werden.
TVE	Transrapid Versuchsanlage Emsland	Anlage nahe Lathen.
UR	Umrichter	Gerät zum Erzeugen frequenz-, phasen- und amplitudengeregelter Spannungen und Ströme
UW	Unterwerk	Beinhaltet die Antriebsblöcke zur Einspeisung der Streckenkabel
WSV	Wechselschritt-verfahren	Statorabschnittswechselverfahren mit zwei Streckenkabelverbunden und Ortsversatz
ZVV	Zeitversatzverfahren	Statorabschnittswechselverfahren mit zwei Streckenkabelverbunden ohne Ortsversatz

**Größenbezeichnungen**

<b>Größe</b>	<b>Beschreibung</b>
$a_{\text{nenn}}$	Nennbeschleunigung
$c_M$	Motorkonstante pro Sektion, beidseitig
$d_A$	Abstand Unterwerk A – Schaltstelle
$d_B$	Abstand Unterwerk B – Schaltstelle
$d_S$	Länge Statorabschnitt
$F$	Kraft (Schubkraft)
$\dot{i}_A$	Strom aus Unterwerk A (zurückliegendes Unterwerk)
$\dot{i}_B$	Strom aus Unterwerk B (vorausliegendes Unterwerk)
$\dot{i}_S$	Statorstrom
$\dot{i}_{SSA}$	Strom an Schaltstelle aus Richtung Unterwerk A
$\dot{i}_{SSB}$	Strom an Schaltstelle aus Richtung Unterwerk B
$\dot{i}_{UR}$	Umrichterstrom
$L_A$	Induktivität zwischen Unterwerk A und Schaltstelle
$L_B$	Induktivität zwischen Unterwerk B und Schaltstelle
$L_S$	Induktivität Statorabschnitt
$L_T$	Induktivität Ausgangstrafo
$m_{Fzg}$	Fahrzeugmasse pro Sektion
$n_S$	Sektionszahl
$\underline{P}_A$	Leistung aus Unterwerk A (zurückliegendes Unterwerk)
$\underline{P}_B$	Leistung aus Unterwerk B (vorausliegendes Unterwerk)
$P_M$	Mechanische Leistung im Luftspalt
$\underline{P}_{SSA}$	Leistung an Schaltstelle aus Richtung Unterwerk A
$\underline{P}_{SSB}$	Leistung an Schaltstelle aus Richtung Unterwerk B
$\underline{P}_Z$	Leistungsabfall an Streckenimpedanzen
$R_A$	Widerstand zwischen Unterwerk A und Schaltstelle
$R_B$	Widerstand zwischen Unterwerk B und Schaltstelle
$R_S$	Widerstand Statorabschnitt
$L_R$	Widerstand Ausgangstrafo
$\underline{u}_A$	Spannung am Unterwerk A (zurückliegendes Unterwerk)

$\underline{u}_B$	Spannung am Unterwerk B (vorausliegendes Unterwerk)
$u_p$	Induzierte Polradspannung im Stator
$\underline{u}_{SS}$	Spannung an Schaltstelle
$u_{UR}$	Umrichterspannung
$\ddot{u}$	Übersetzungsverhältnis Trafo
$v$	Fahrzeuggeschwindigkeit
$W_{KV}$	Verlustenergie in Streckenkabeln
$\underline{Z}_A$	Streckenimpedanz zwischen Unterwerk A und Schaltstelle
$\underline{Z}_B$	Streckenimpedanz zwischen Unterwerk B und Schaltstelle
$\underline{Z}_S$	Streckenimpedanz Stator
$\underline{Z}_{W\ K/S}$	Wellenwiderstand Streckenkabel / Stator
$\underline{\gamma}_{K/S}$	Wellen-Ausbreitungsmaß Streckenkabel / Stator
$\tau_p$	Stator-Polteilung
$\omega$	Winkelgeschwindigkeit

Komplexe Größen sind unterstrichen, wobei der Realteil in Phase zu  $u_p$  liegt (Schubachse), der Imaginärteil senkrecht dazu (Erregerfeldachse).

**Literaturverzeichnis**

- [1] ARGE Systemauslegung Transrapid, Technischer Bericht MSB Berlin-Hamburg, ROV-Systemauslegung Langstatormotor, Dok.-Nr. MGM/0048/01/96
- [2] Bronstein/Semendjajew, Taschenbuch der Mathematik, Verlag Harri Deutsch
- [3] Heinhold/Stubbe, Kabel und Leitungen für Starkstrom Teil 1, Siemens AG
- [4] Heinhold/Stubbe, Kabel und Leitungen für Starkstrom Teil 2, Siemens AG
- [5] Fürst, Anwendungsnahe Dimensionierung und meßtechnische Überprüfung von Langstator-Linearmotoren für Magnetschnellbahnen, TU Berlin
- [6] Bericht „Transrapid Berlin-Hamburg, Berechnungen zur Erstausslegung“, IfB Dresden, Nr. 317600 vom 29.07.1998
- [7] Hütte, Elektrische Energietechnik, Springer Verlag
- [9] ARGE Systemauslegung Transrapid, Kostenkatalog für WU1 MSB Berlin-Hamburg, Dok.-Nr. MGM/585/06/97
- [10] Elektrische Bahnen 7/95, Langstator-Synchronantrieb des Transrapid, Dr.-Ing habil. Uwe Henning, Dr. rer. Nat. Peter G. Kamp, Josef Hochleitner
- [11] Starkstromkabel Katalog SK 1.22 der Siemens AG, Oktober 1994.
- [12] Bericht „Energiebedarf der Bahnsysteme Transrapid und ICE 3 Strecke Berlin-Hamburg“, IfB/TUB-Bericht-Nr. 98/BeB/82 vom 7.5.98.
- [13] Thomas Stoffel, Dynamische Vorgänge in Fahrbahnausrüstungskomponenten der Magnetfahrtechnik, Dissertation vom Fachbereich 10 der TU Berlin, 1996.
- [14] E. Philippow, Taschenbuch Elektrotechnik, Bd. 1, Grundlagen, VEB Verlag Technik Berlin 1968.
- [15] Prof. Dr.-Ing. P. Mnich, Dr.-Ing. Stephan, Dipl.-Ing. Fritz, Energiebedarf der Bahnsysteme Transrapid und ICE 3 Strecke Berlin-Hamburg, Institut für Bahntechnik GmbH an der Technischen Universität Berlin und Dresden, Bericht Nr. 98/BeB/82
- [16] Rolf Hellinger, Theoretische Grundlagen zur Auslegung von eisenbehafteten Langstator-Linearmotoren, Dissertation TU Berlin, 1993
- [17] Bietergemeinschaft WEP Weiterentwicklung MSB-System, Alternativ-Untersuchung Transrapid – Rad-/ Schiene-System am Beispiel Flughafenbinder München, Bericht Nr. 64096

## Lebenslauf

Dipl.-Ing. (Univ) Rolf Fischperer, geboren am 08.10.1962 in Nürnberg, ledig, wohnhaft in der Uhlandstraße 195/196, 10623 Berlin.

### Werdegang:

- 1970-1973 Besuch der Grundschule Erlangen-Tennenlohe der Schuljahre 69/70 (1. Klasse) bis 72/73 (4. Klasse).
- 1973-1982 Besuch des Ohm-Gymnasiums Erlangen mit mathematisch-naturwissenschaftlicher und neusprachlicher Ausrichtung. Abschluß des 13. Schuljahres mit Abitur mit besonderen Prüfungsschwerpunkten in Englisch, Physik, Wirtschafts- und Rechtslehre sowie Biologie.
- 1982-1985 Grundstudium der Elektrotechnik an der TU München und der Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, technische Fakultät. Zwischenzeitlich Erwerb industriehandwerklicher Grundkenntnisse durch Praktika in den Firmen Siemens AG (Erlangen), Custom Control Panels LTD (Kanada), Corporate Foods LTD (Kanada) und AGORA Manufacturing (Kanada).
- 1985-1988 Hauptstudium der Elektrotechnik an der Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, technische Fakultät mit Studienschwerpunkten in Antriebs-, Regelungs- und Steuerungstechnik. Zwischenzeitlich Werkstudententätigkeiten bei der Siemens AG (Erlangen) im Bereich Softwareentwicklung, Schaltungsaufbau im Entwicklungslabor und Entwicklung von NC-Steuerungen. Erstellung einer Studienarbeit am Lehrstuhl für Regelungstechnik „Untersuchung von nichtlinearen Regelungsverfahren für den Einsatz in einem hydraulischen Servorotationsantrieb“ und einer Diplomarbeit am Lehrstuhl für elektrische Antriebe „Feldschwächung eines bürstenlosen Servomotors“.
- 1989-1996 Anstellung bei der Siemens AG (Erlangen) im Unternehmensbereich E (später Siemens Verkehrstechnik) mit den Aufgabenbereichen Erstellung von Simulationssoftware für Magnetschnellbahnen, Erstellung von Weiterentwicklungsprogrammen für den Antrieb der Magnetschnellbahn Transrapid sowie Steuerung der Entwicklungsaktivitäten nachgeordneter Siemens-Abteilungen mit Schwerpunkten bei Antriebsregelung-/Steuerung.
- 1996-1998 Auslegung und Planung des Antriebes für die Magnetschnellbahn Berlin-Hamburg bei der Siemens Verkehrstechnik Transrapid (VT TR) in Berlin.
- 1998-2006 Wechsel in die Transrapid International GmbH & Co. KG, Berlin, und Weiterführung der Planungsarbeiten sowie Erarbeitung technischer Vorgaben für die zuliefernde Industrie. Desweiteren antriebstechnische Vorprojektierung weiterer, internationaler Transrapid-Projekte.

**Anlagenverzeichnis**

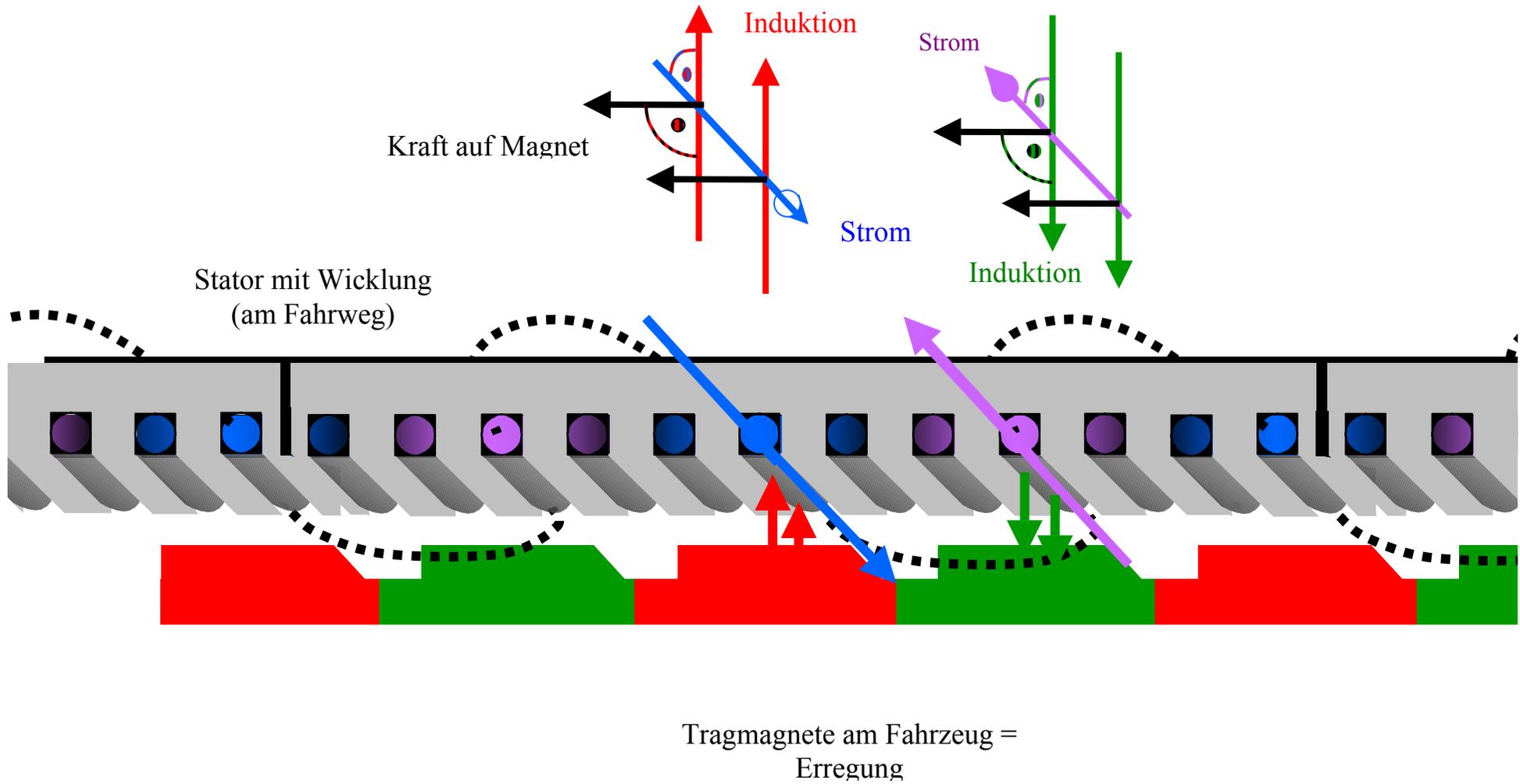
- Anlage 2.1-0: Wirkungsweise des Langstatormotors
- Anlage 2.1-1: Komponenten des Langstatorantriebes
- Anlage 2.2-1: Bekannte Unterwerkstypen und Speiseverfahren
- Anlage 2.3-1: Schaltung Kurzschlußverfahren
- Anlage 2.3-2: Schubverlauf Kurzschlußverfahren
- Anlage 2.3-3: Schaltung Bocksprungverfahren
- Anlage 2.3-4: Schubverlauf Bocksprungverfahren
- Anlage 2.3-5: Schaltung Wechselschrittverfahren
- Anlage 2.3-6: Schubverlauf Wechselschrittverfahren
- Anlage 2.3-7: Schaltung Zeitversatzverfahren
- Anlage 2.3-8: Schubverlauf Zeitversatzverfahren
- Anlage 2.3-9: Schaltung Dreischrittverfahren
- Anlage 2.3-10: Schubverlauf Dreischrittverfahren
- Anlage 3.2-1: Herleitung Zeigerdiagramm
- Anlage 3.2-2: Zeigerdiagramm Kippunkt und Feldschwächung
- Anlage 3.3-1: Einflußparameter
- Anlage 3.4-1: Zusammenwirken der Parameter
- Anlage 8.1-1: Aufbau konventioneller MSB-Umrichter
- Anlage 8.1-2: Spannungsbildung MSB-Umrichter
- Anlage 8.1-3: Spannungsauswertung Umrichter
- Anlage 8.2-1: Vereinfachte Umrichter
- Anlage 8.3-1: Zusammensetzung der Belegungszeiten
- Anlage 8.3-2: BLD- und Antriebsbereichsaufteilung
- Anlage 8.3-3: Belegung in Stationsbereichen
- Anlage 8.4-1: Statorschaltungen bei Reihenanordnung
- Anlage 8.4-2: offene Sternschaltung mit Ersatzschaltbild
- Anlage 8.5-1: Schaltung Mischspeisung
- Anlage 8.5-2: Mischspeisung
- Anlage 8.7-1: Prinzipablauf Teilschrittverfahren
- Anlage 8.7-2: Spannungshalter
- Anlage 8.7-3: Berechnungsergebnis Teilschrittverfahren

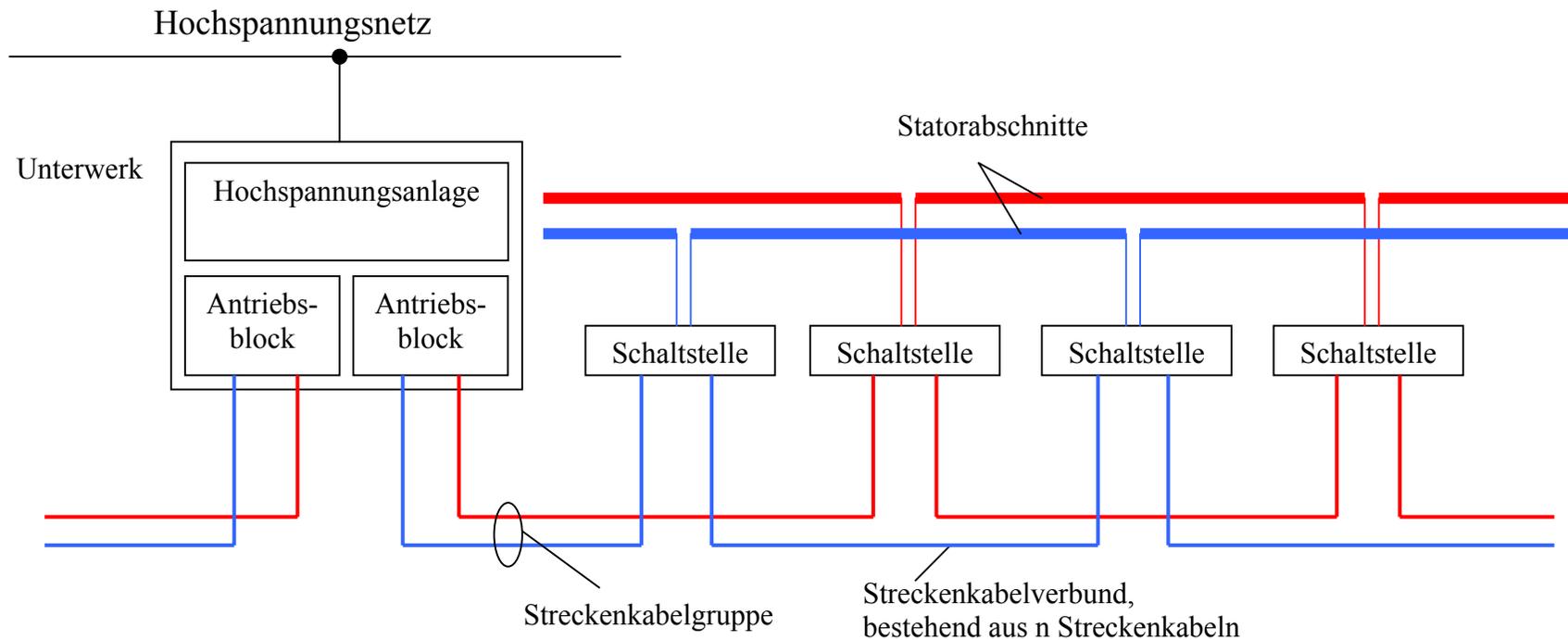
- Anlage 8.7-4: Sternschaltung Teilschrittverfahren
- Anlage 8.7-5: Dreieckschaltung Teilschrittverfahren
- Anlage 8.7-6: Speisezustände Teilschrittverfahren
- Anlage 8.7-7: Störfallschaltungen Teilschrittverfahren
- Anlage 8.7-8: Aufbauvorschlag Teilschrittverfahren
- Anlage 8.8-1: Übertragungsleistung 20 kV-Kabel
- Anlage 8.9-1: Prinzipskizze weichengesteuerte Schaltvorrichtung
- Anlage 11.1-1: Festlegung der Unterwerksstandorte
- Anlage 11.2-1: Weg-Zeit-Diagramm Variante 1 mit Vorab-Auslegung
- Anlage 11.2-2: Gleisbelegungen Endstation
- Anlage 12.2-1: Stromverläufe Vorabauslegung
- Anlage 13.2-1: Spannungen optimierte Trafoübersetzung Variante 2
- Anlage 13.2-2: Ströme optimierte Trafoübersetzung Variante 2
- Anlage 13.2-2: Geschwindigkeit und Beschleunigung Variante 2.
- Anlage 14.2-1: Statorabschnittslängen Variante 1
- Anlage 14.2-2: Statorabschnittslängen Variante 2
- Anlage 15.2-1: Leistungsverläufe einzelner Fahrzeuge, Variante 2
- Anlage 15.2-2: Leistungsverlauf Unterwerk 1, Variante 2
- Anlage 15.2-3: Leistungsverlauf Unterwerk 2, Variante 2
- Anlage 15.2-4: Leistungsverlauf Unterwerk 3, Variante 2
- Anlage 15.2-5: Leistungsverläufe einzelner Fahrzeuge, Variante 3
- Anlage 16.1-1: Statorstromverläufe Variante 1
- Anlage 16.1-2: Auslegungsergebnis Variante 1
- Anlage 16.1-3: Nenndaten Umrichter für Variante 1
- Anlage 16.2-1: Auslegungsergebnis Variante 2
- Anlage 16.2-2: Nenndaten Umrichter für Variante 2
- Anlage 16.3-1: Auslegungsergebnis Variante 3
- Anlage 16.3-2: Nenndaten Umrichter für Variante 3
- Anlage 17.1-1: Fahrspiele Spur 1
- Anlage 17.1-2: Fahrspiele Spur 2
- Anlage 17.3-1: Bildfahrplan Variante 1 mit BLD-Belegungsblöcken
- Anlage 17.3-2: Bildfahrplan Variante 2 mit BLD-Belegungsblöcken
- Anlage 17.3-3: Bildfahrplan Variante 3 mit BLD-Belegungsblöcken

Anlage 17.3-4: Bildfahrplan Variante 3 mit ABE-Belegungsblöcken

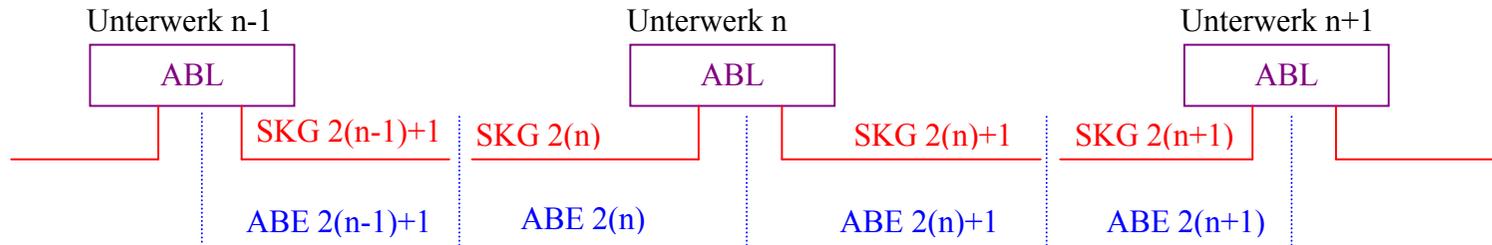
Anlage 18.1-1: Betriebskostenanalyse Magnetbahn und S-Bahn

Anlage 18.1-2: Wirtschaftlichkeitsanalyse Magnet- und S-Bahn

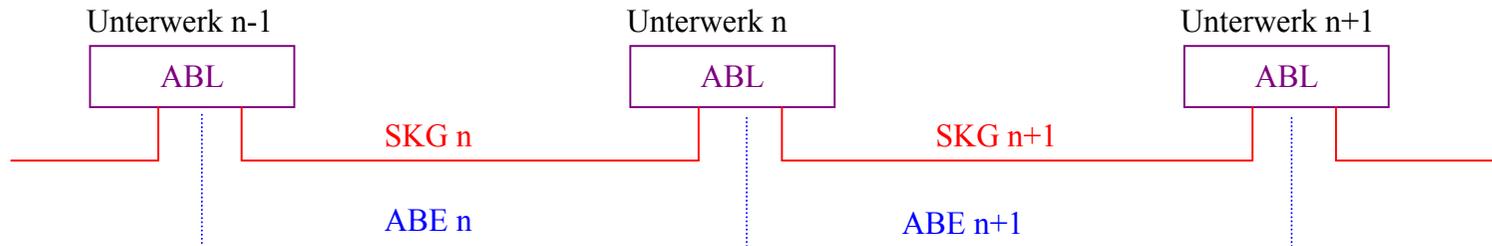




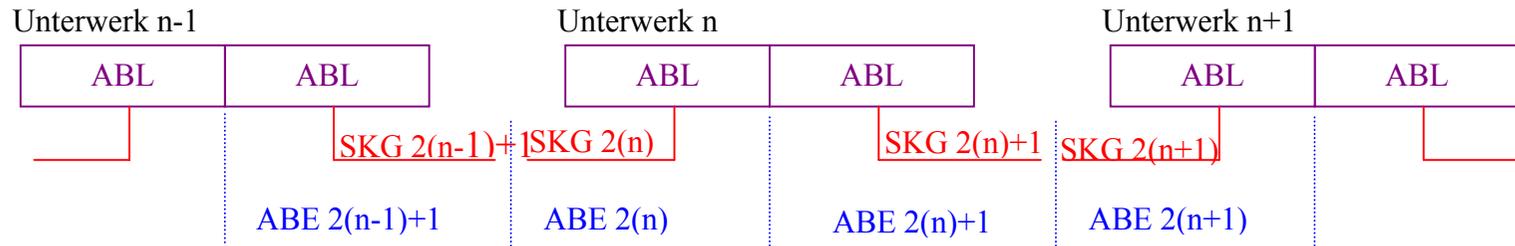
**Unterwerk Typ 1,  
Einfachspeisung**



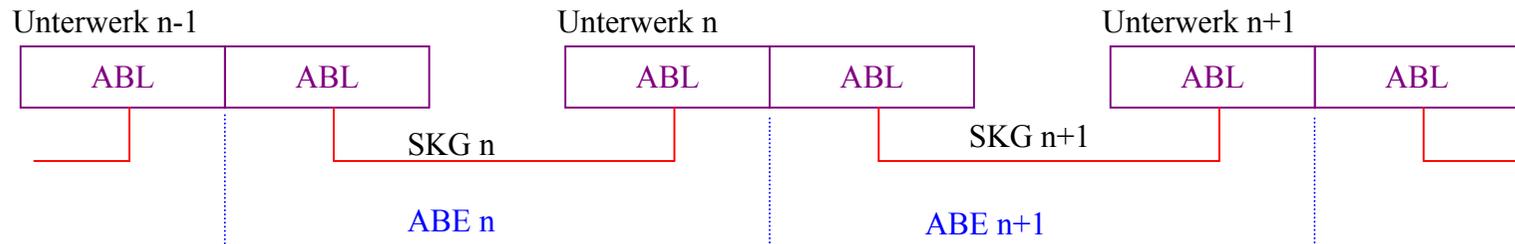
**Unterwerk Typ 1,  
Doppelspeisung**

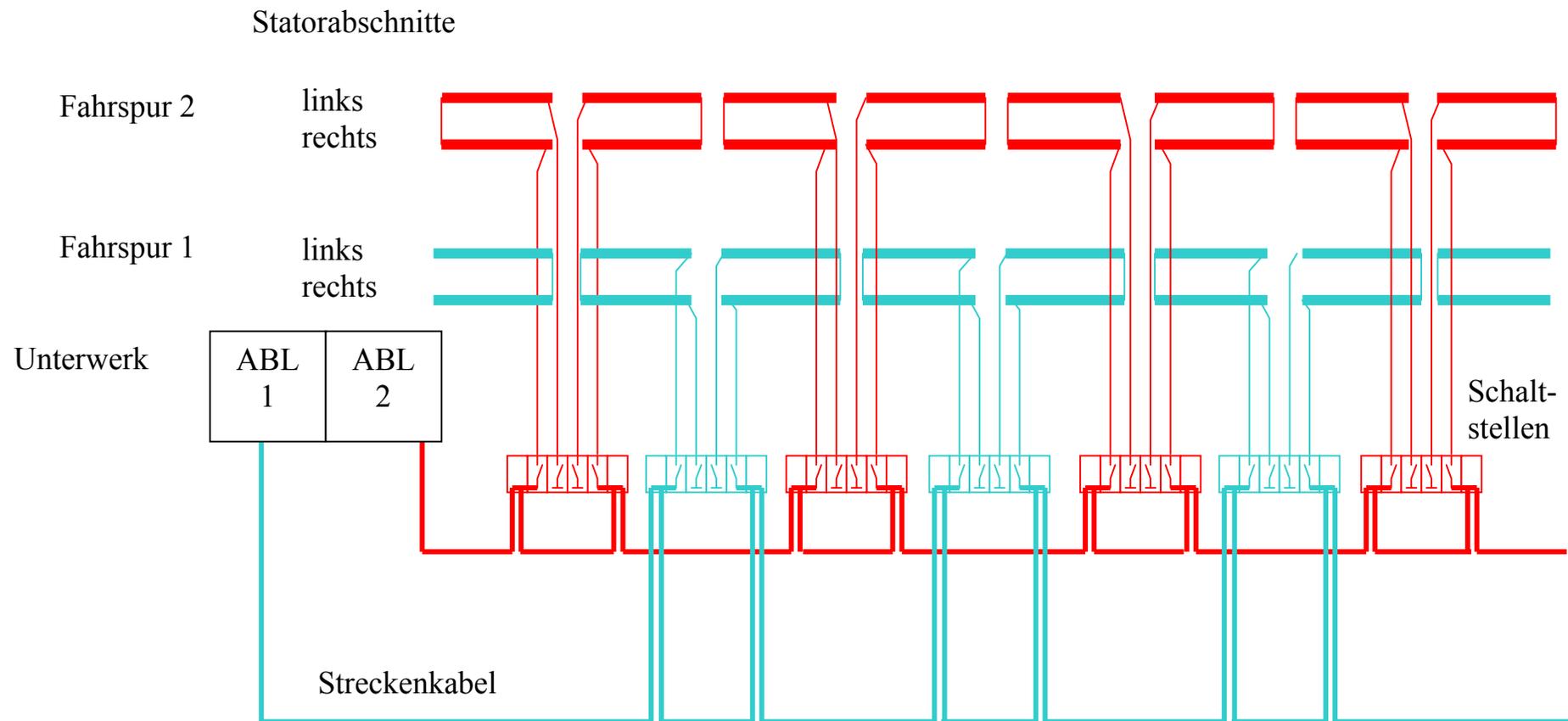


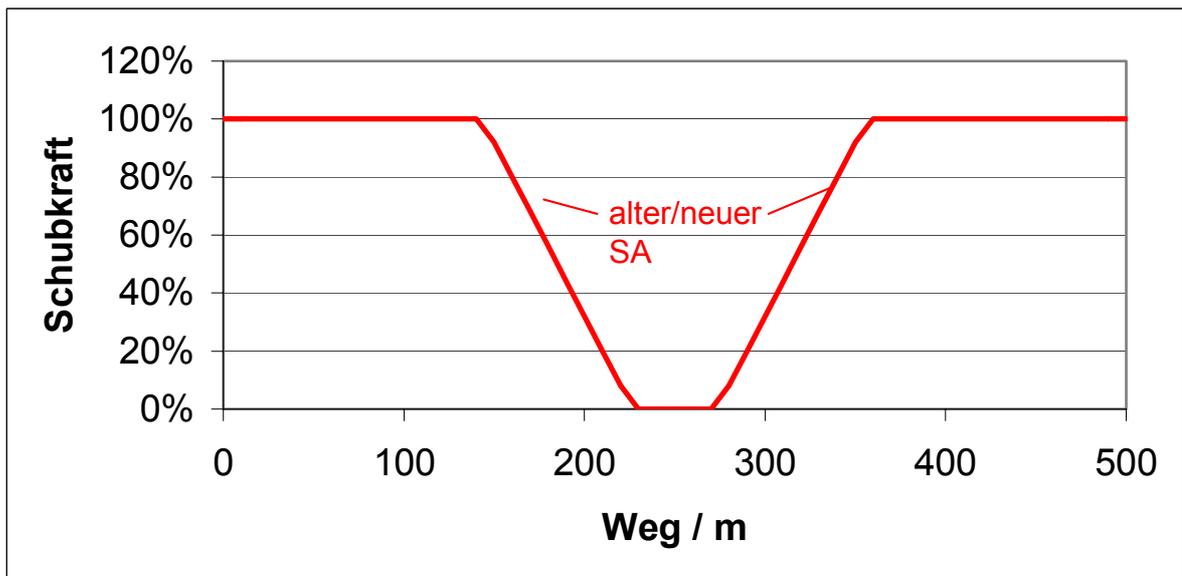
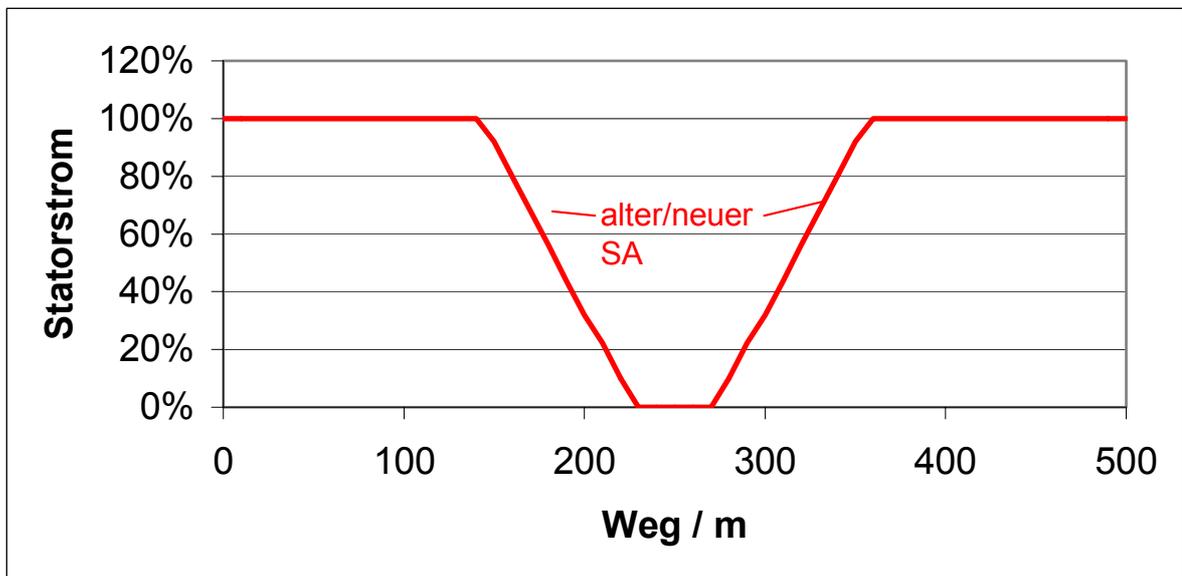
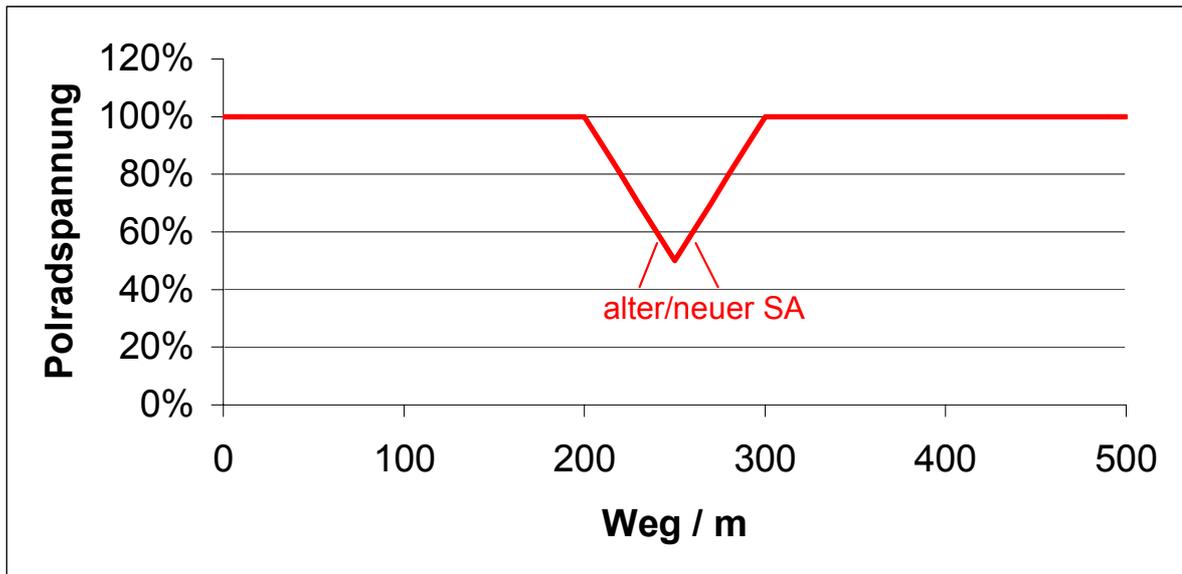
**Unterwerk Typ 2,  
Einfachspeisung**

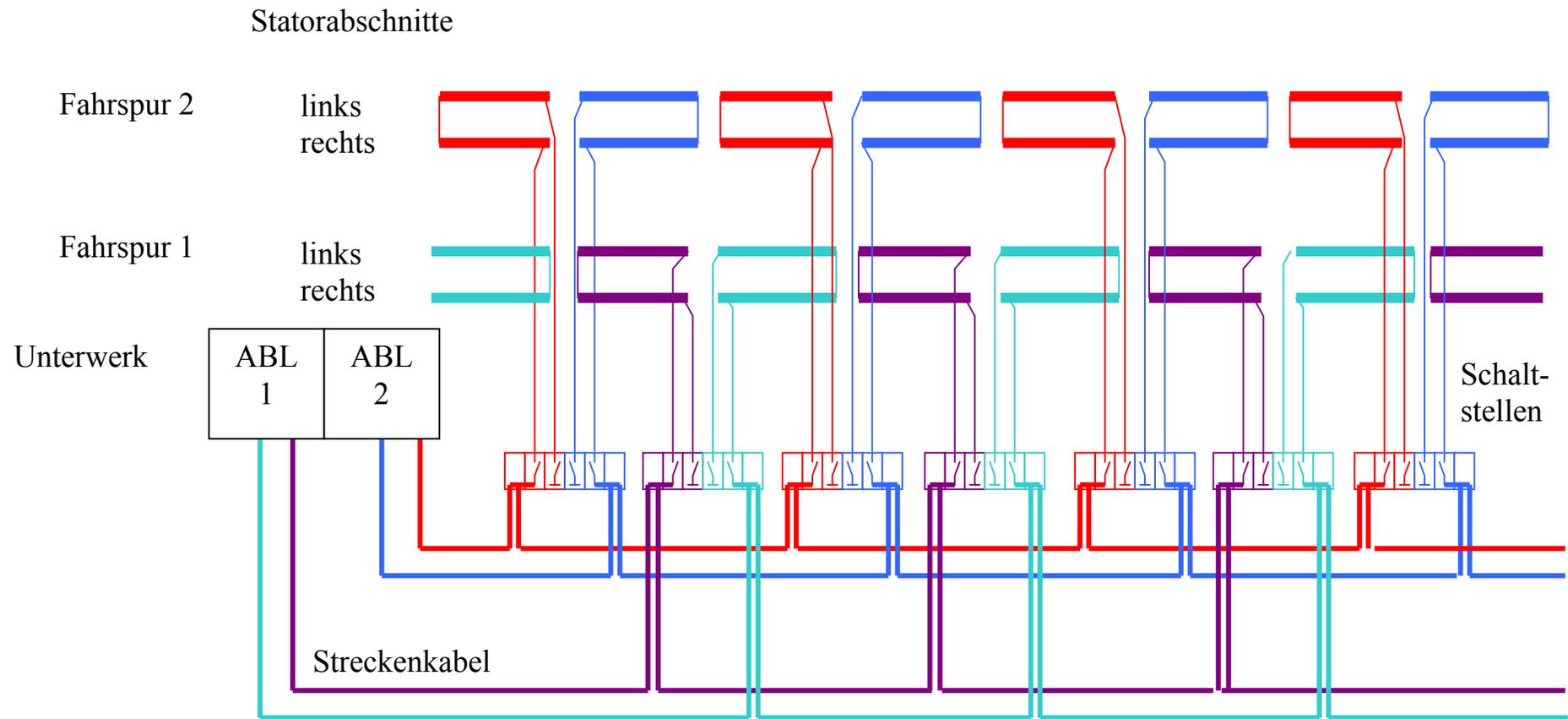


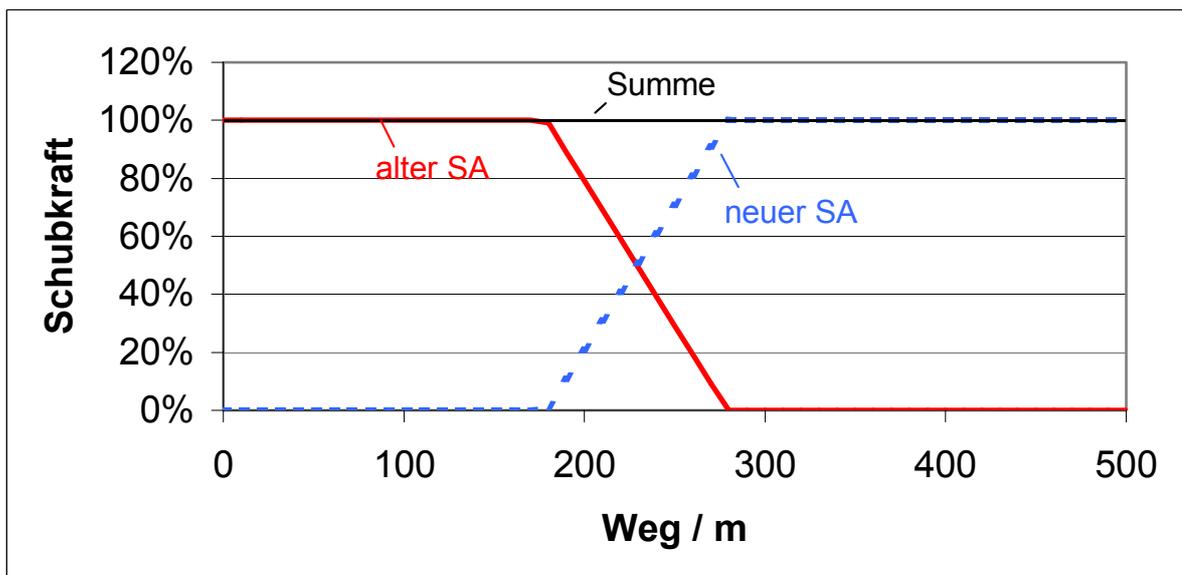
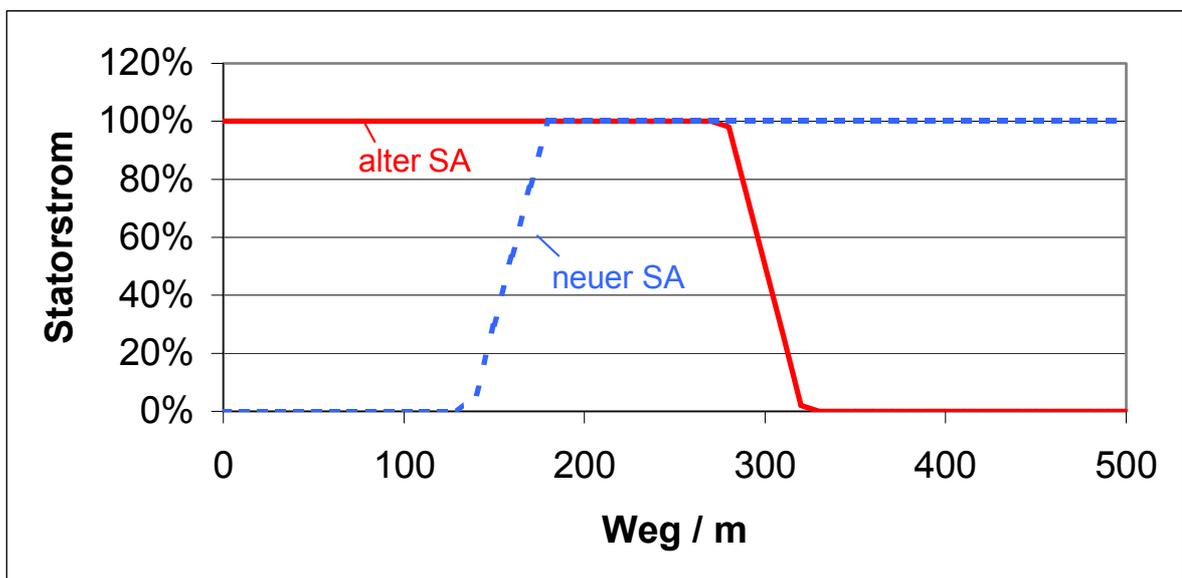
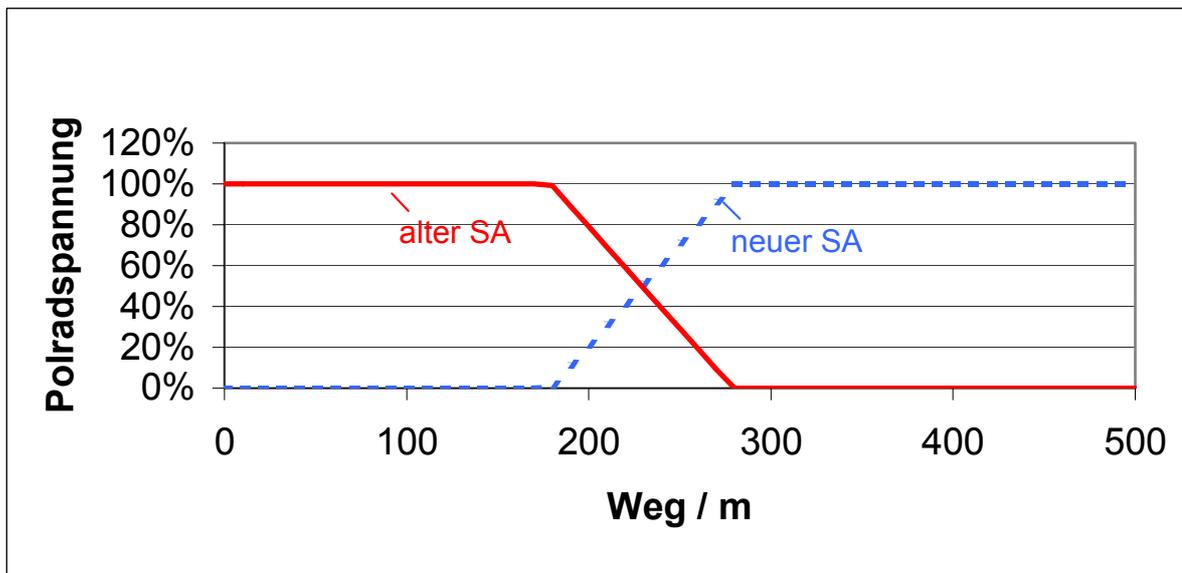
**Unterwerk Typ 2,  
Doppelspeisung**

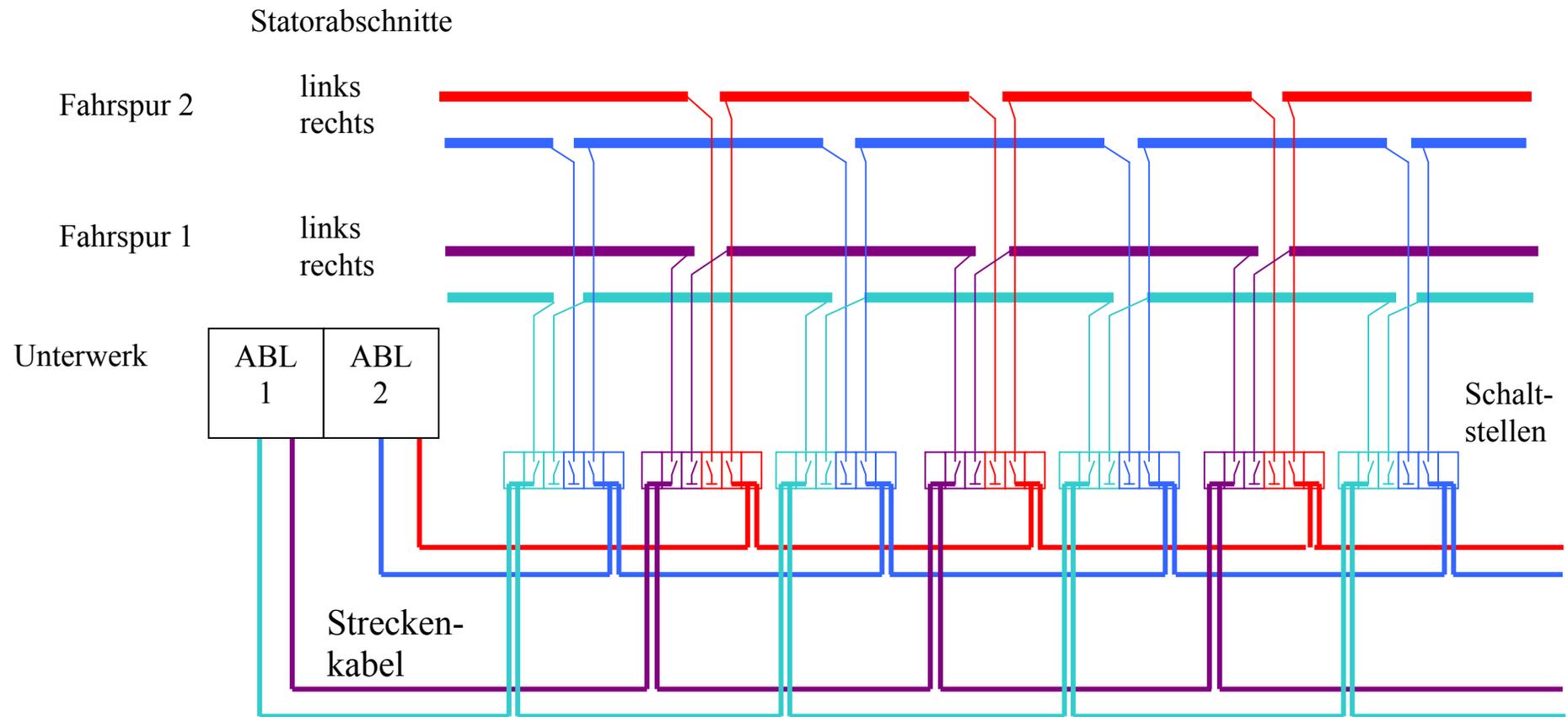


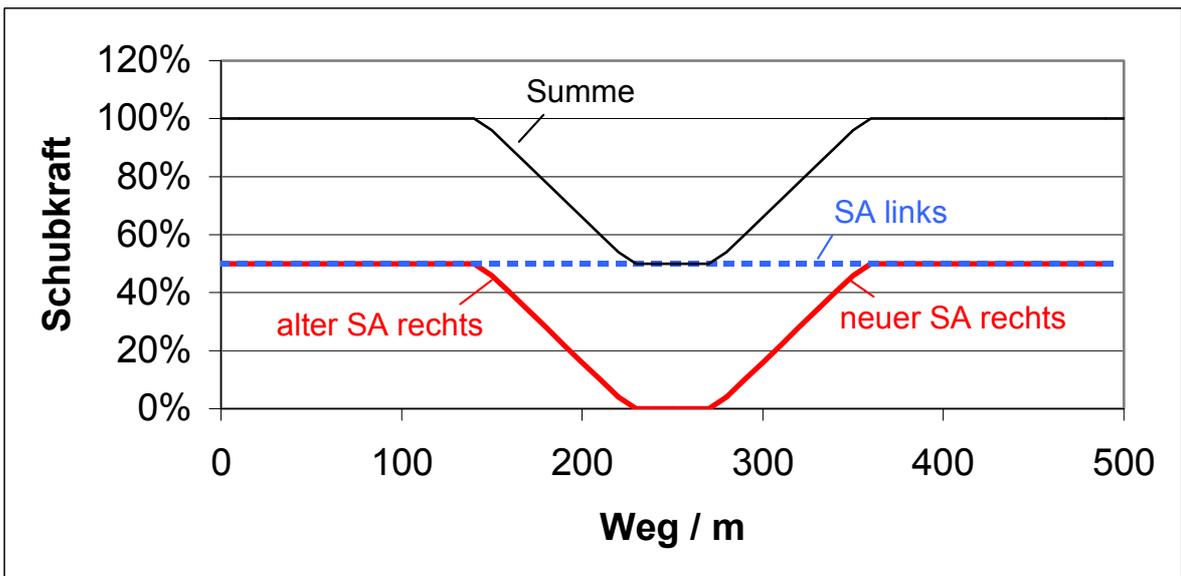
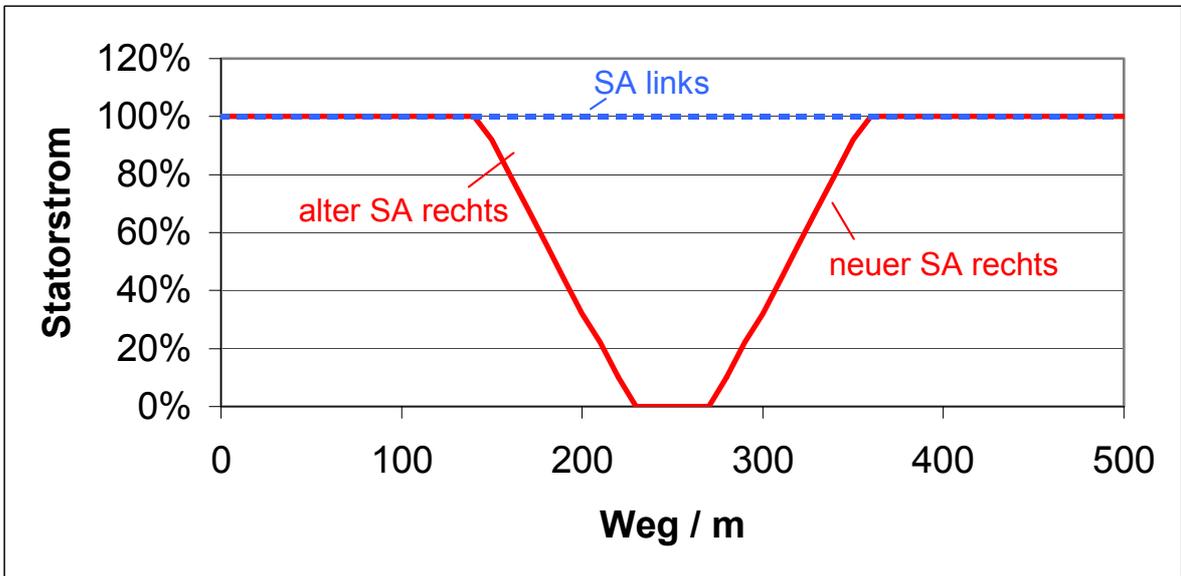
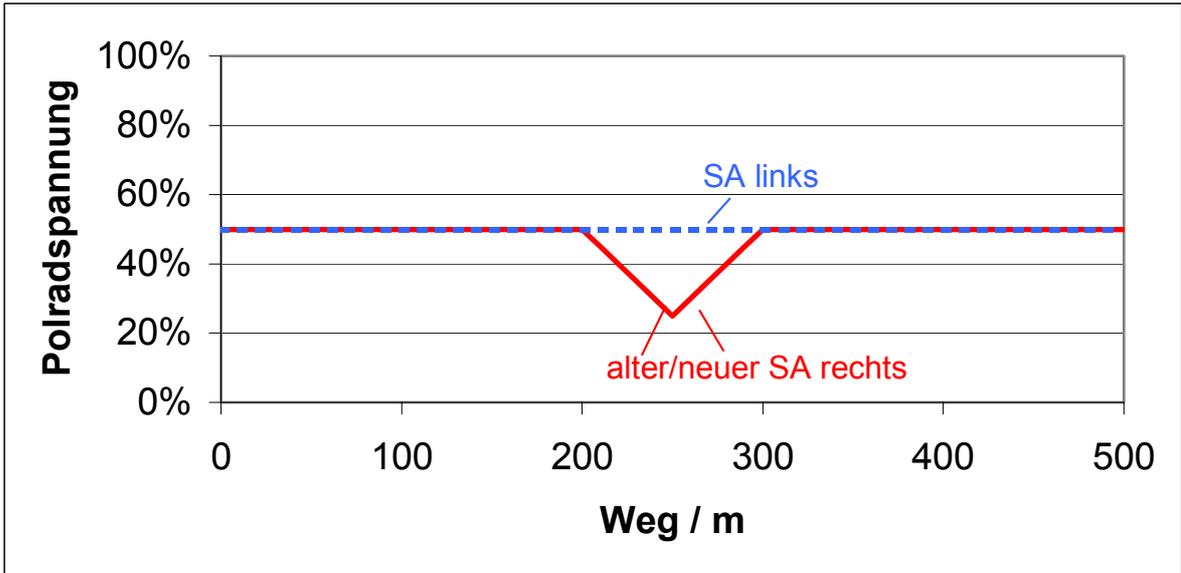




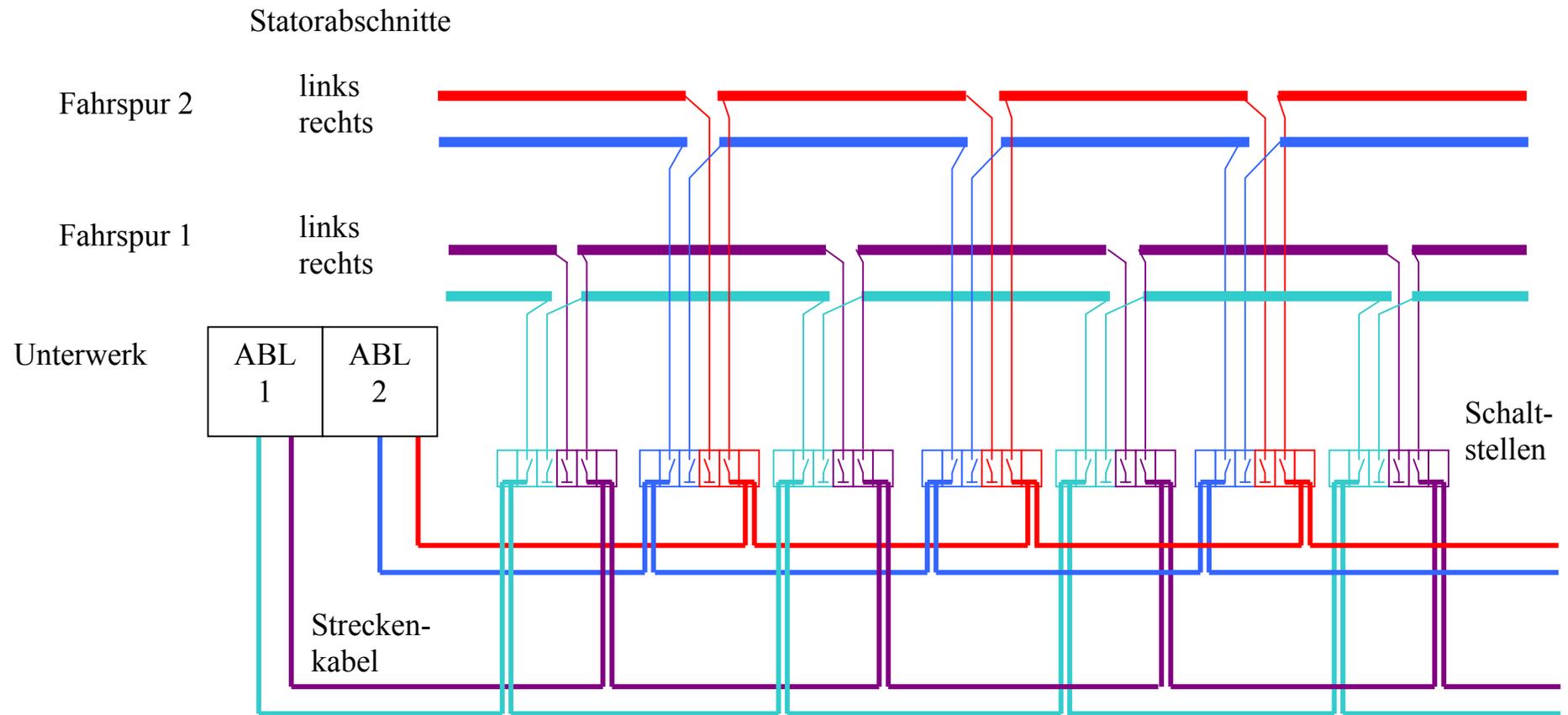


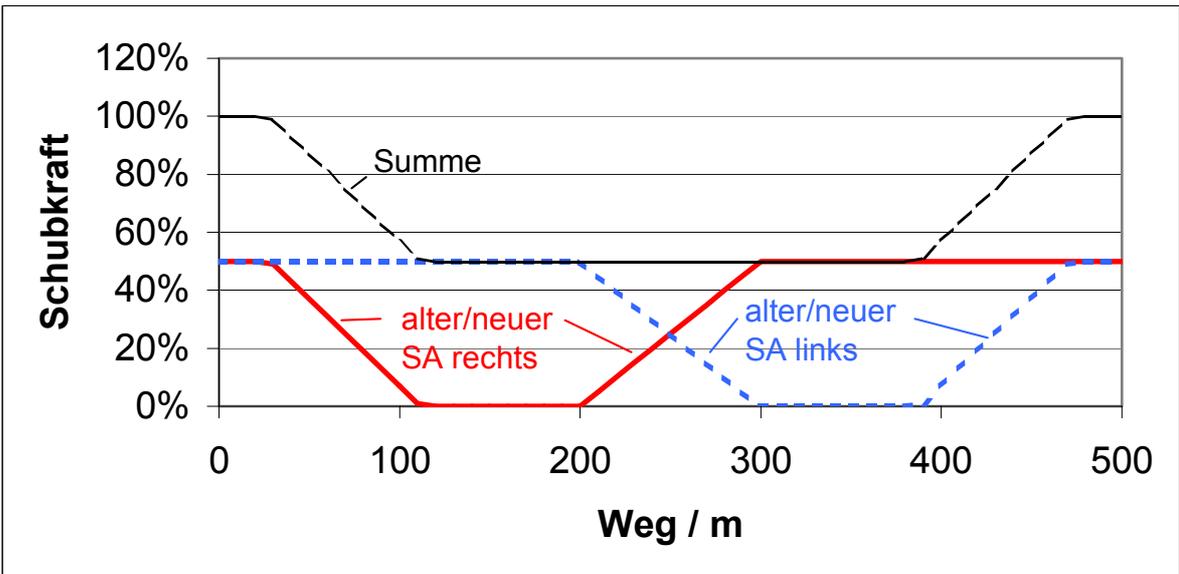
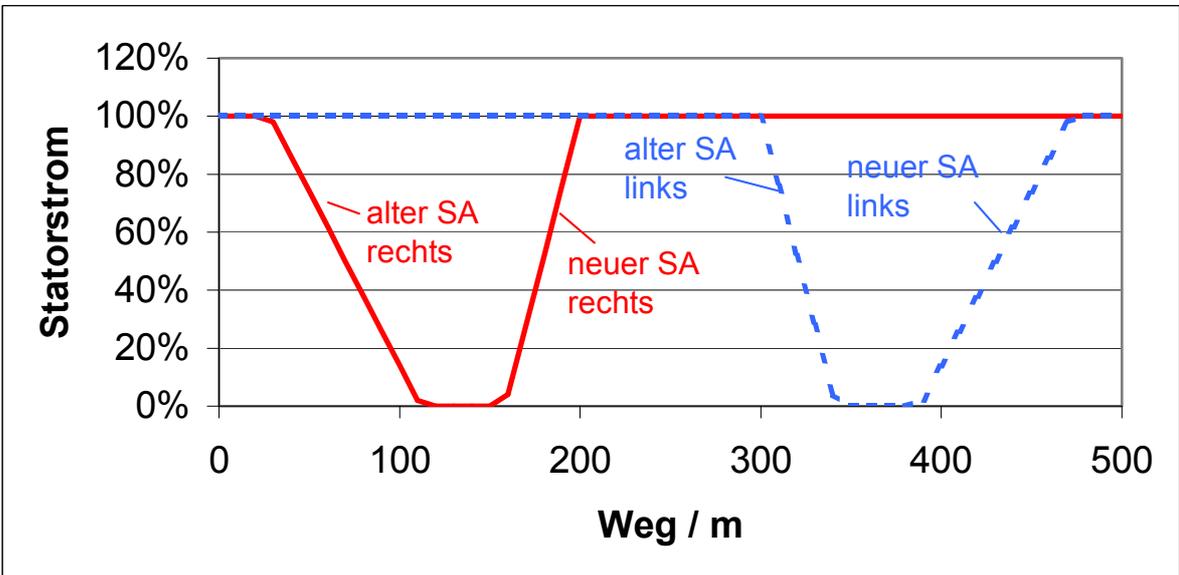
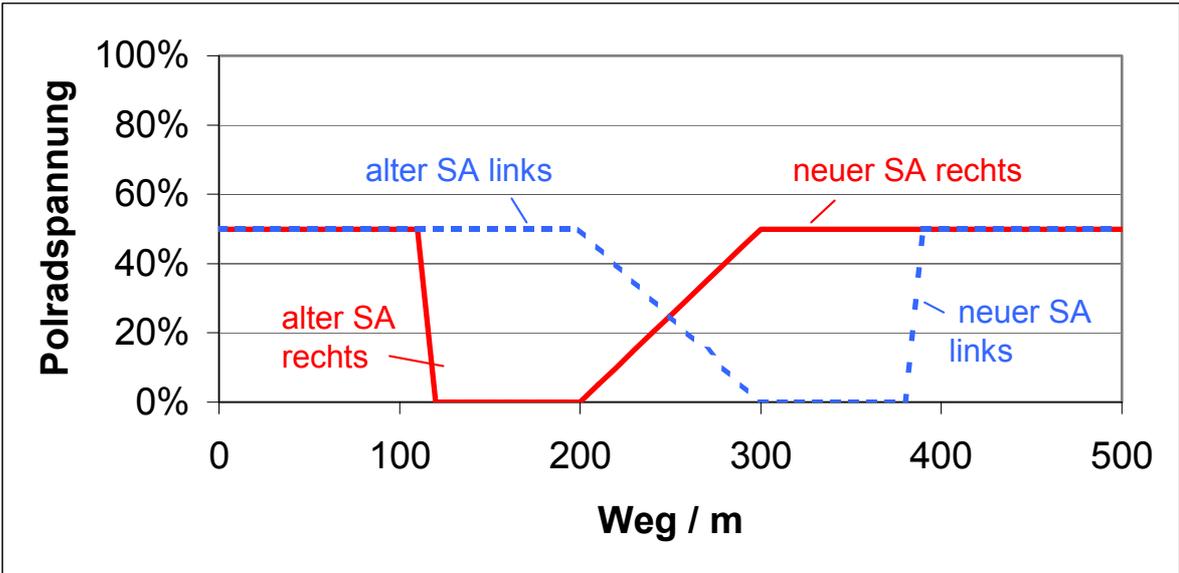




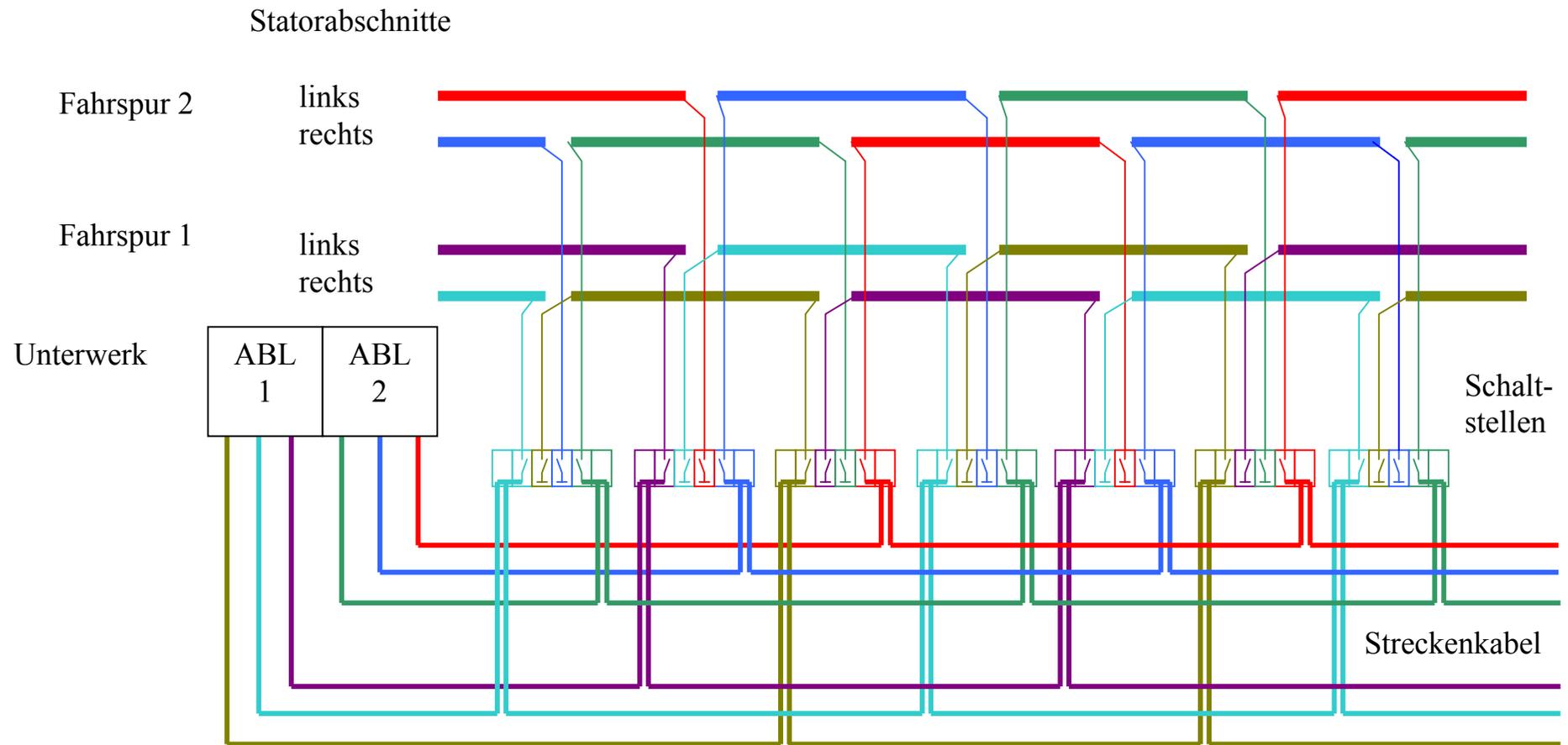


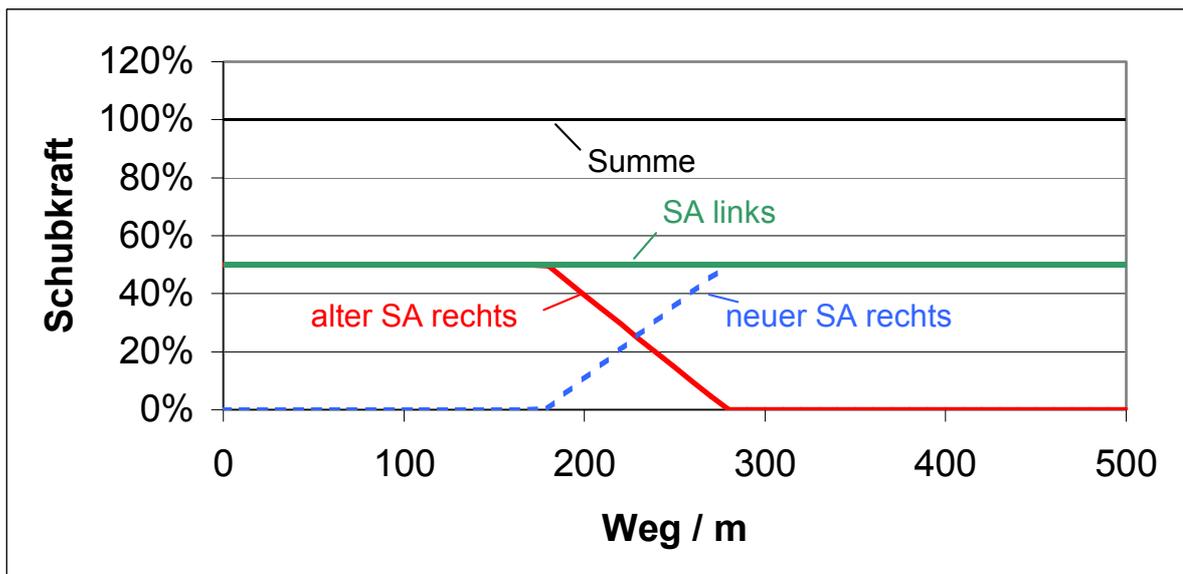
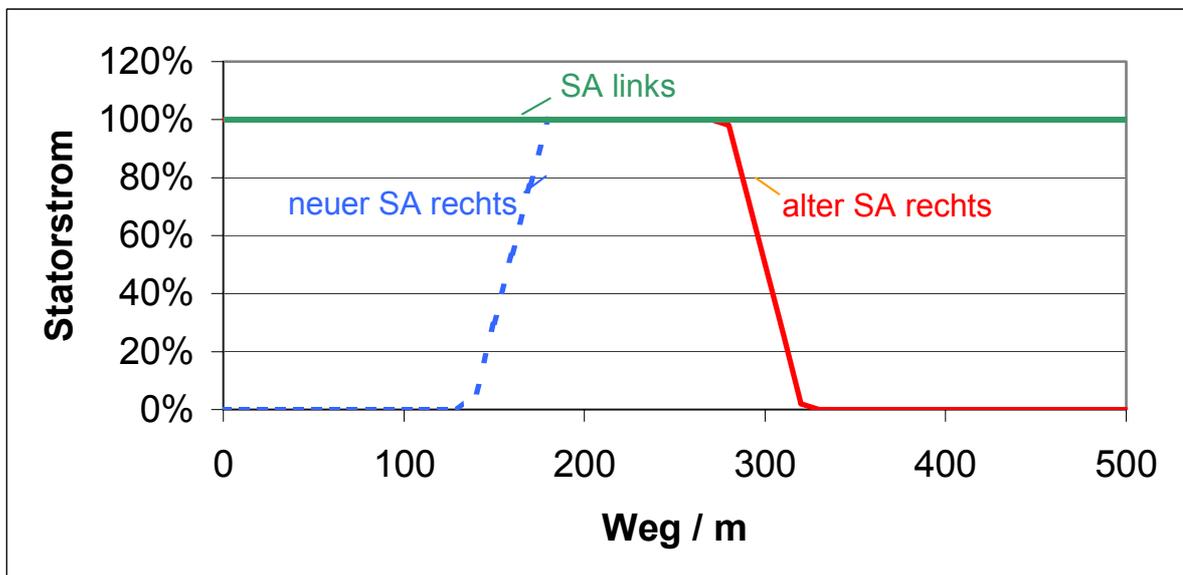
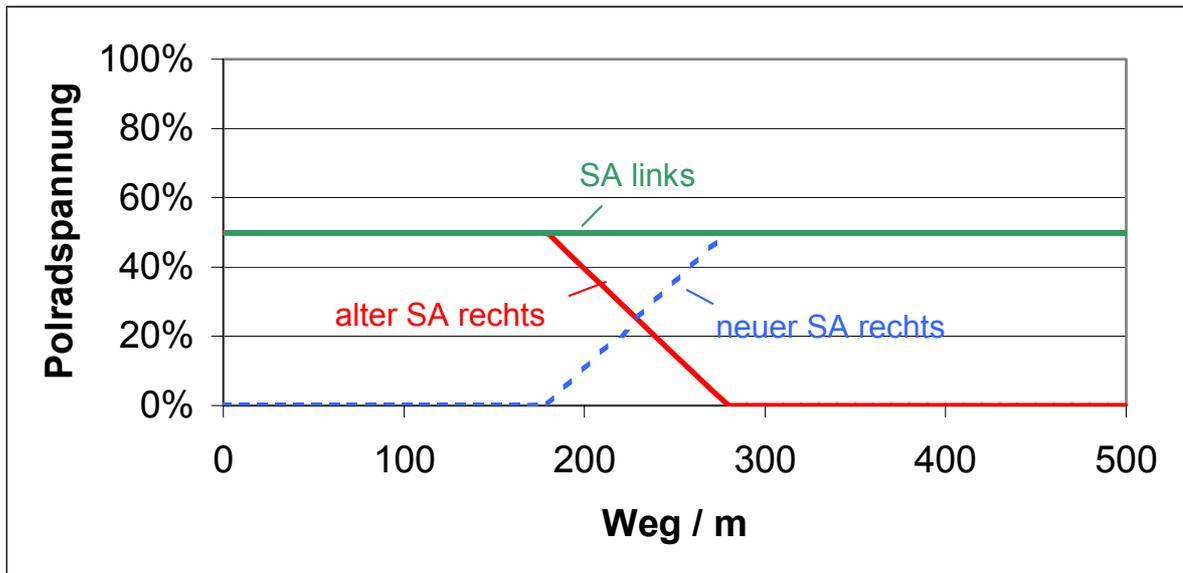
**Magnetschnellbahn für den schnellen Regionalverkehr –  
Optimierung des Langstatorantriebs und der Energieversorgung**



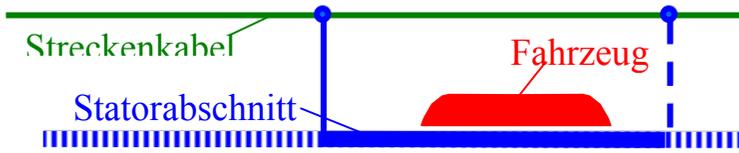


**Magnetschnellbahn für den schnellen Regionalverkehr –  
Optimierung des Langstatorantriebs und der Energieversorgung**

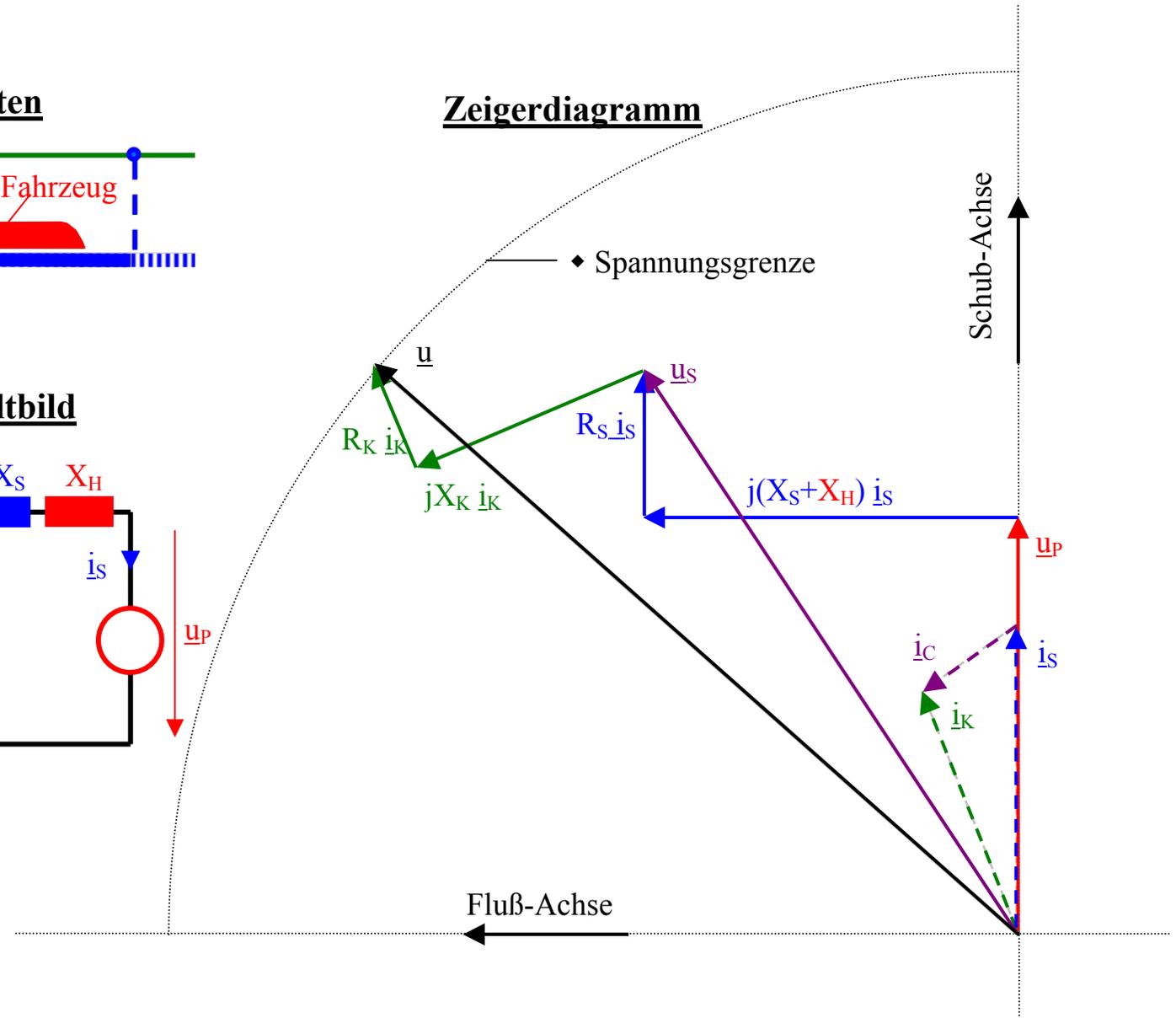




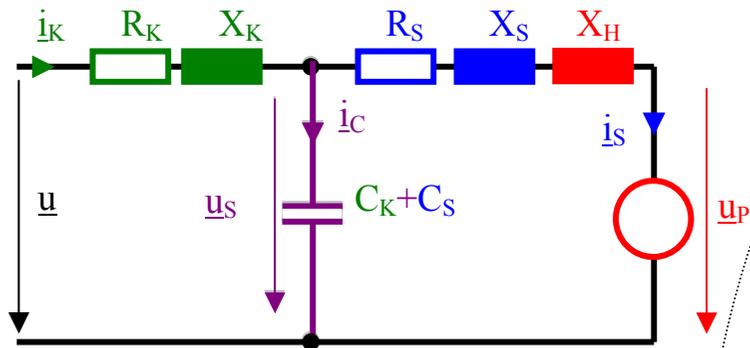
### Elektrische Komponenten



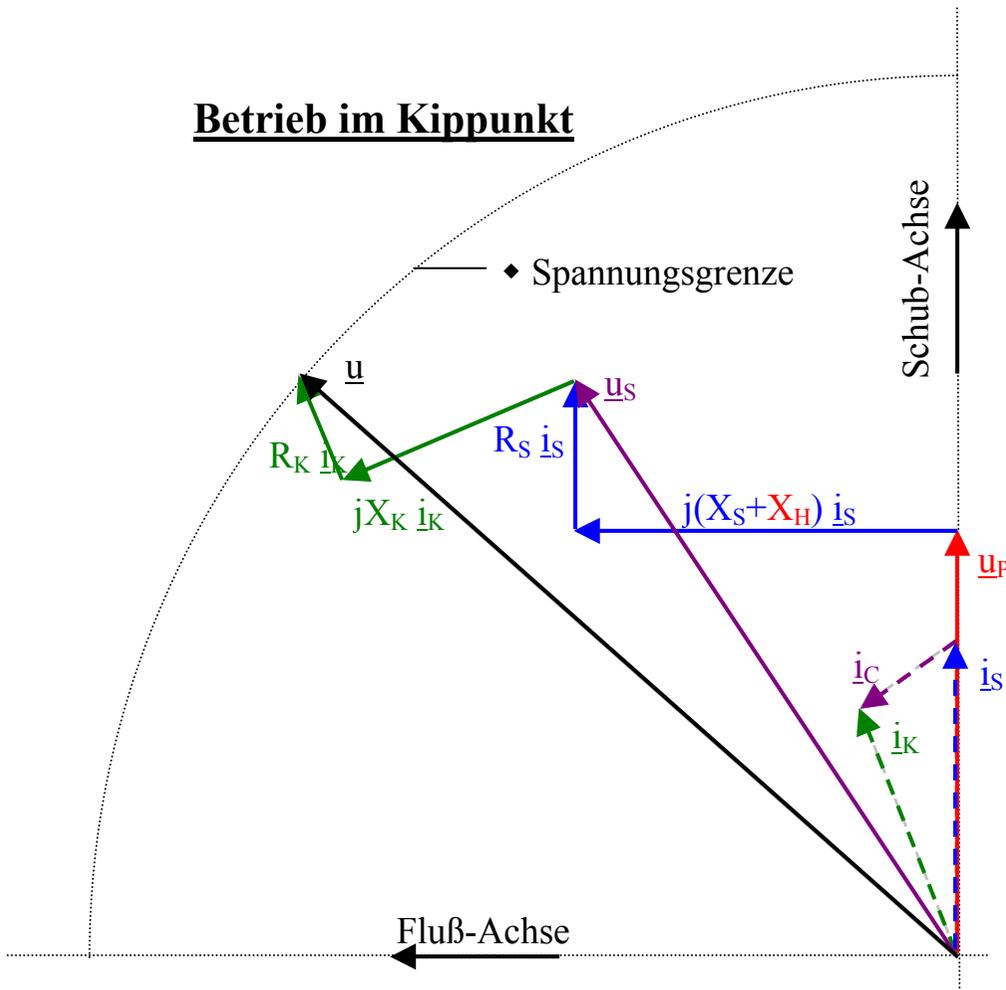
### Zeigerdiagramm



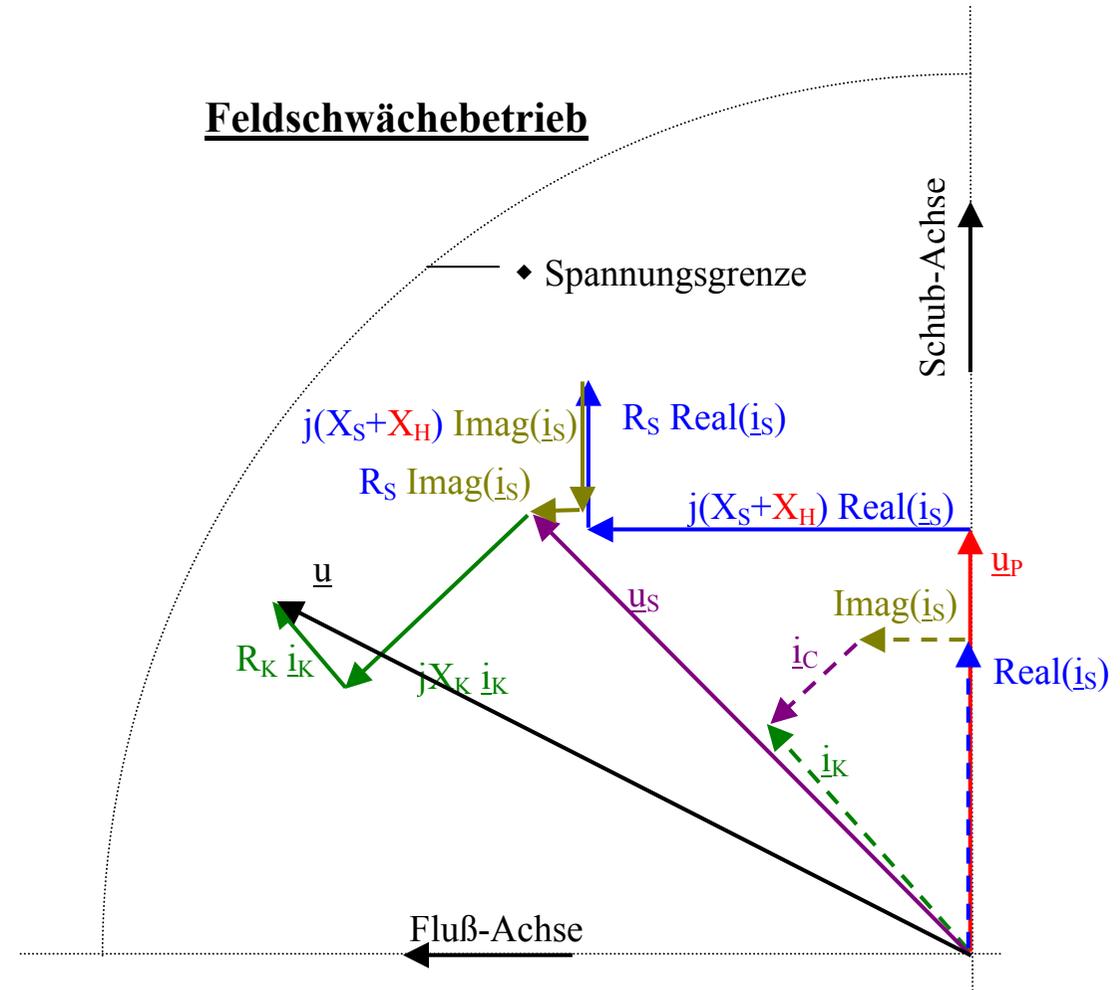
### Vereinfachtes Ersatzschaltbild



### Betrieb im Kippunkt



### Feldschwächebetrieb



**Eingangsgrößen**

Streckenprofil

Fahrzeitvorgabe

Fahrtakt

Verkehrsaufkommen

**Leistungsparameter**

Schubkraft

Höchstgeschwindigkeit

Energiebedarf

Kosten

**Optimierungsparameter**

Unterwerksabstand

Umrichter

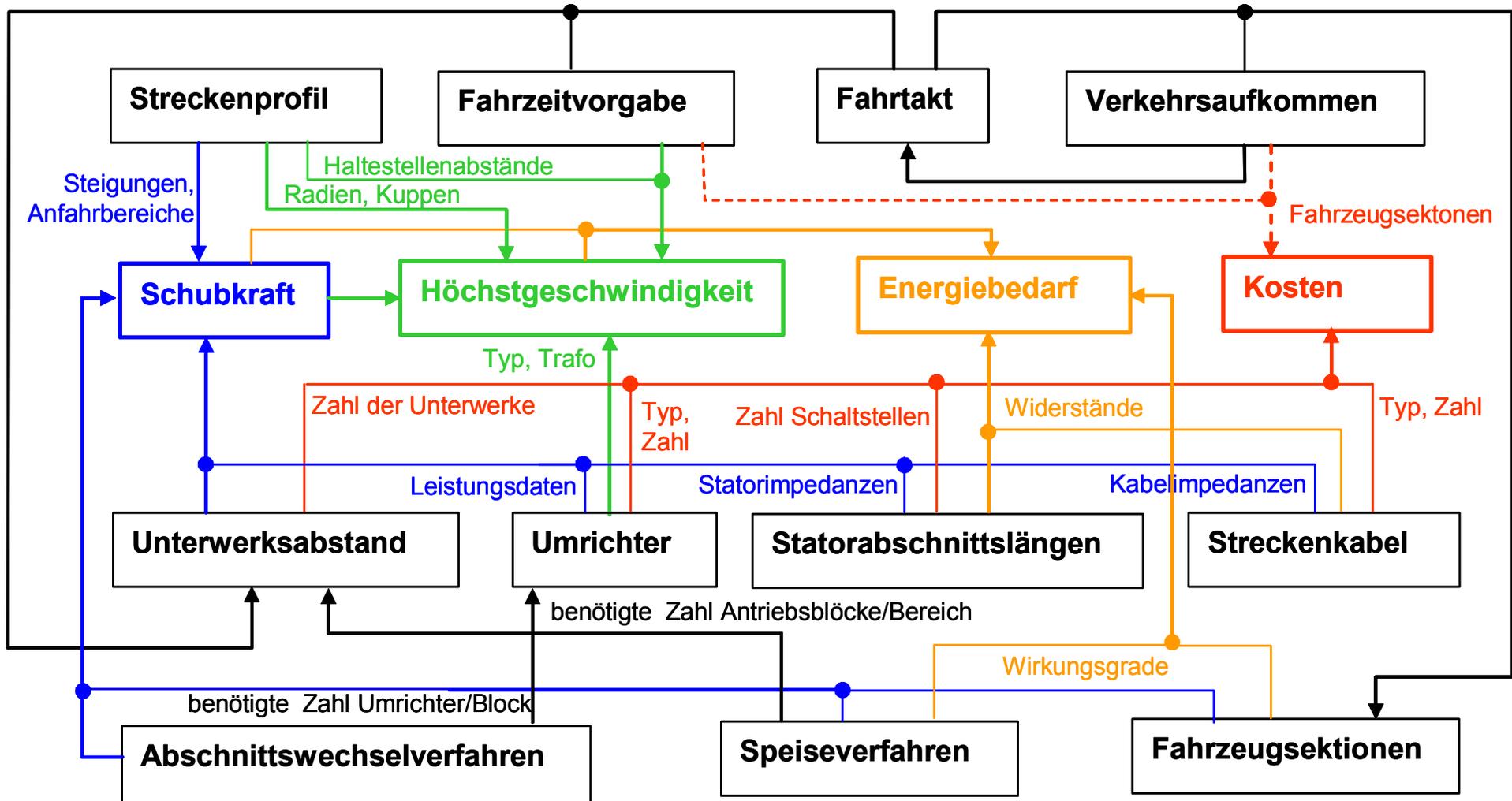
Statorabschnittslängen

Strecken Kabel

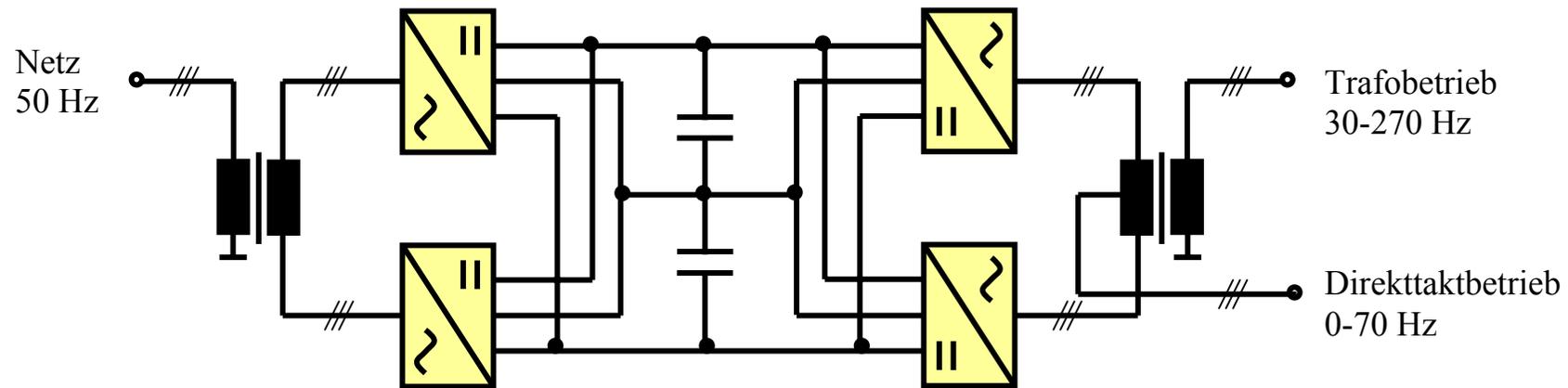
Abschnittswechselverfahren

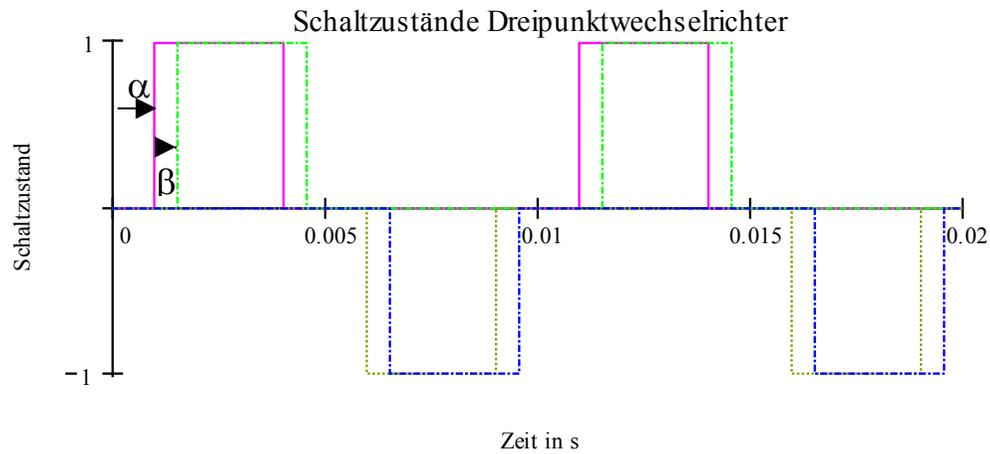
Speiseverfahren

Fahrzeugsektionen



Eingangstrafo Netzstromrichter Zwischenkreis Wechselrichter Ausgangstrafo

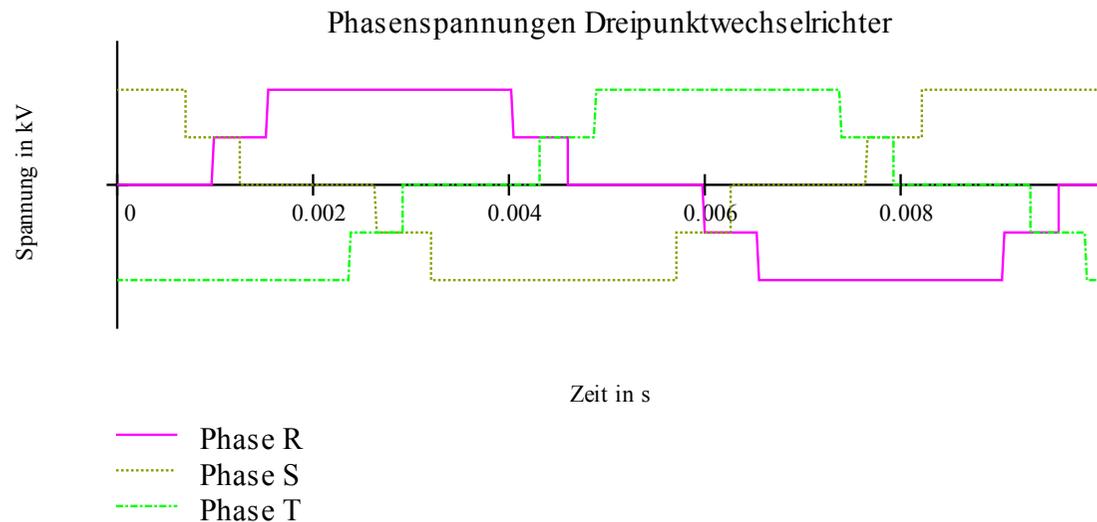


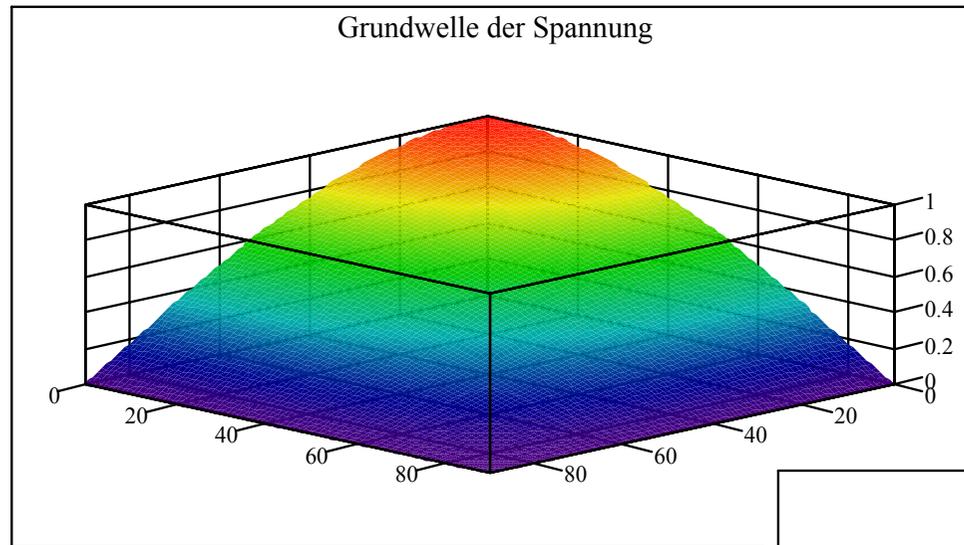


- Teil-Wechselrichter 1, positiv
- ⋯ Teilwechselrichter 1, negativ
- - - Teilwechselrichter 2, positiv
- · - · Teilwechselrichter 2, negativ

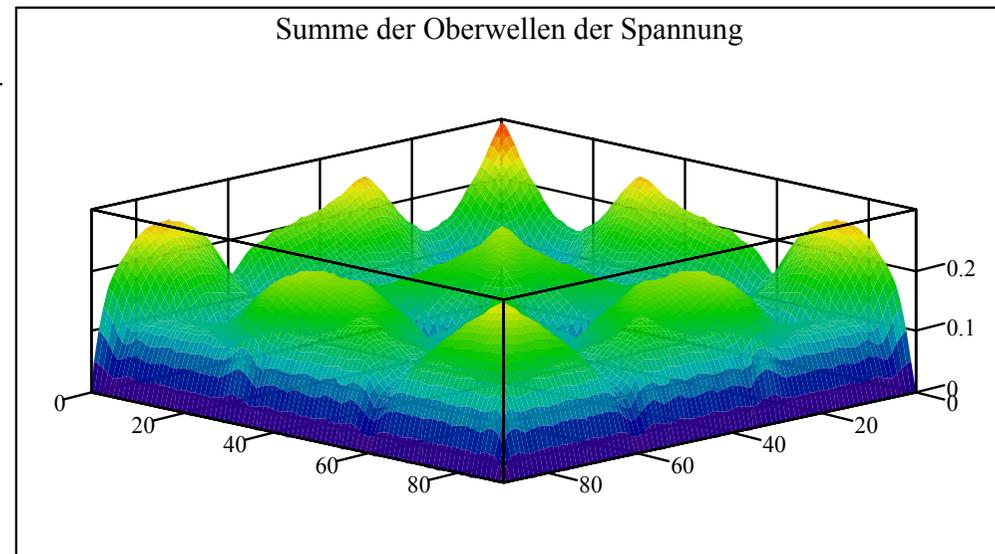
$\alpha$  = Steuerwinkel  
 $\beta$  = Schwenkwinkel

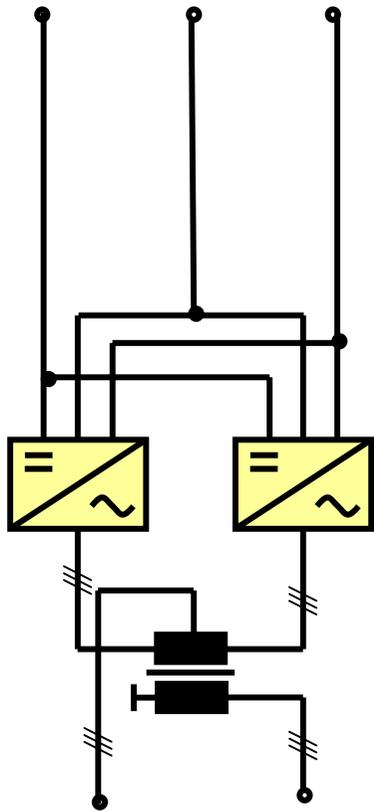
**Beispiel für Steuerwinkel  $35^\circ$   
 und Schwenkwinkel  $20^\circ$  bei  
 100 Hz Grundfrequenz**



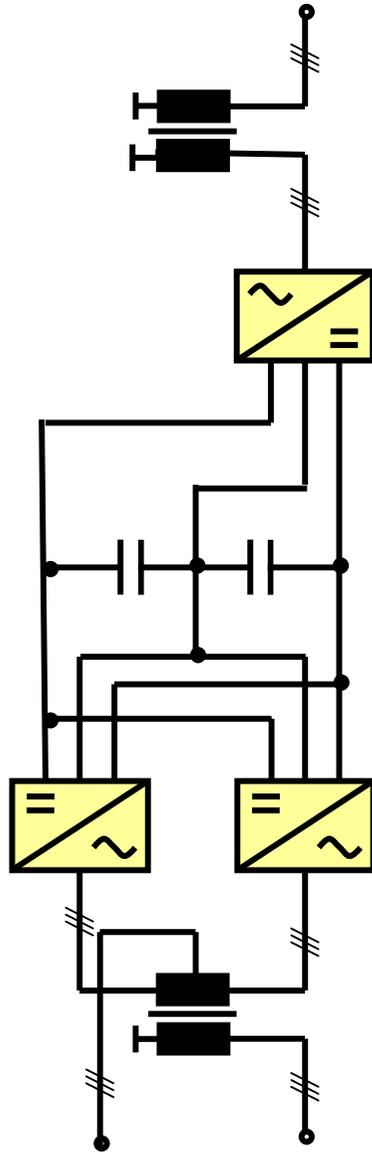


Grund- und Oberwellen sind nach oben gegen Schwenkwinkel (rechts) und Steuerwinkel (links) aufgetragen

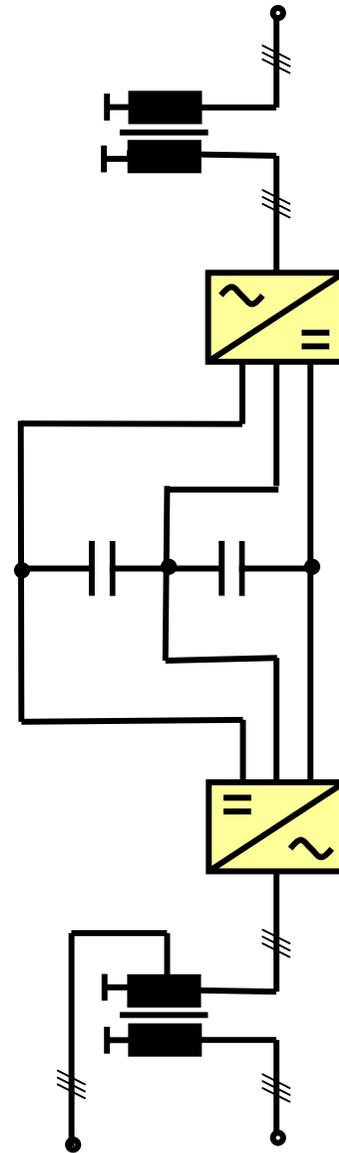




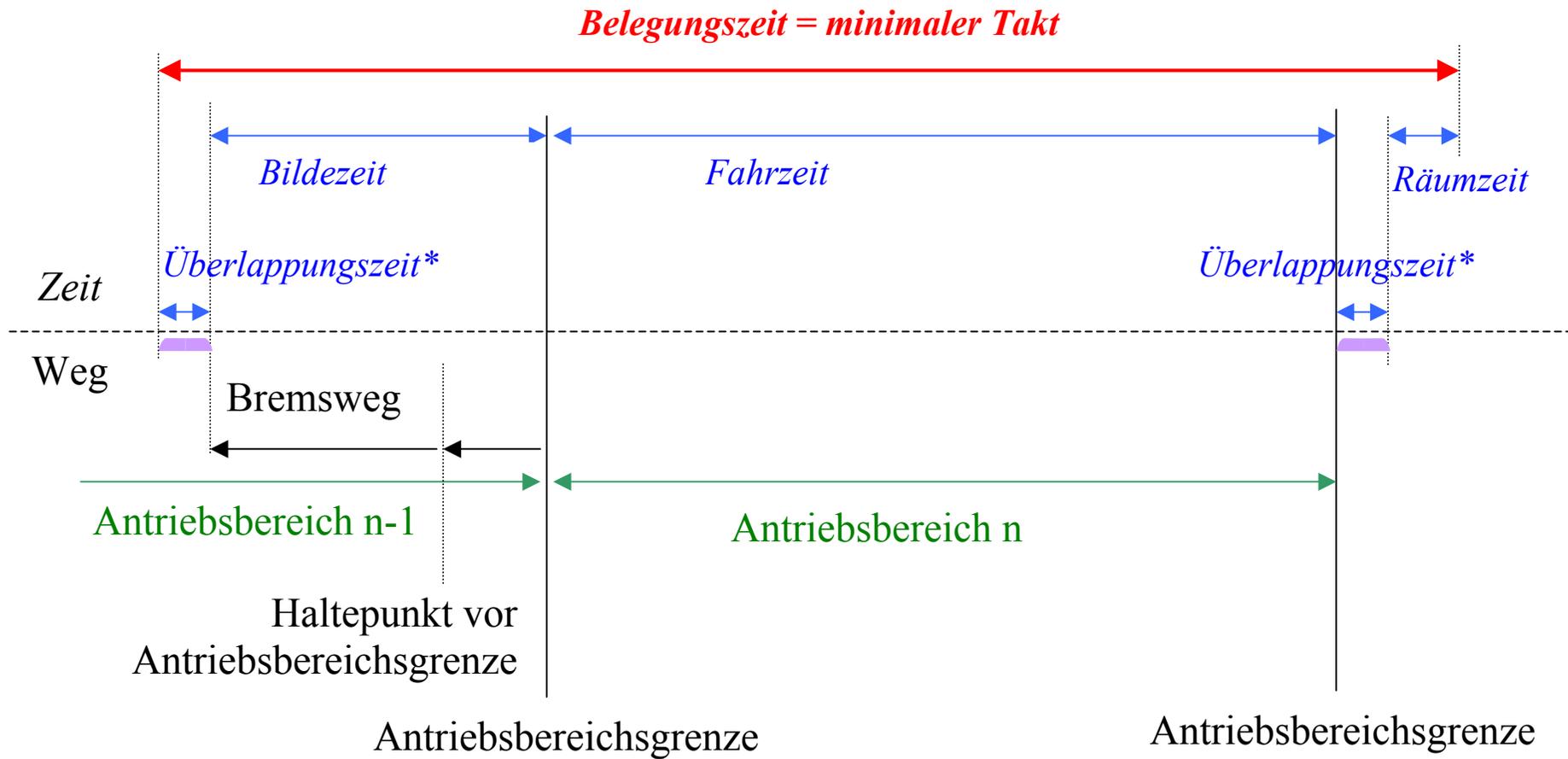
Umrichter mit ausgelagertem Netzteil



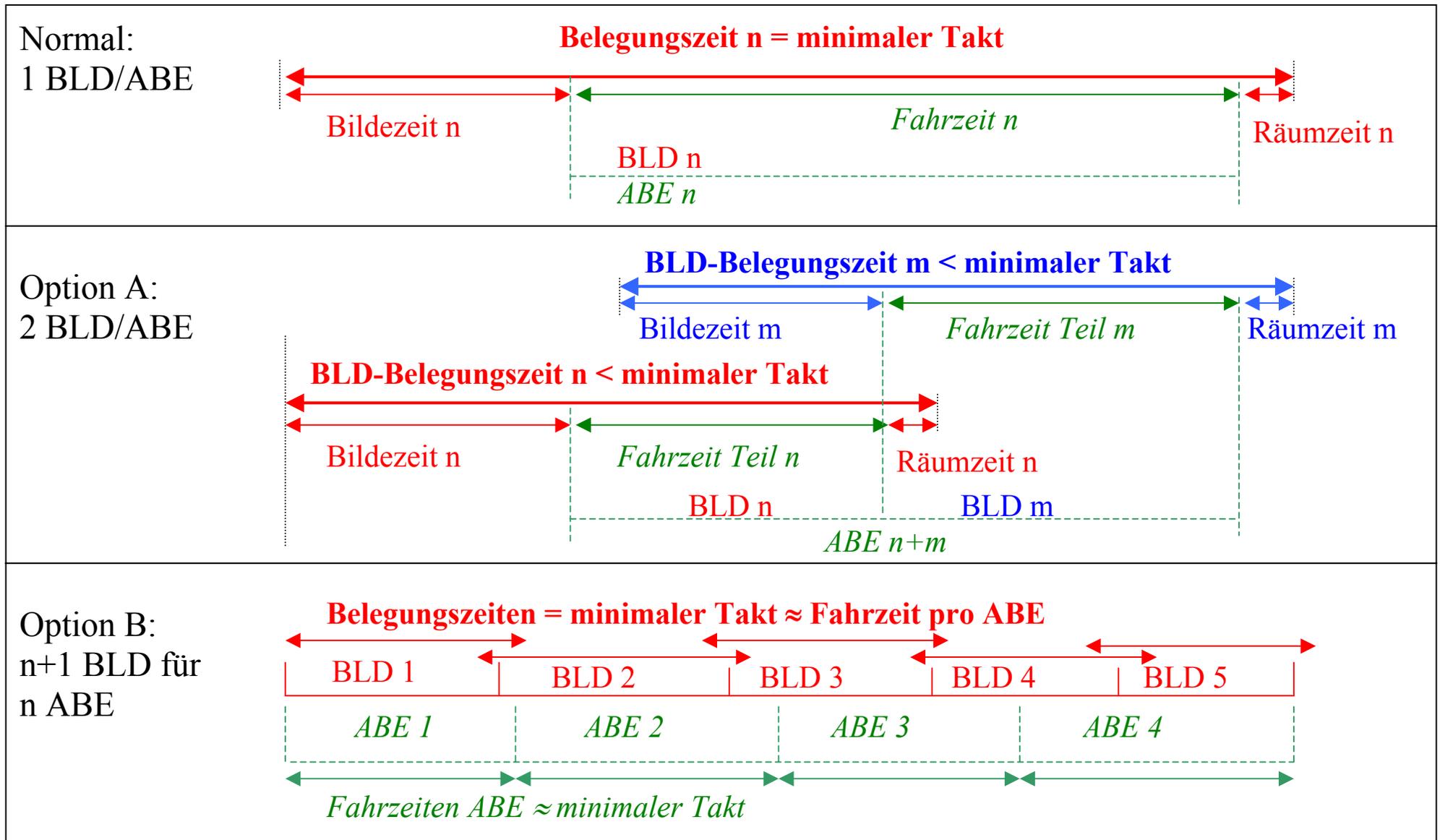
Umrichter mit halber Leistung am Netzteil



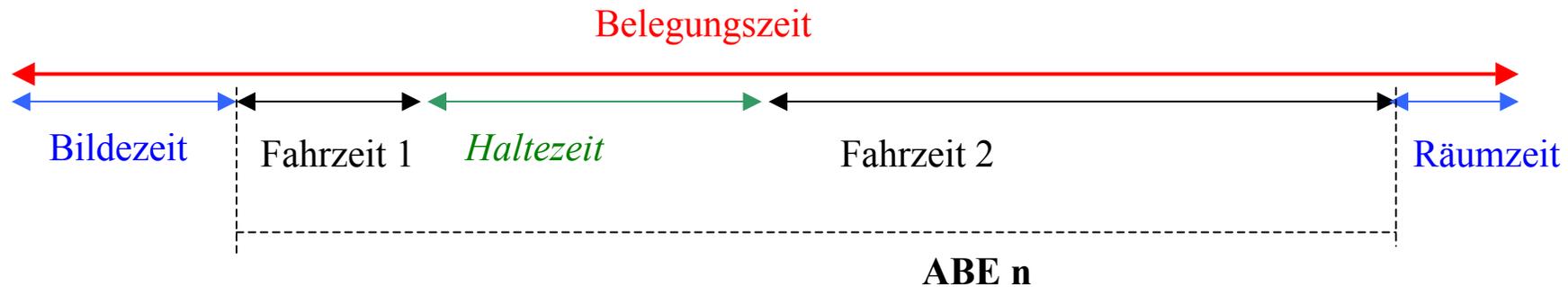
Umrichter mit halber Leistung



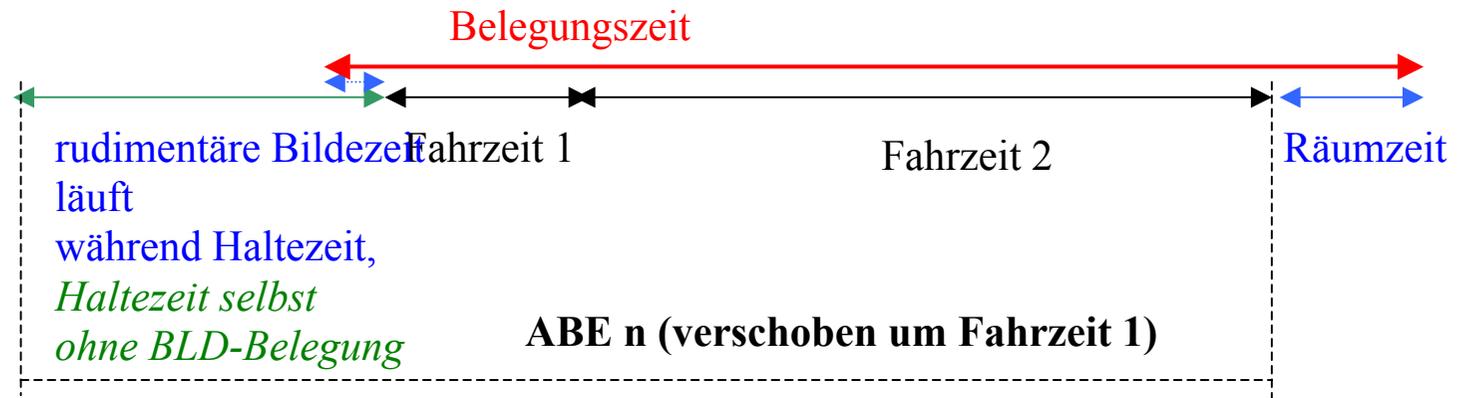
*\* kann auch in Fahrzeit, Bilde- oder Räumzeit berücksichtigt werden*

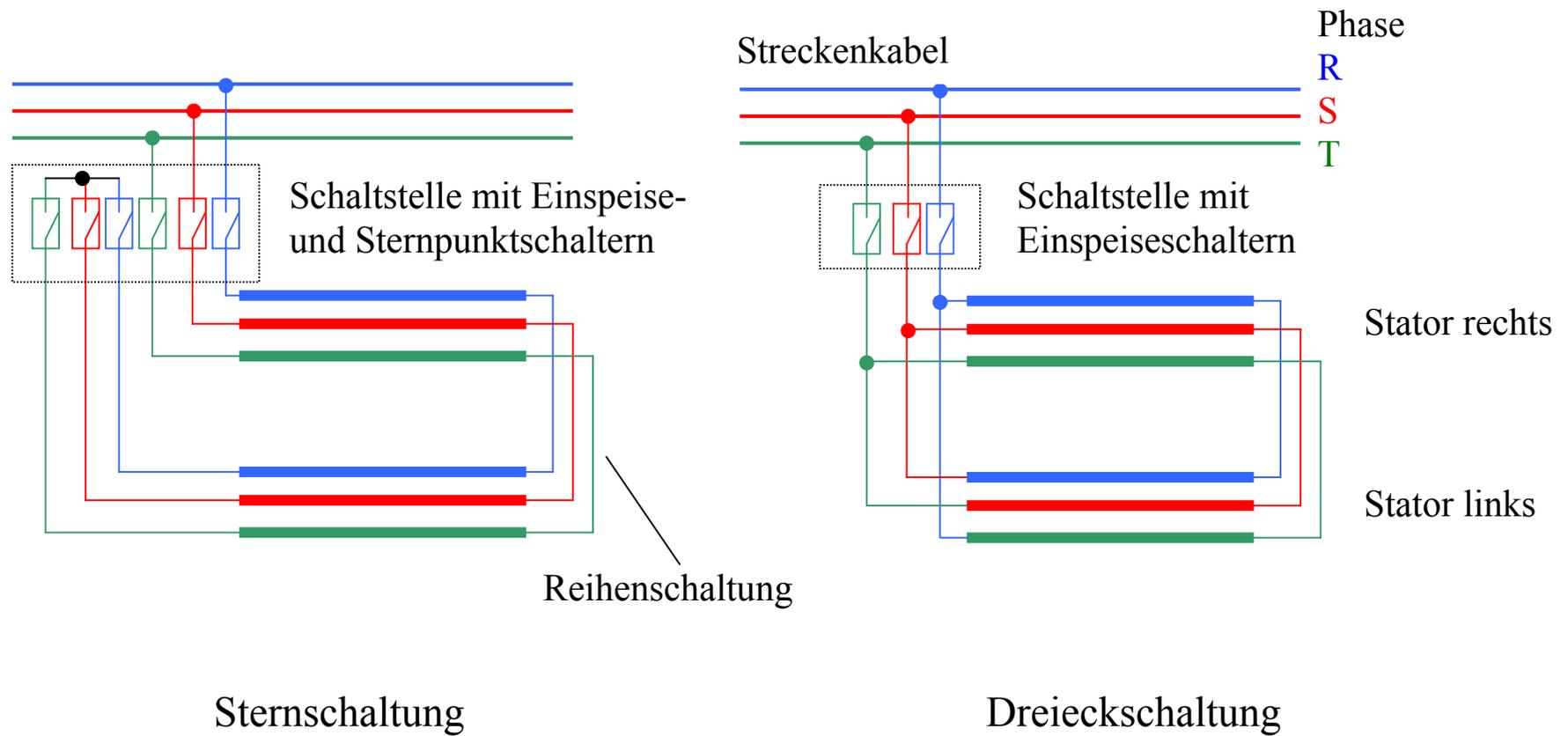


***Herkömmliche Anordnung:***

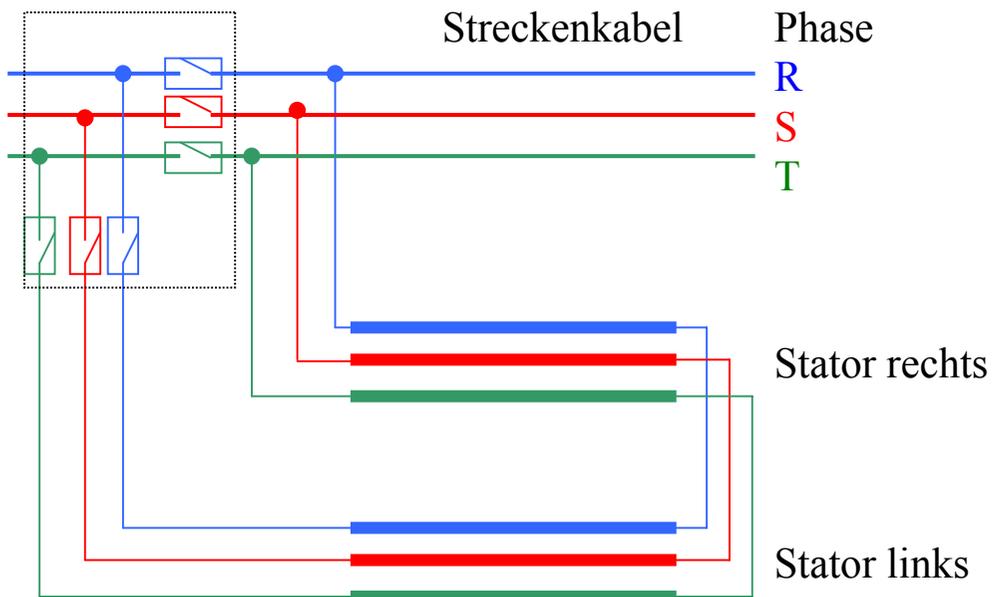


***Verschiebung Antriebsbereichsgrenze in Station:***

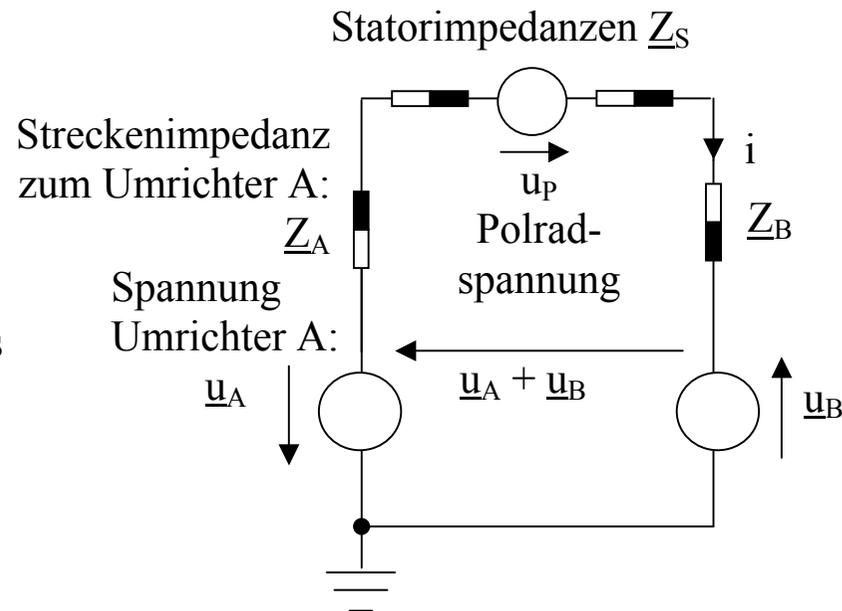




Schaltstelle mit Einspeise- und Trennschaltern

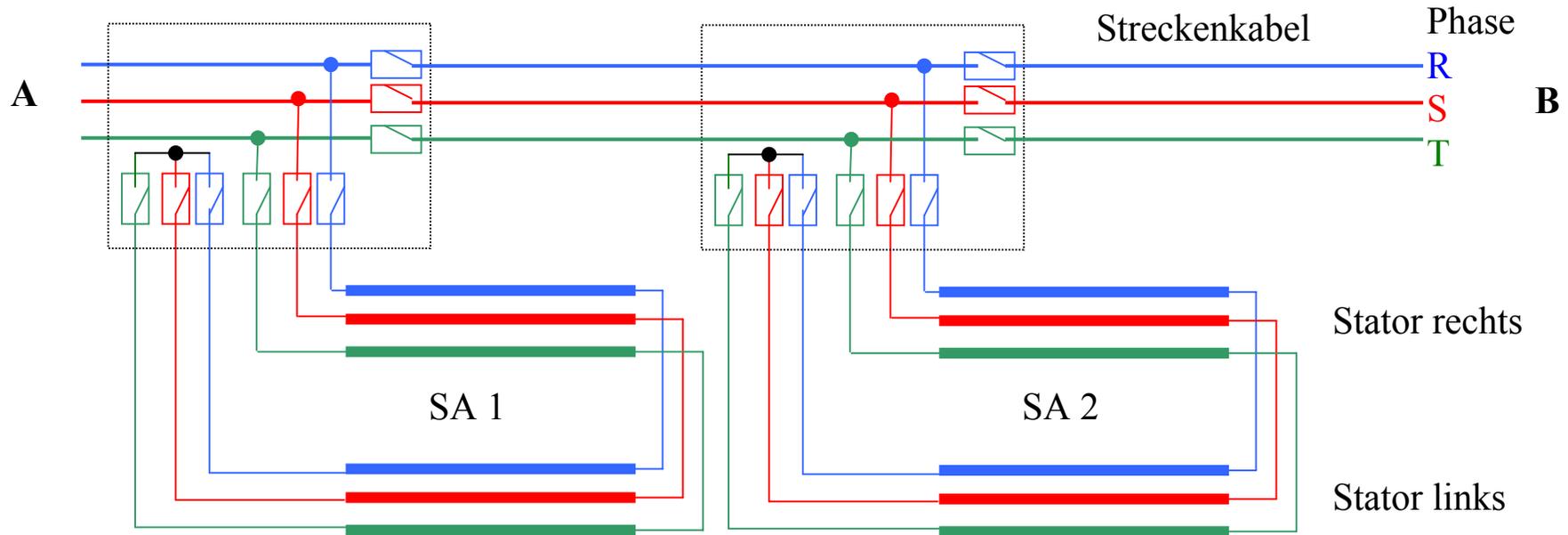


Offene Sternschaltung

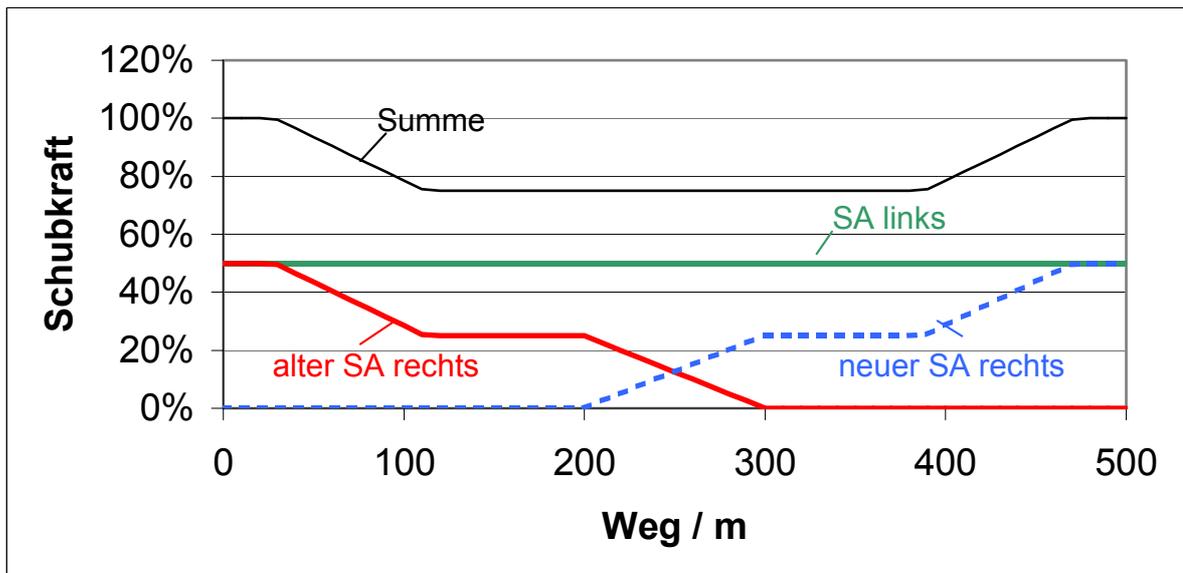
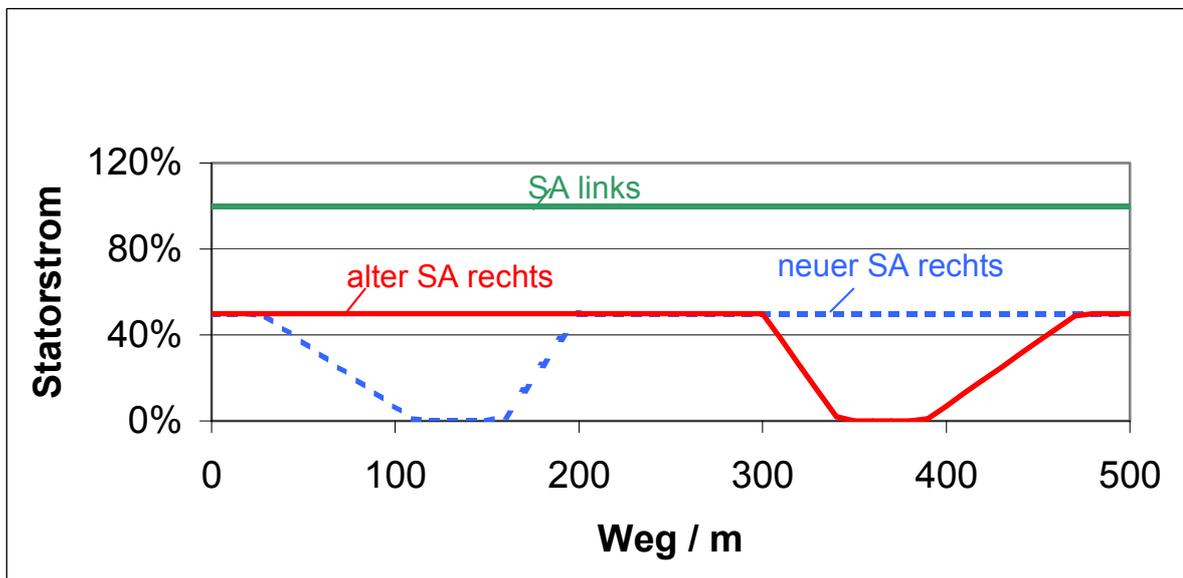
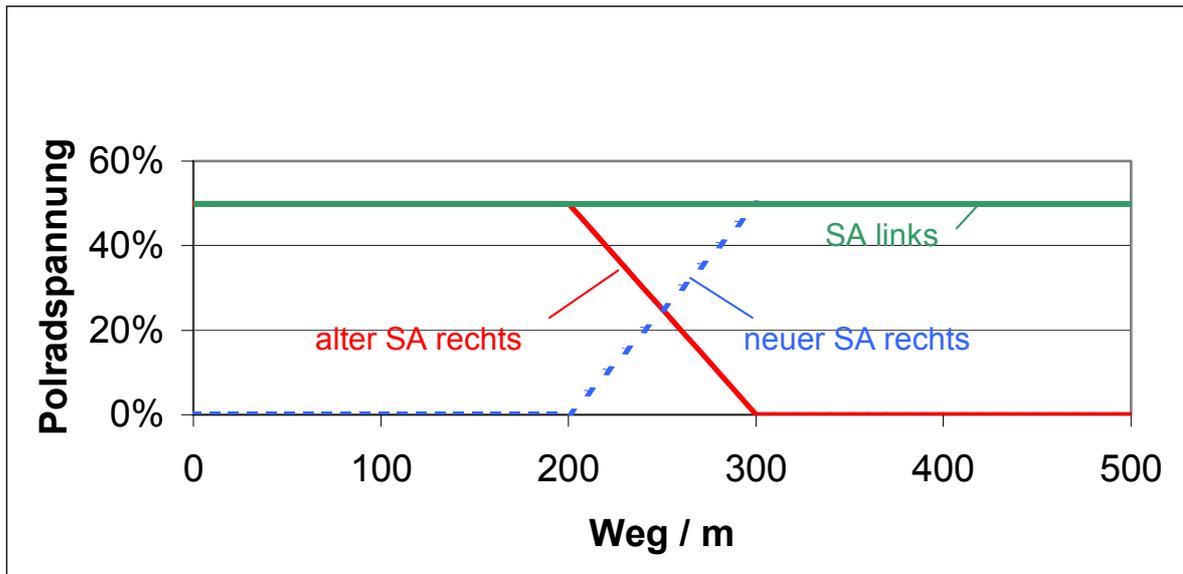


Einphasiges Ersatzschaltbild

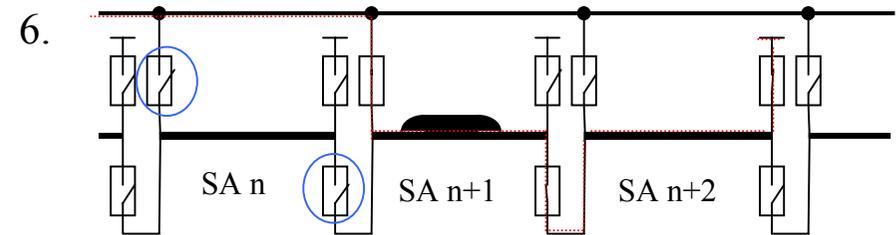
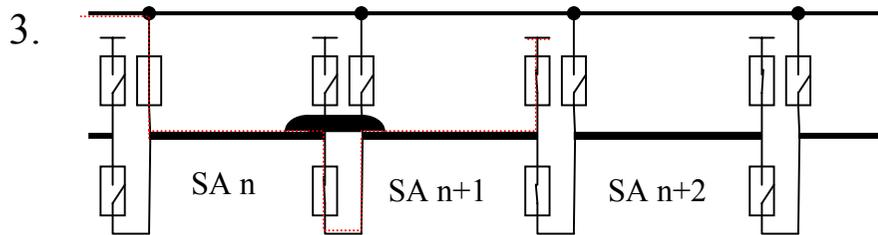
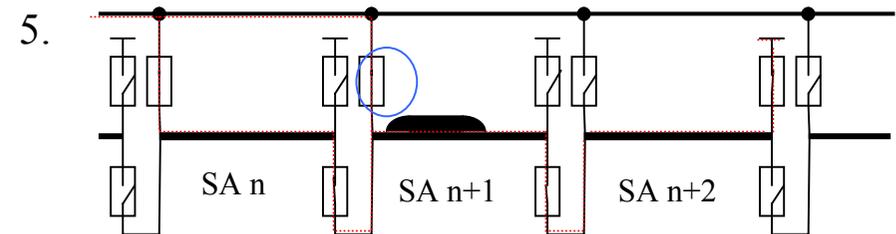
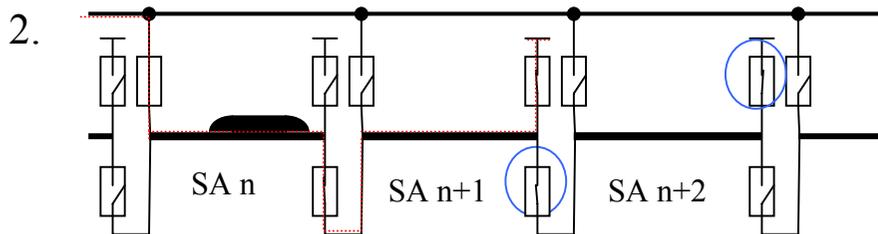
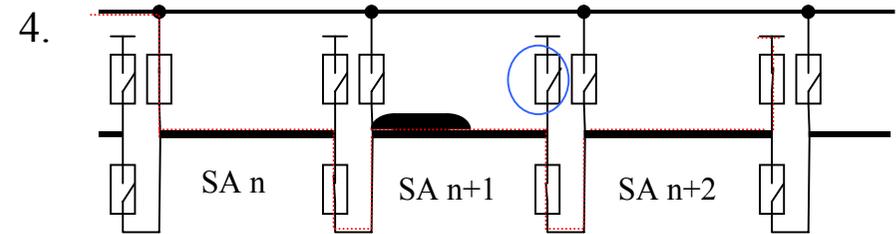
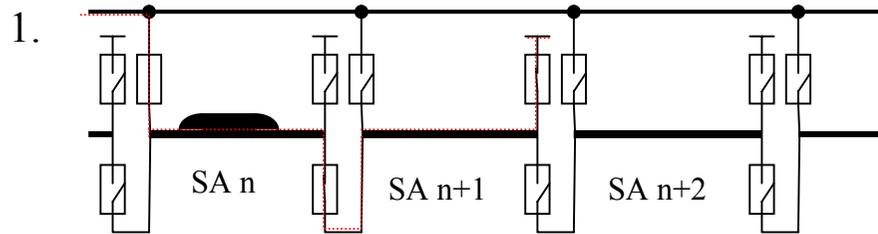
Schaltstelle mit Stern-, Einspeise- und Trennschaltern



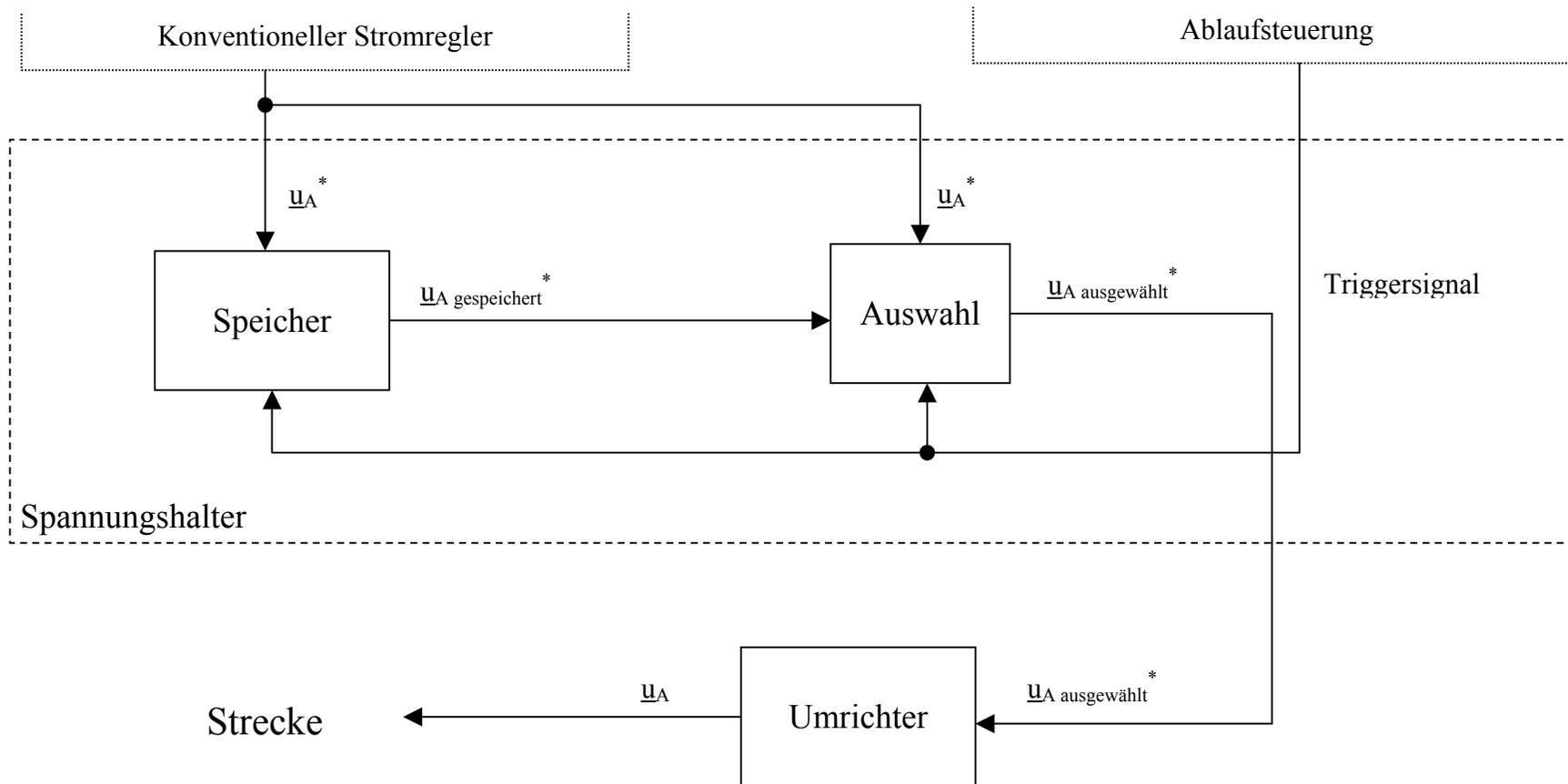
Jeder SA kann entweder doppelt aus Richtung A und B gespeist werden (Trennschalter geschlossen) oder zwei SA gleichzeitig, einer aus Richtung A, der zweite aus Richtung B (Trennschalter SA 1 offen)

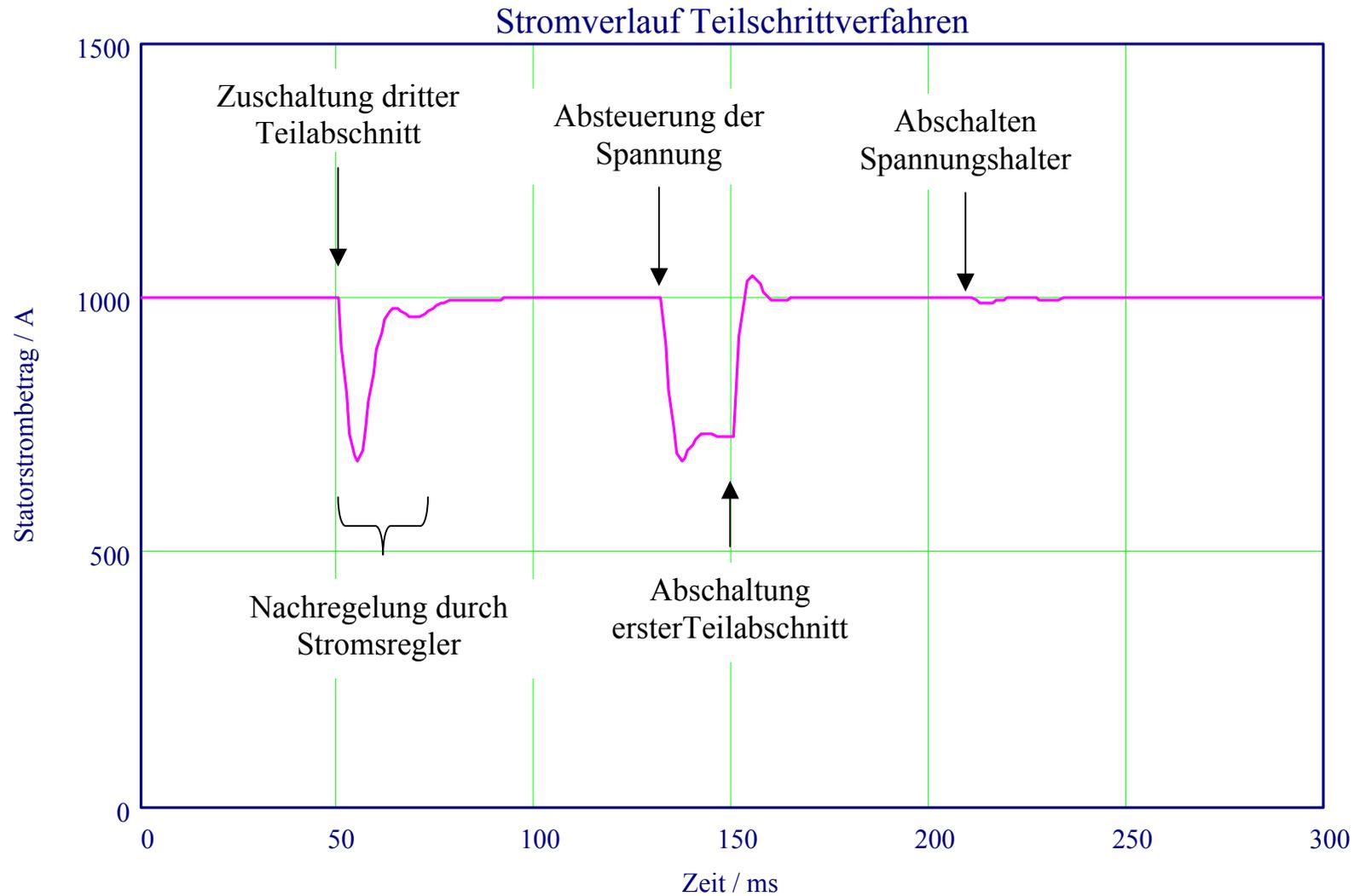


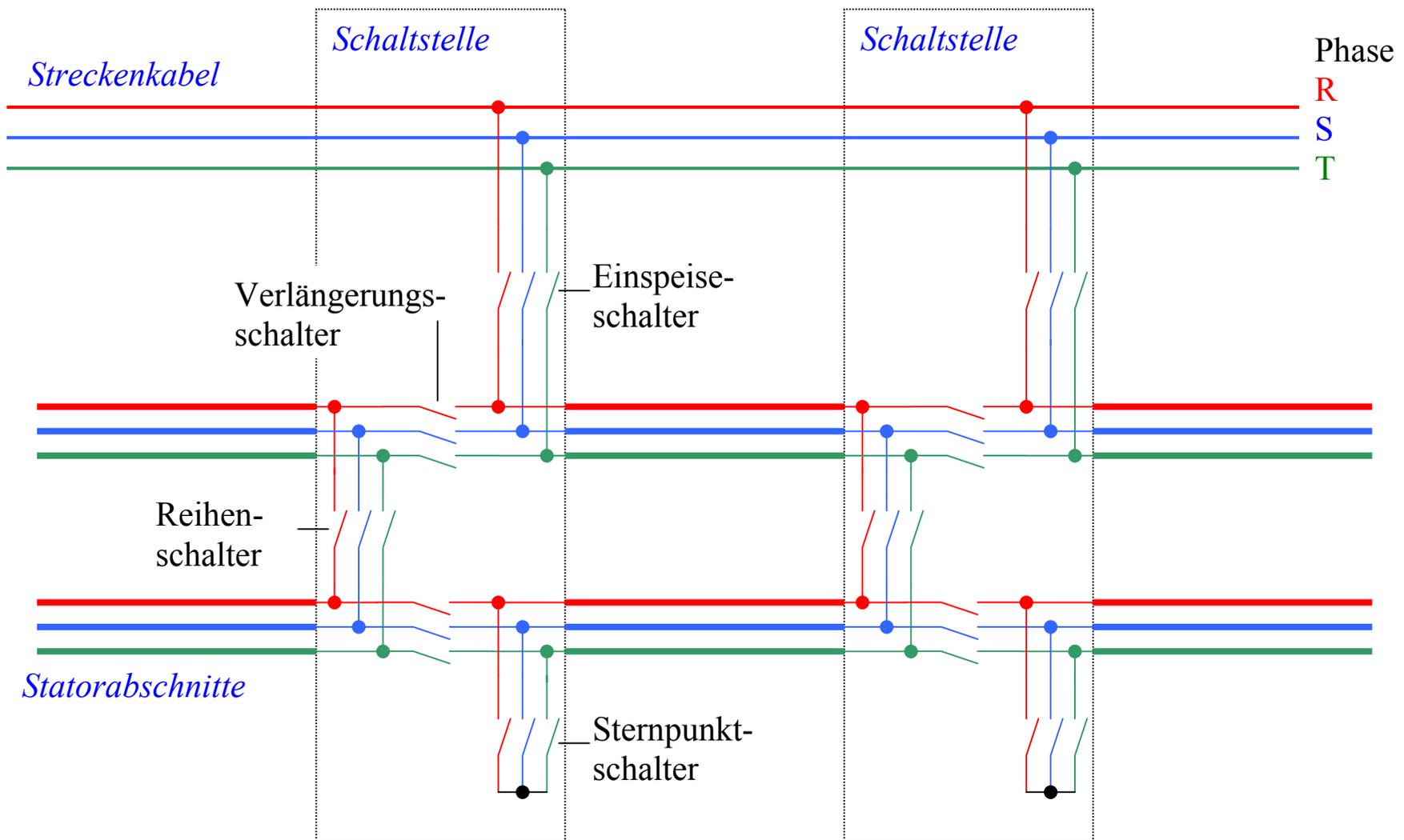
**Magnetschnellbahn für den schnellen Regionalverkehr –  
Optimierung des Langstatorantriebs und der Energieversorgung**

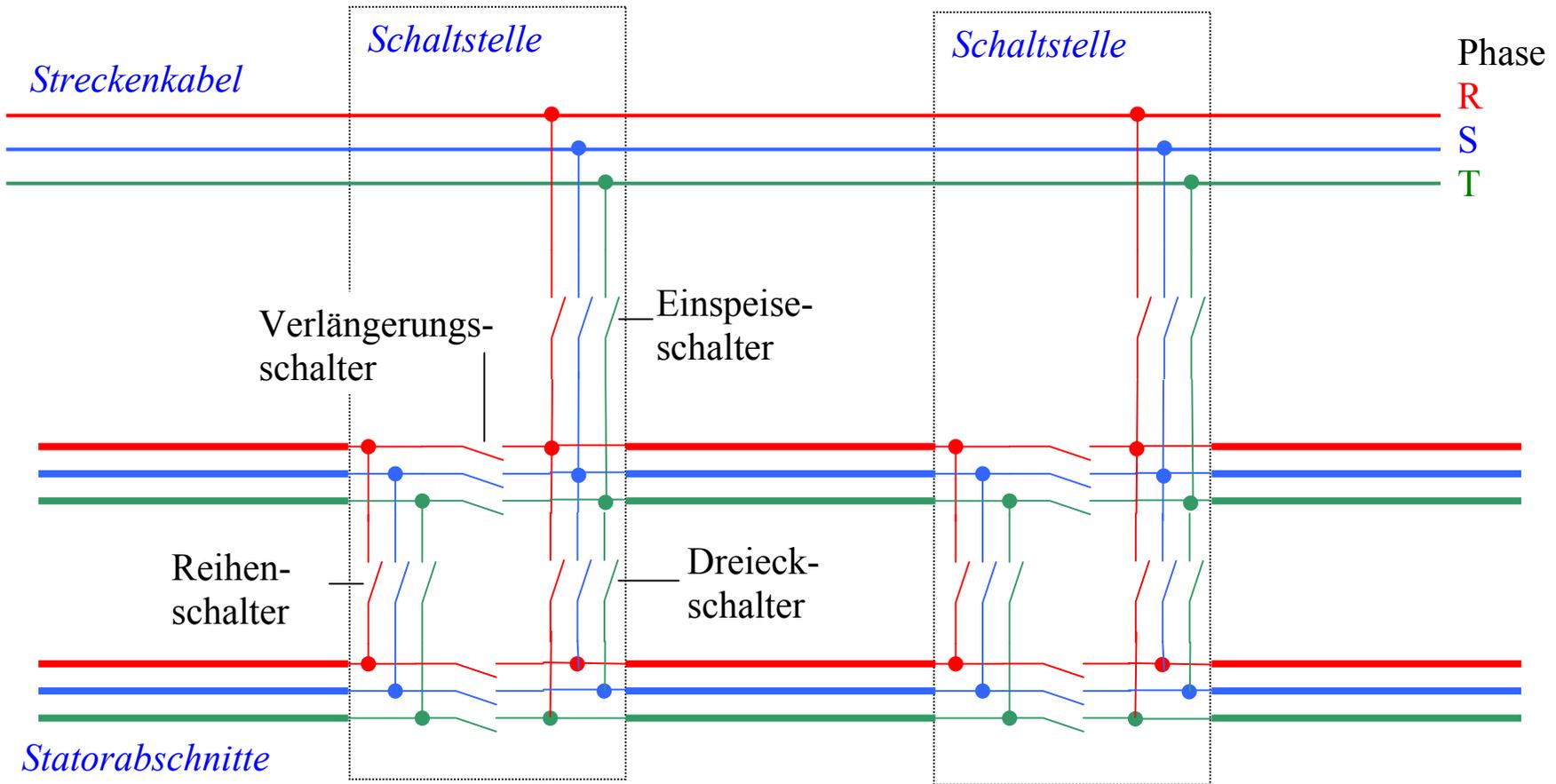


 kennzeichnet Schaltvorgang

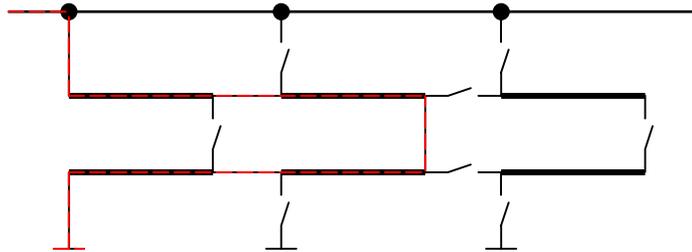




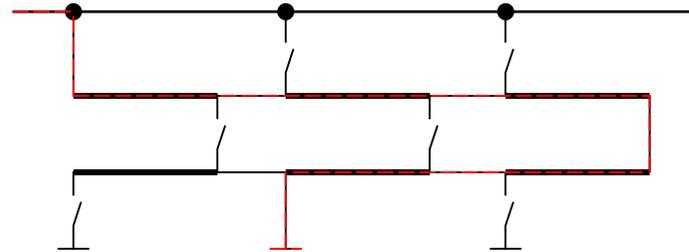




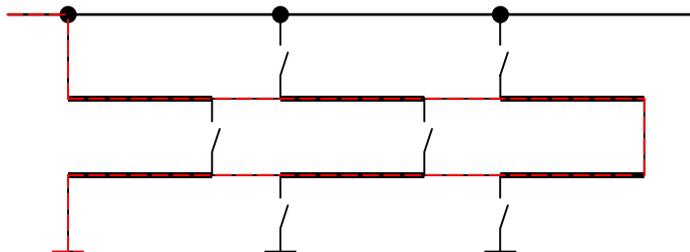
1. Ausgangszustand



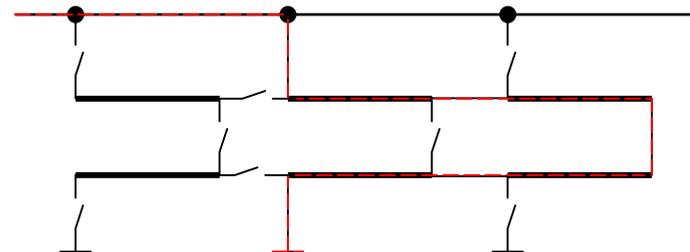
3. Abschaltung halber SA



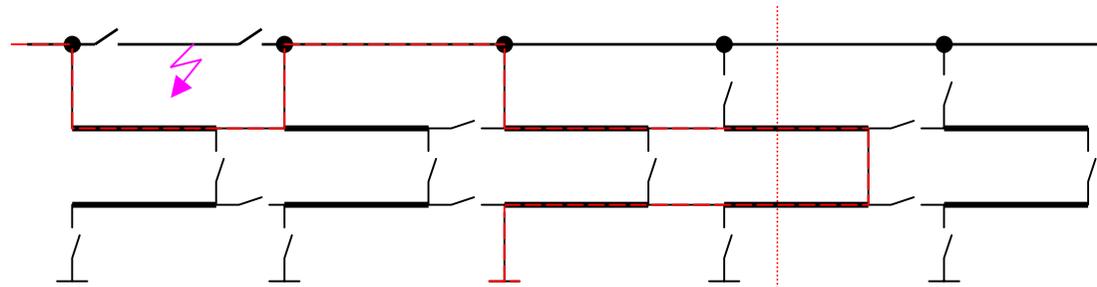
2. Zuschaltung neuer SA



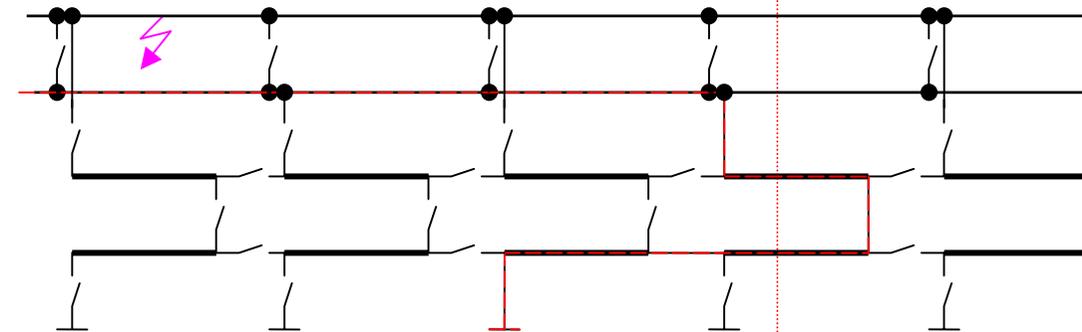
4. Endzustand



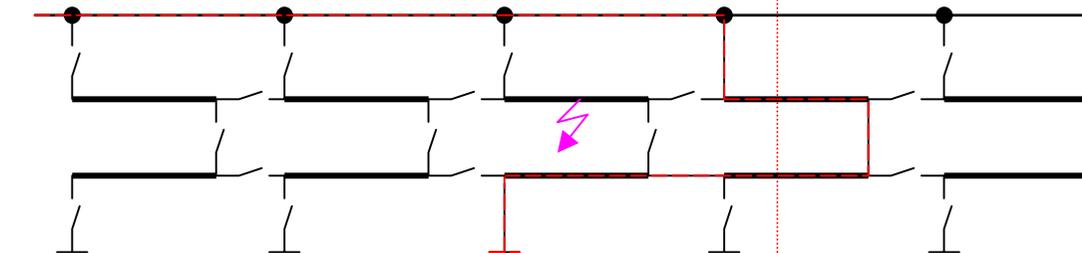
1. Strecken-kabel defekt,  
1 Streckenkabelsystem



2. Strecken-kabel defekt,  
2 parallel schaltbare  
Strecken-kabelsysteme

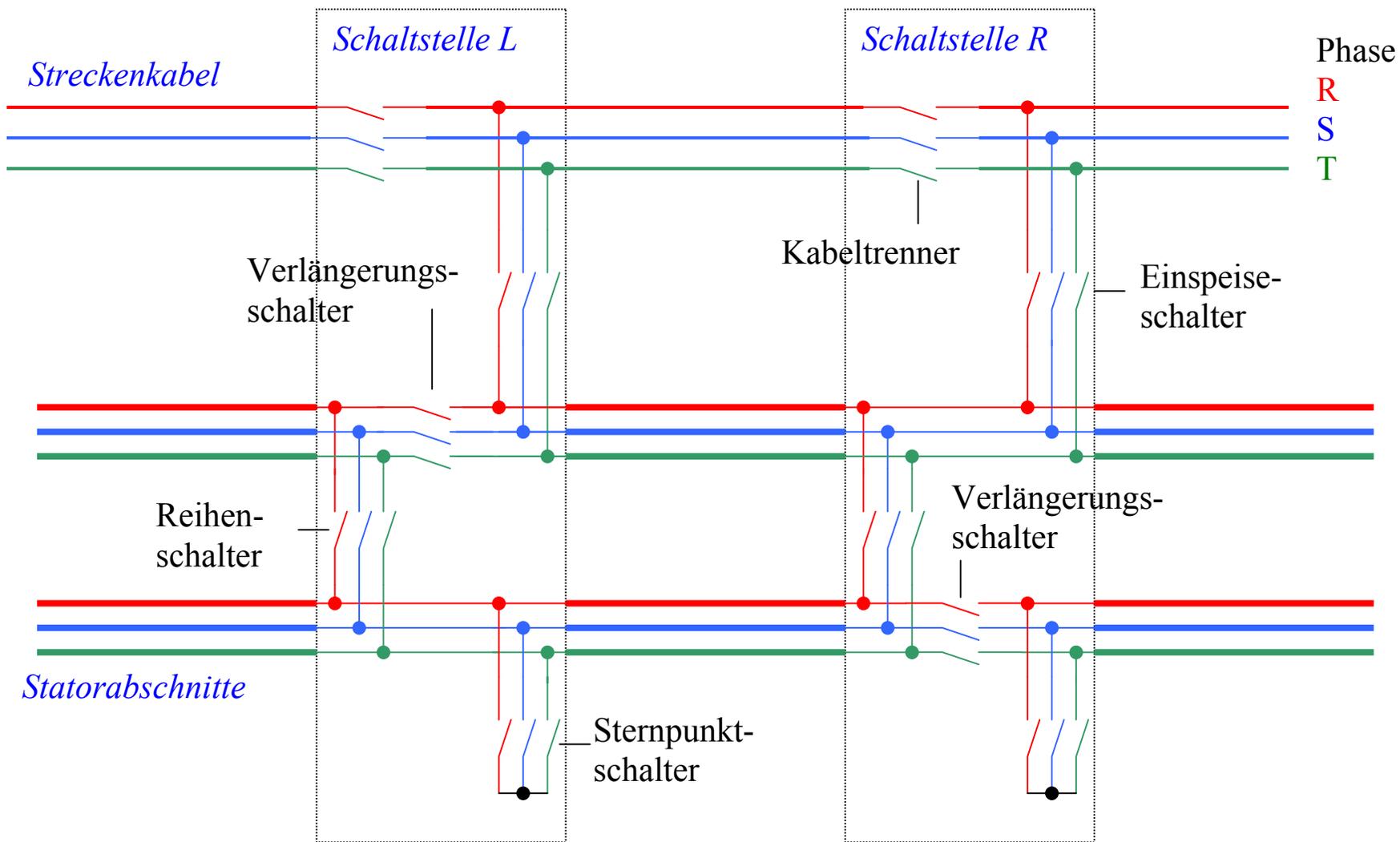


3. Statorabschnitt defekt

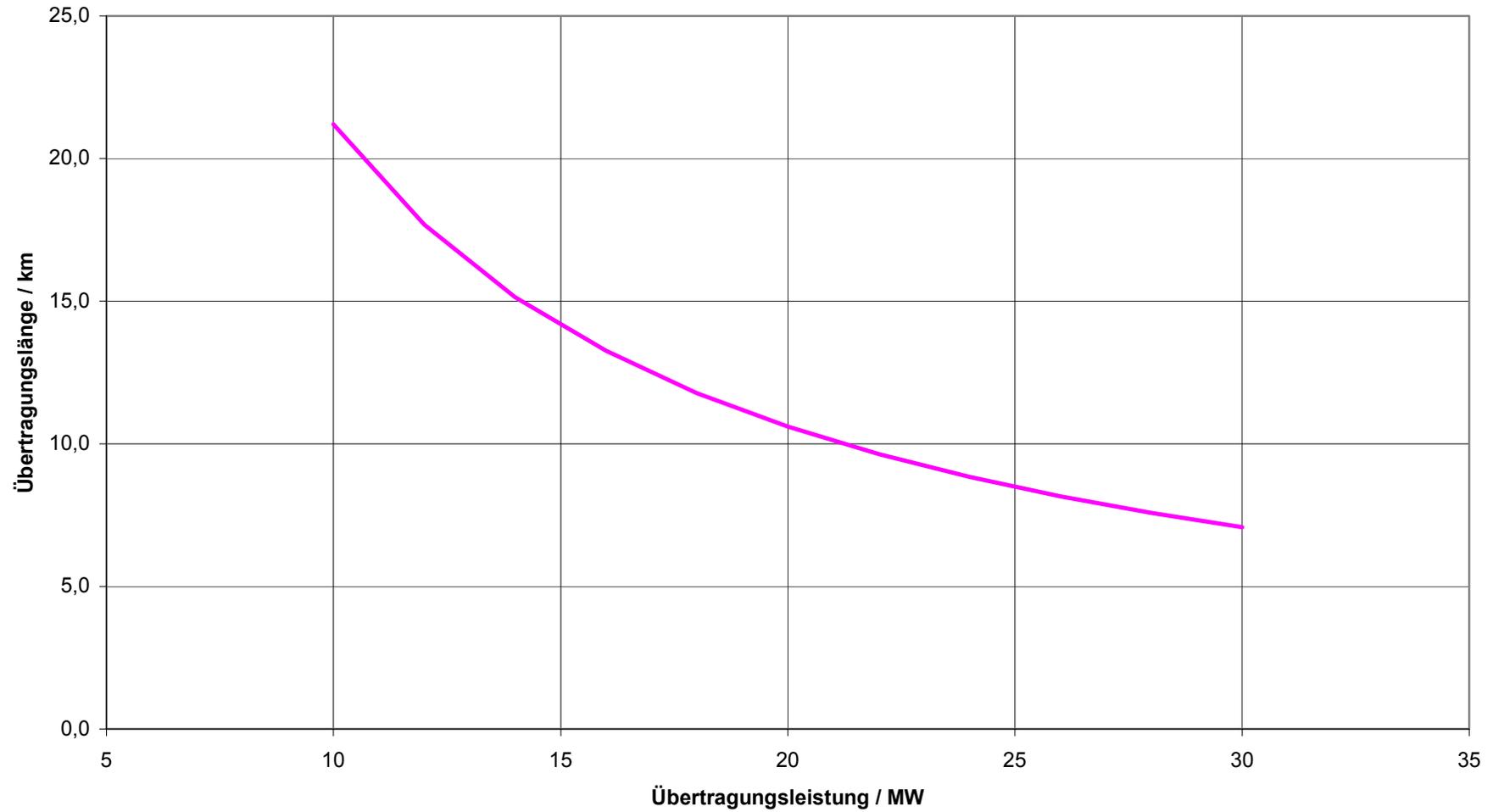


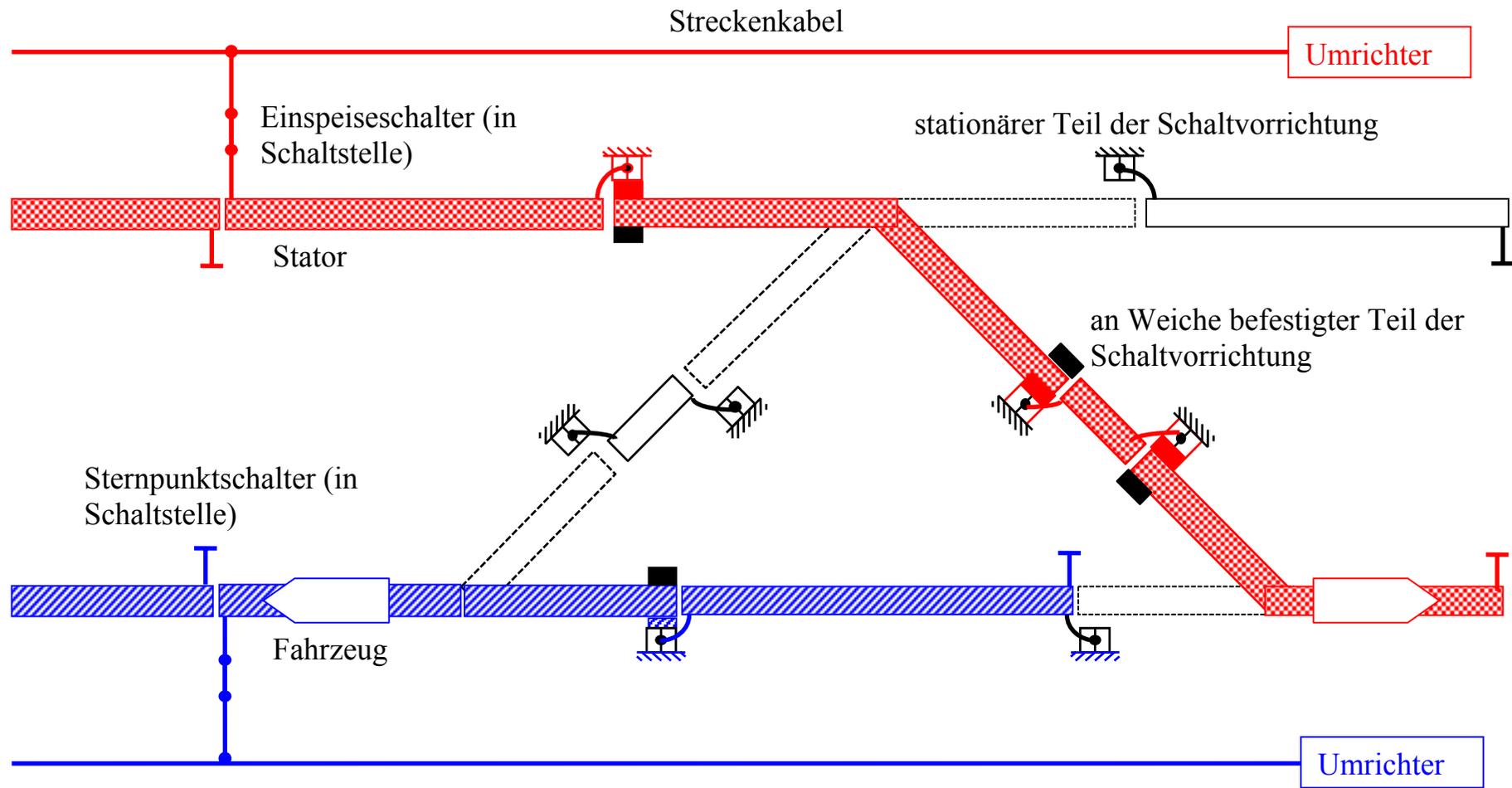
⚡ symbolisiert defekte Stelle

einzuweisender Statorabschnitt



### Leistungsübertragung 20 kV (500 mm<sup>2</sup> Leiterquerschnitt)





Technische Fahrzeit  Zeit

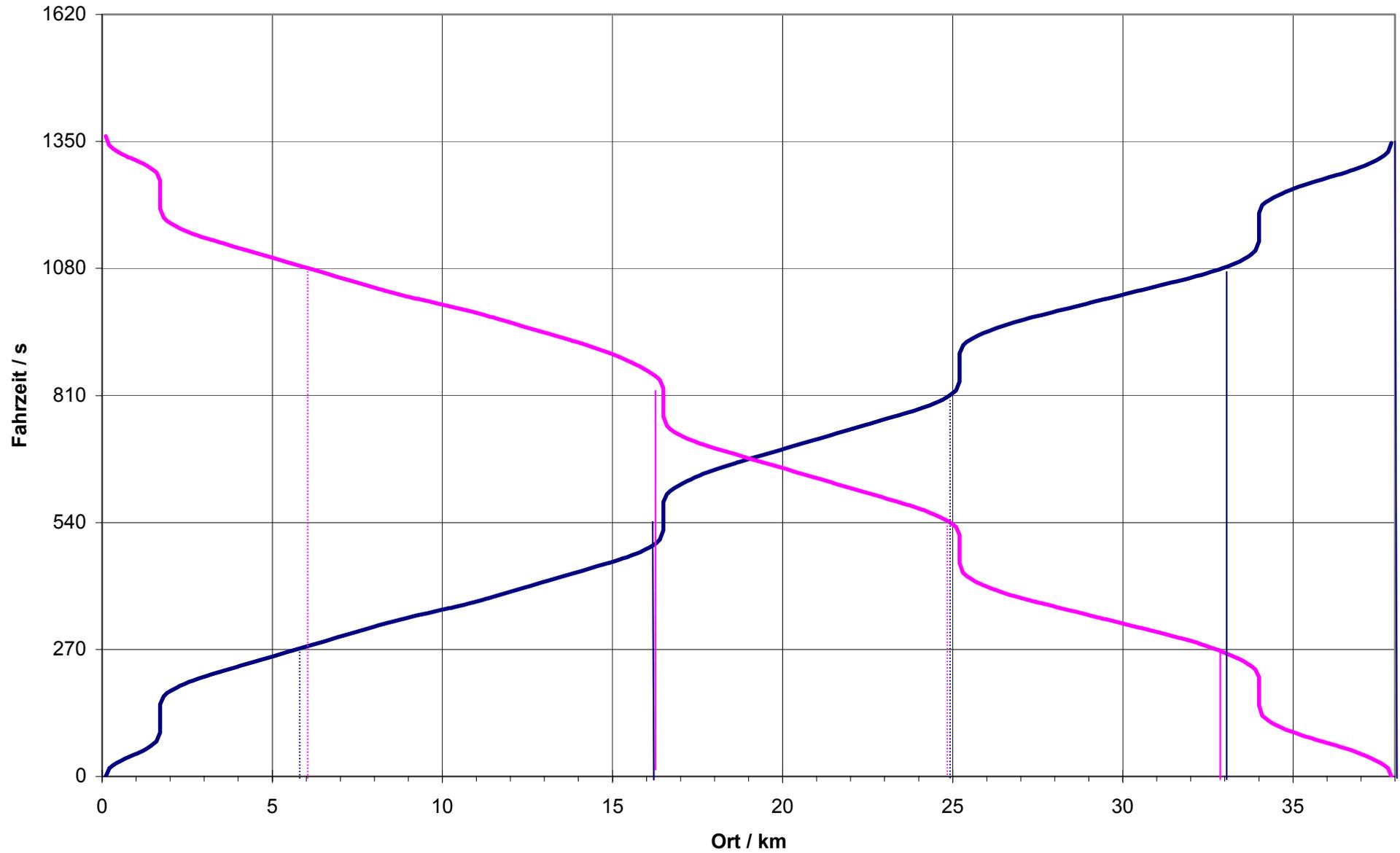
Einteilung in n gleiche Teile:  Zeit



Ortsermittlung über Weg-Zeit-Diagramm,  
Richtung a ...  Ort

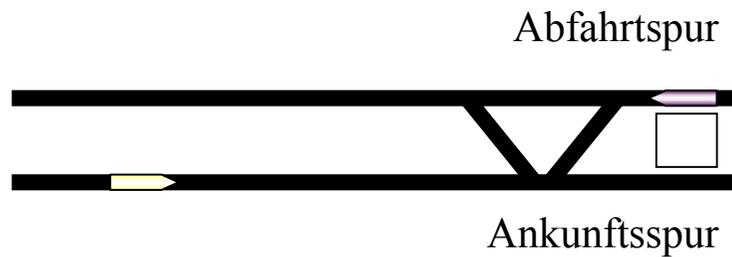
... und Richtung b  Ort

Festlegung der  
Unterwerks-Standorte  
zwischen den Orten  
beider Richtungen  Ort

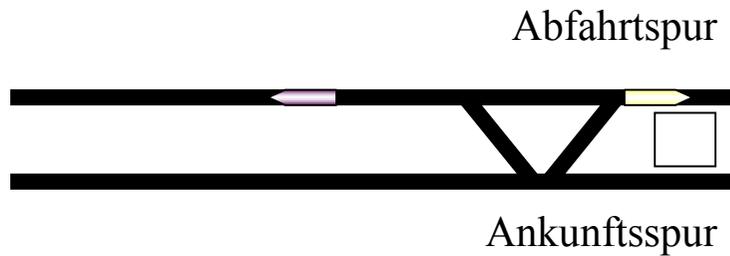


### Fall1: Kreuzen bei Einfahrt

Gleisbelegung um :00

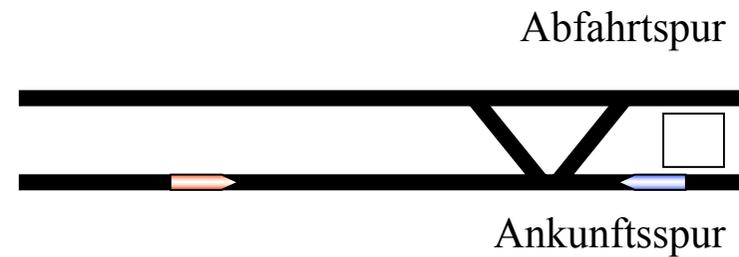


Gleisbelegung um :02

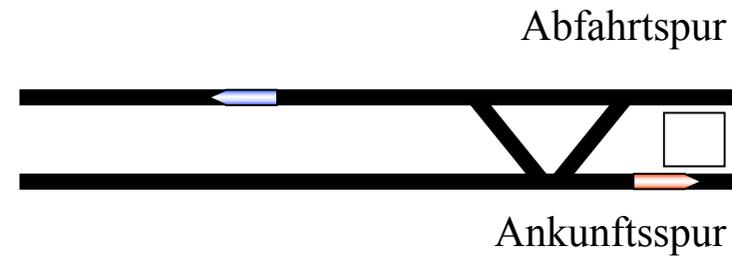


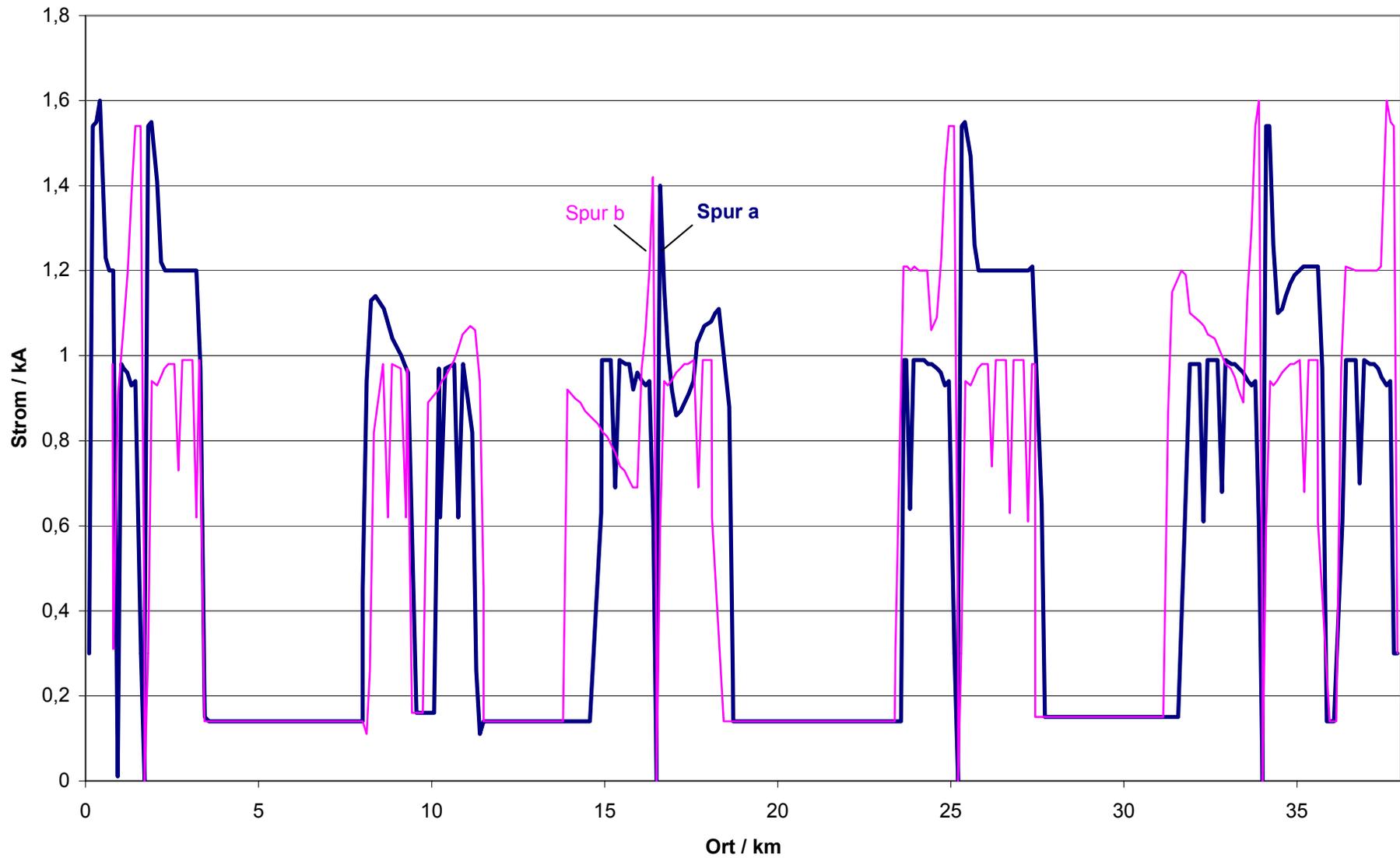
### Fall2: Kreuzen bei Ausfahrt

Gleisbelegung um :15

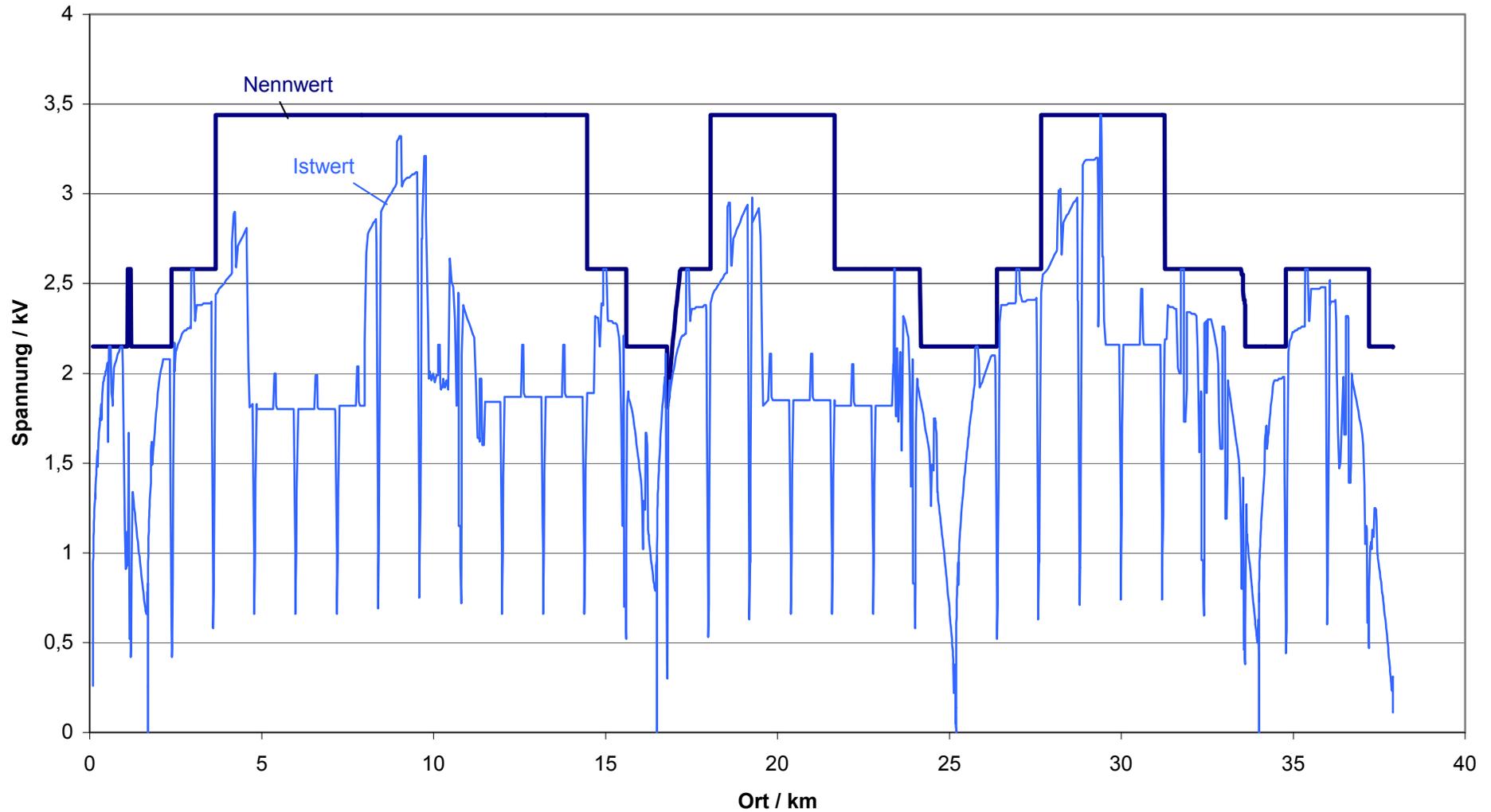


Gleisbelegung um :17

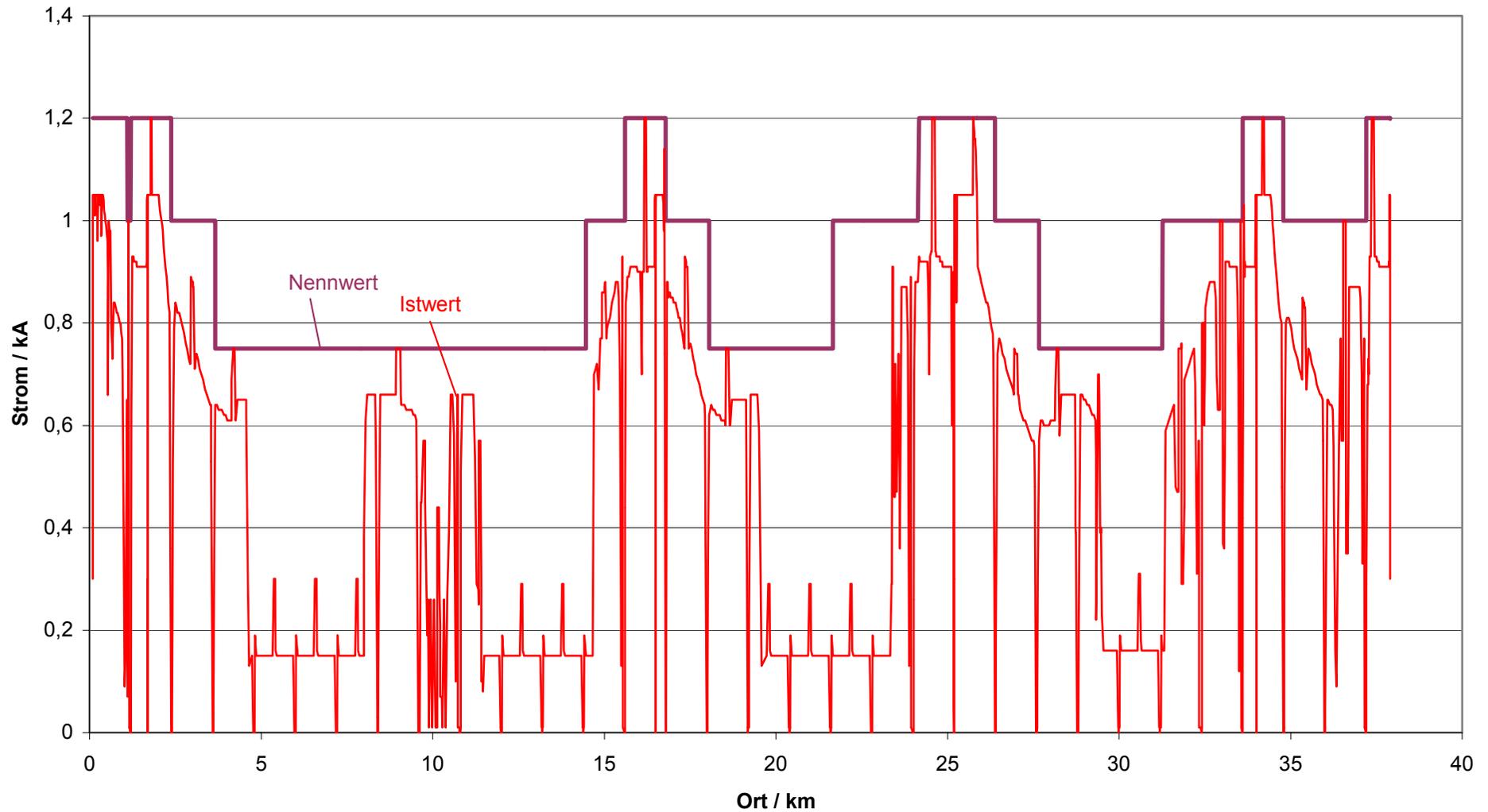


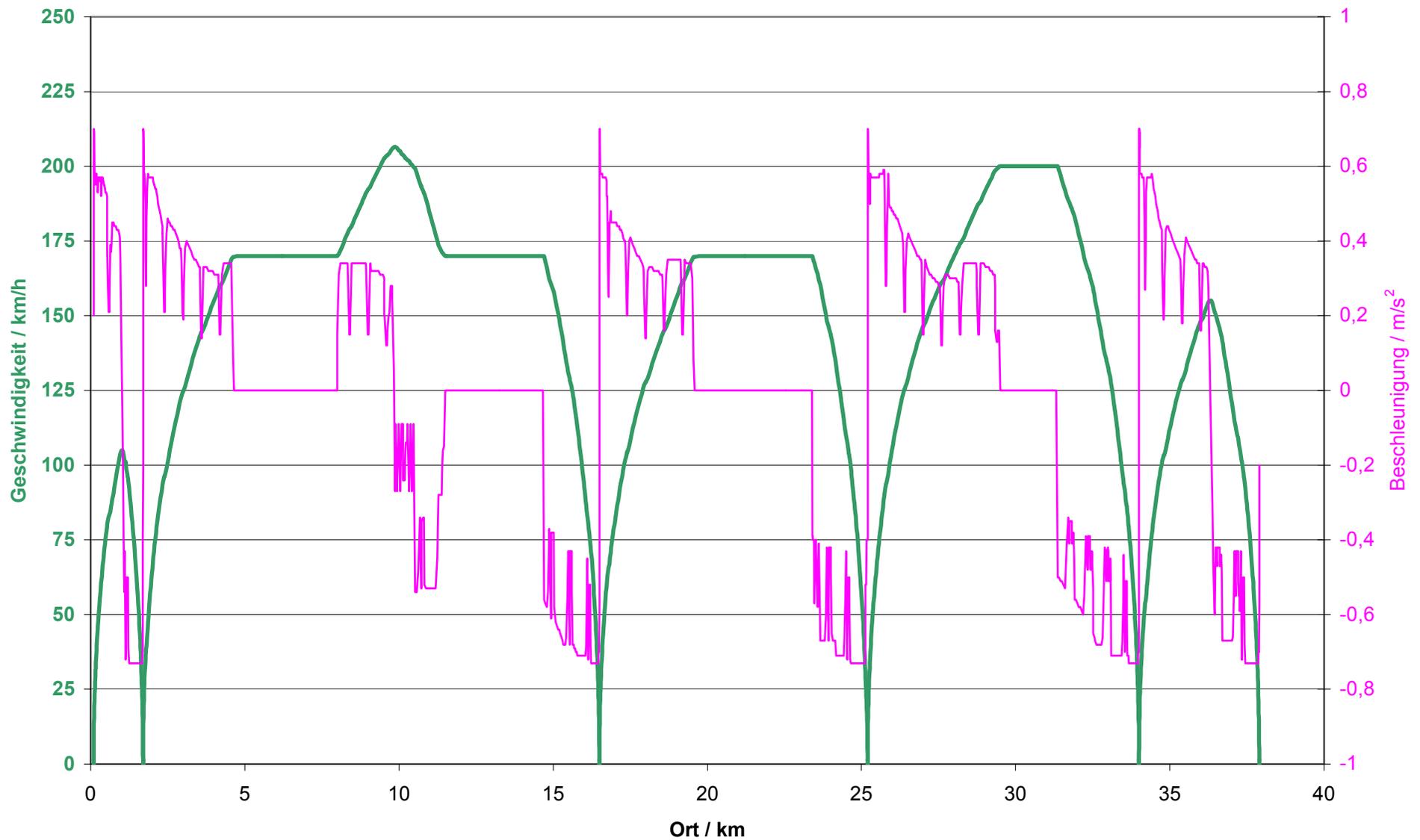


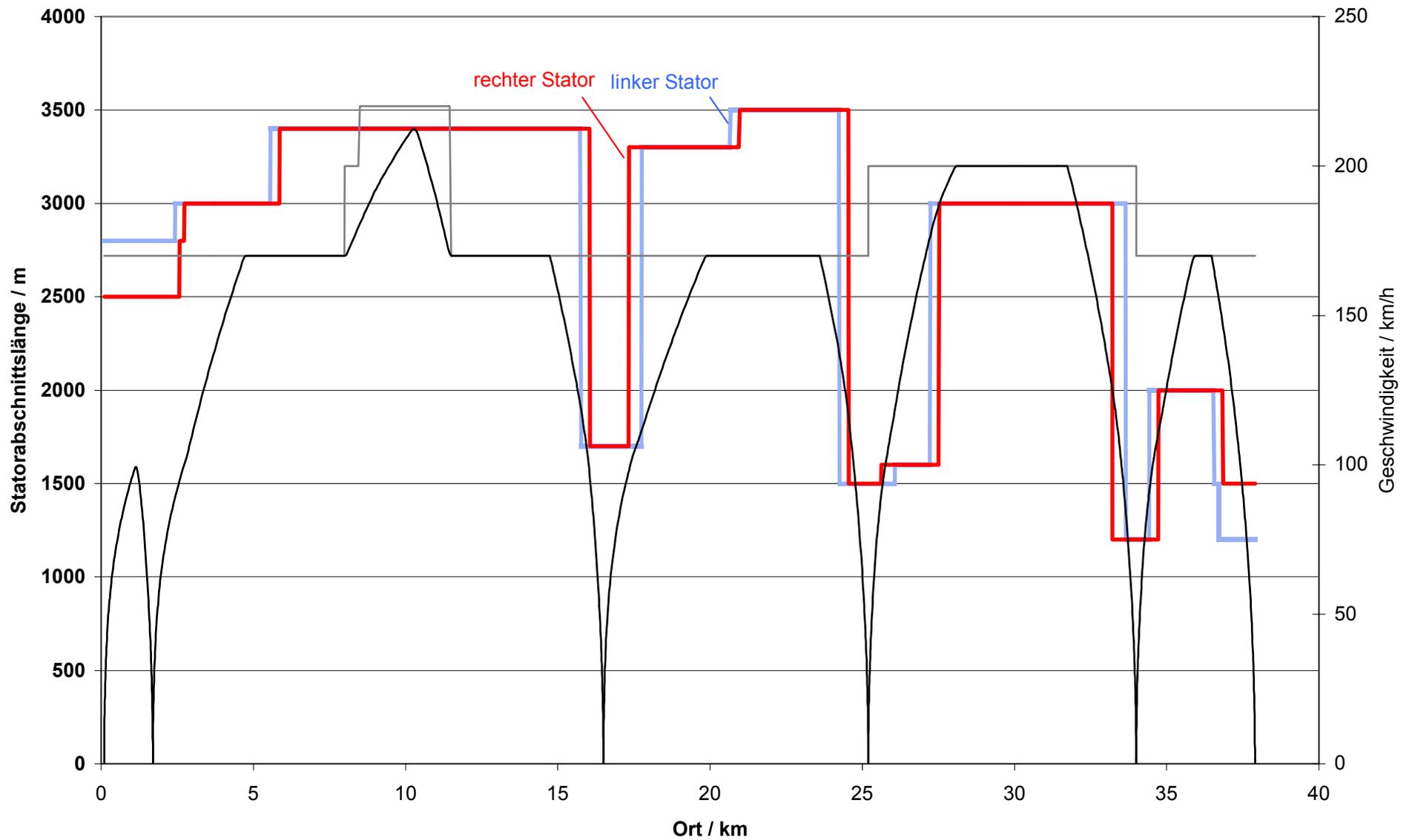
## Spannungsverlauf

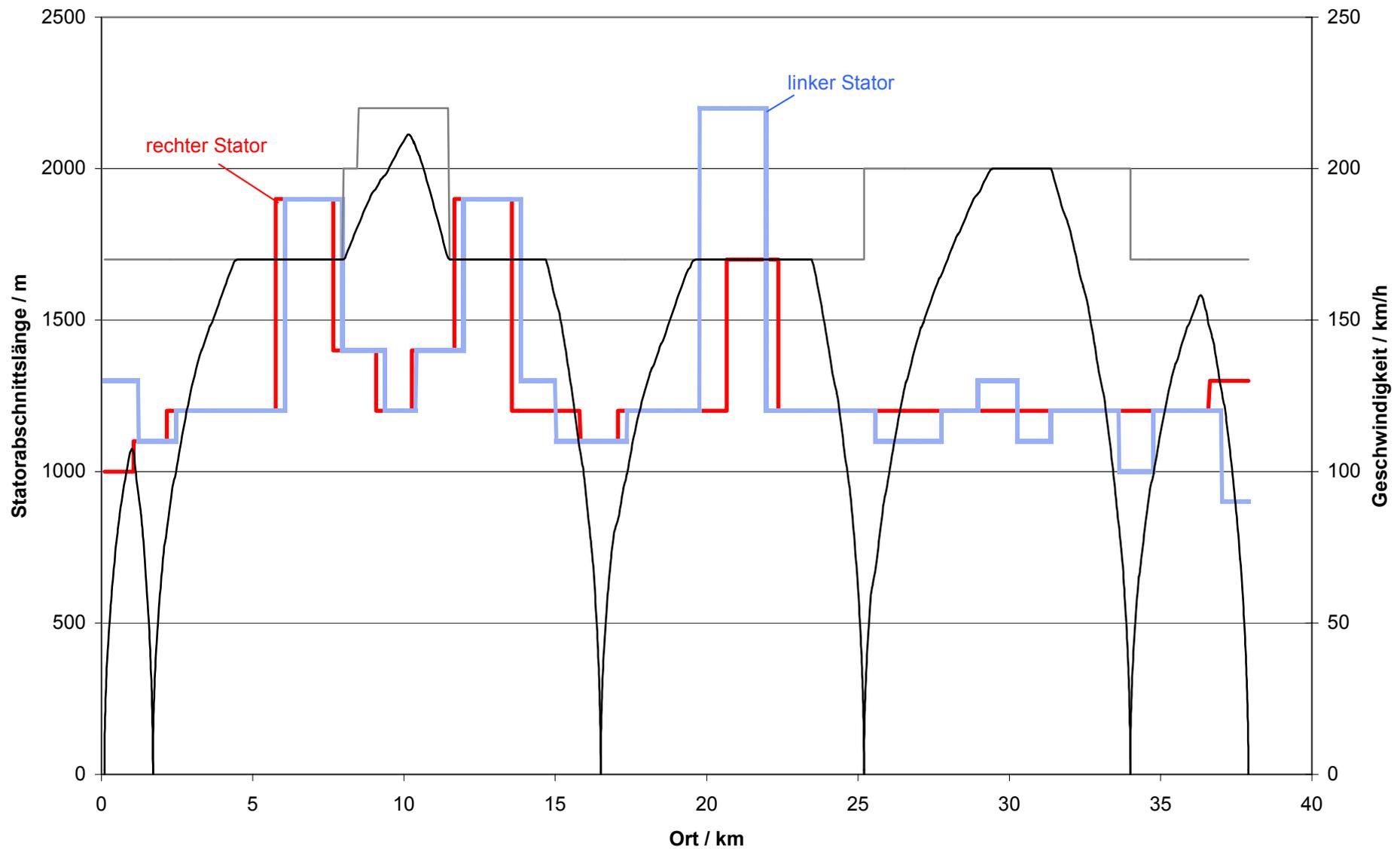


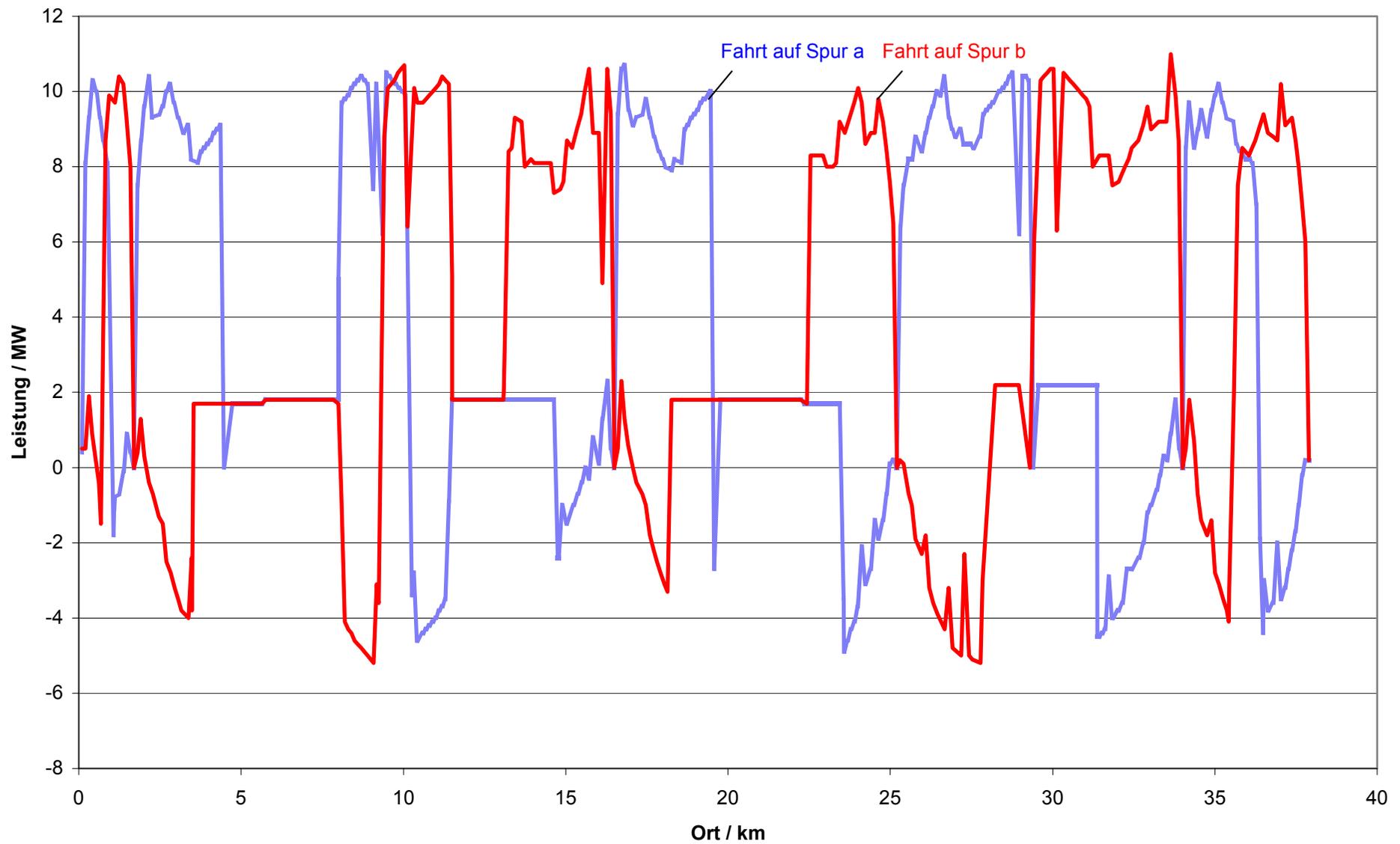
## Stromverlauf

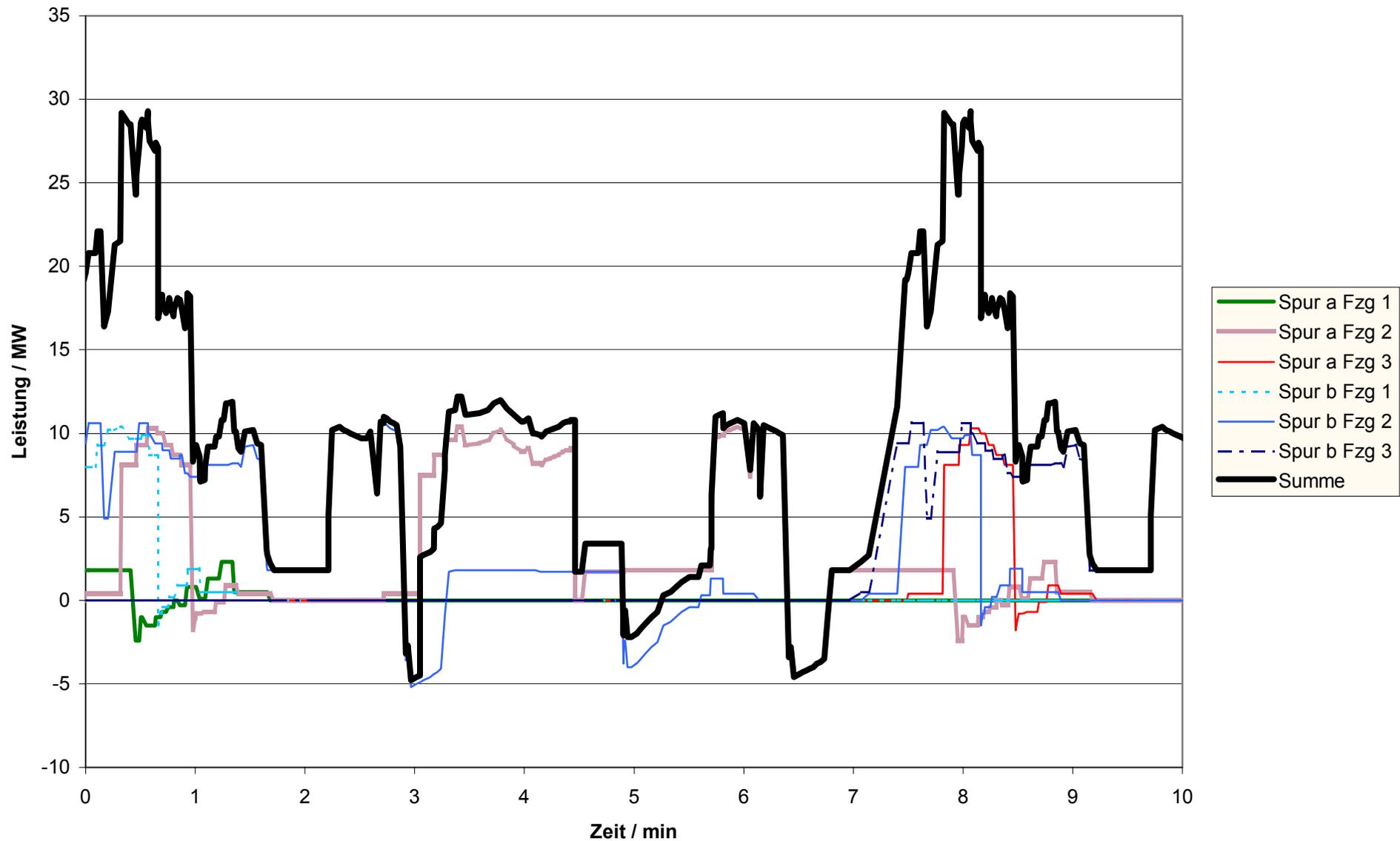


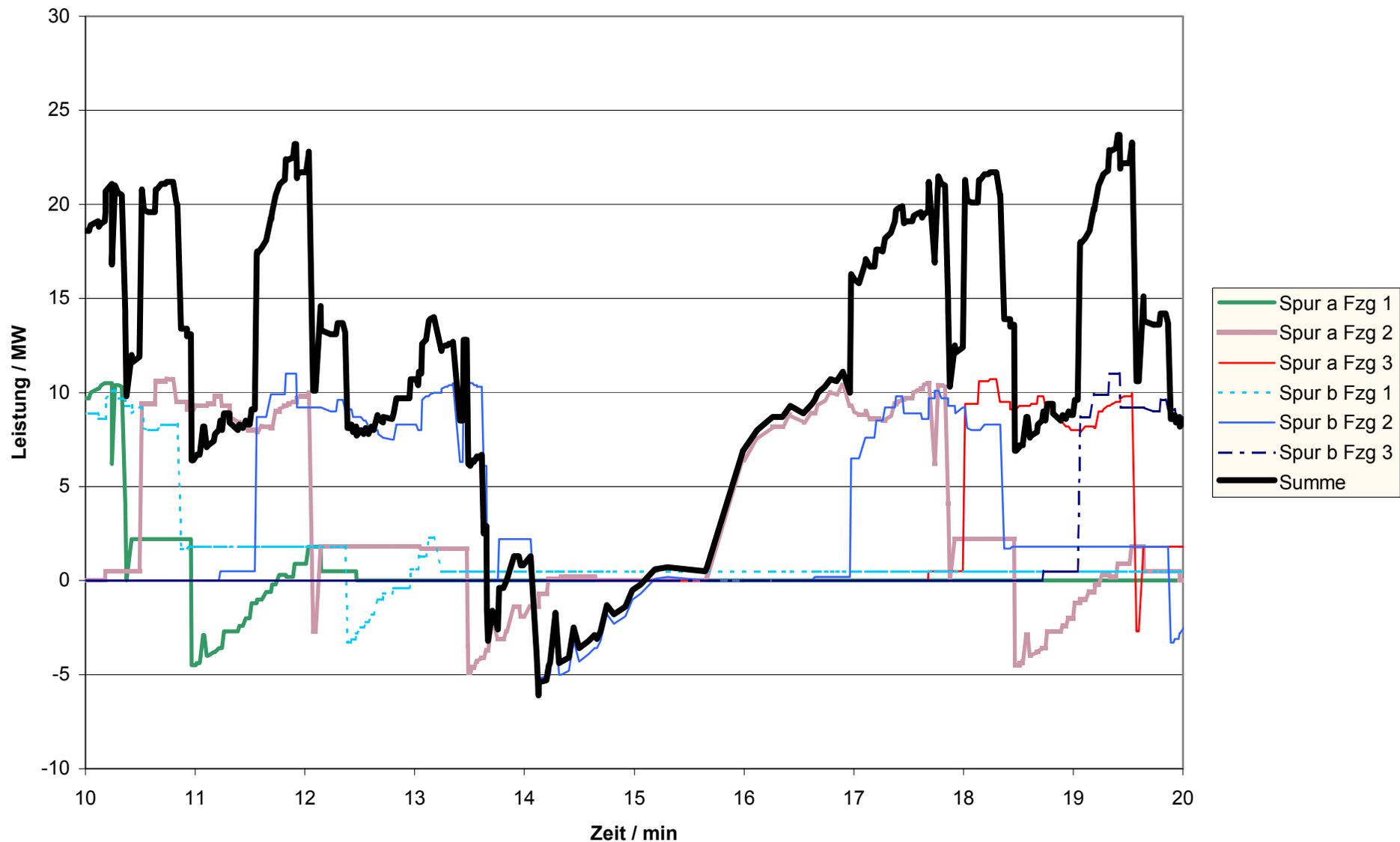


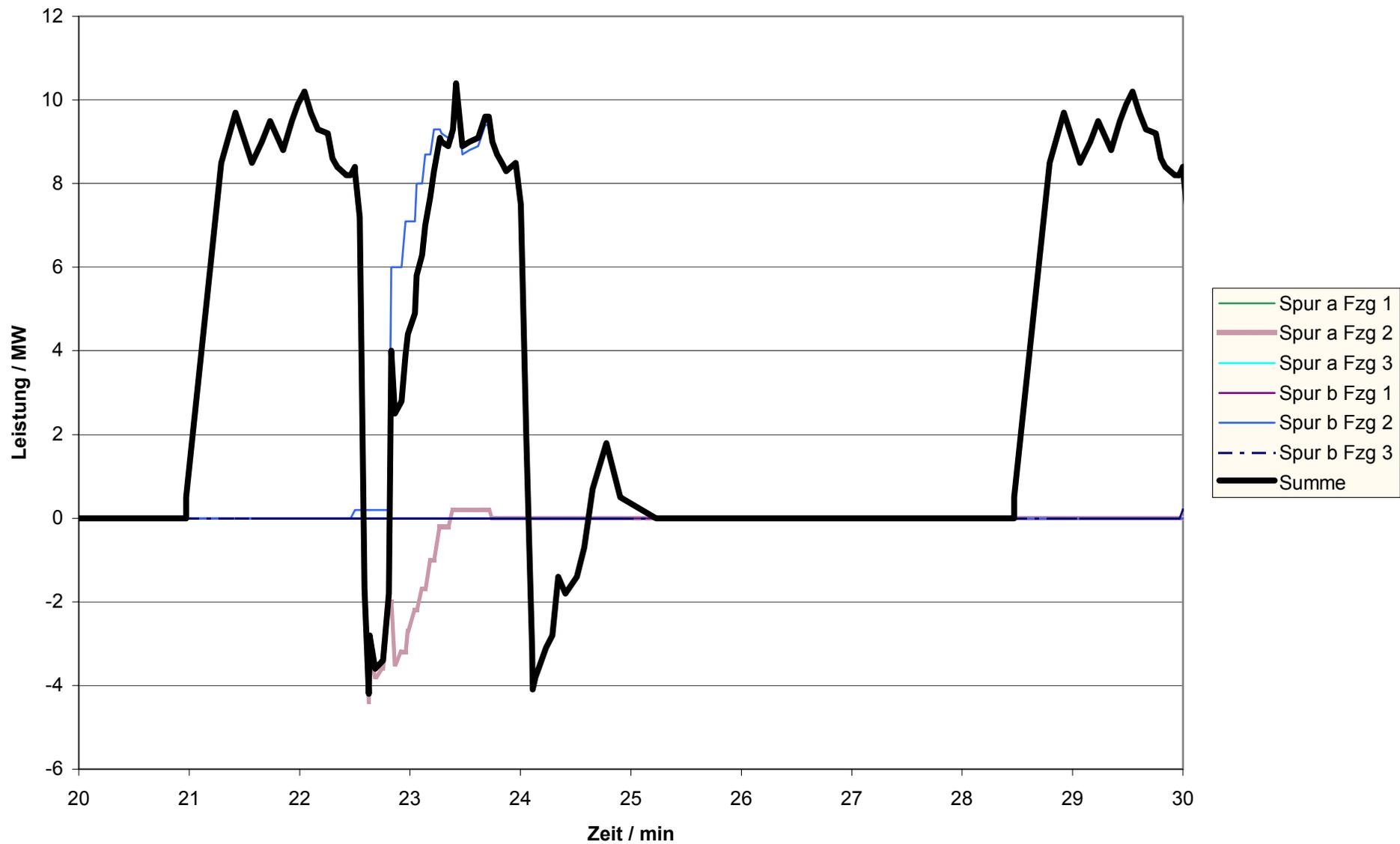


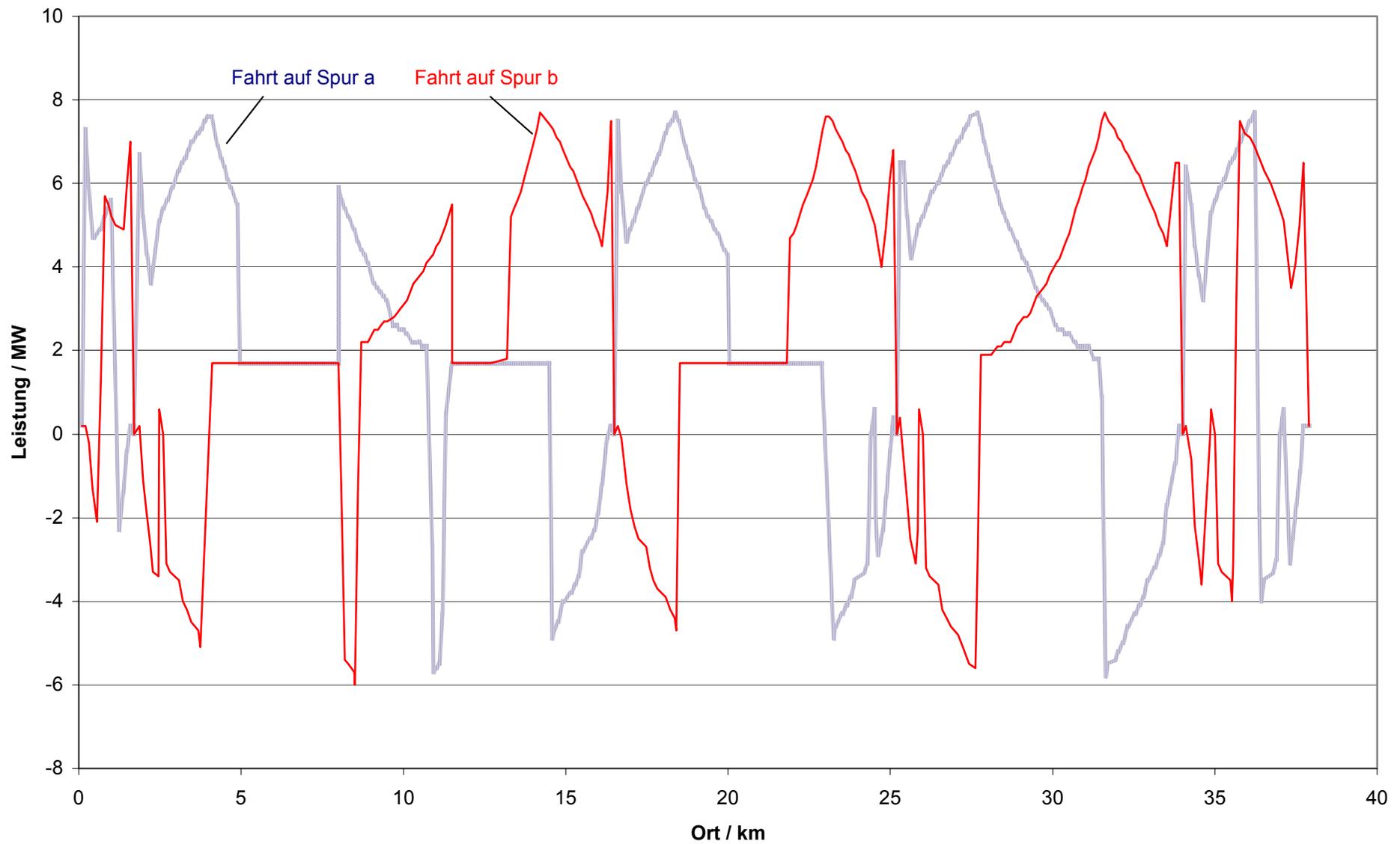




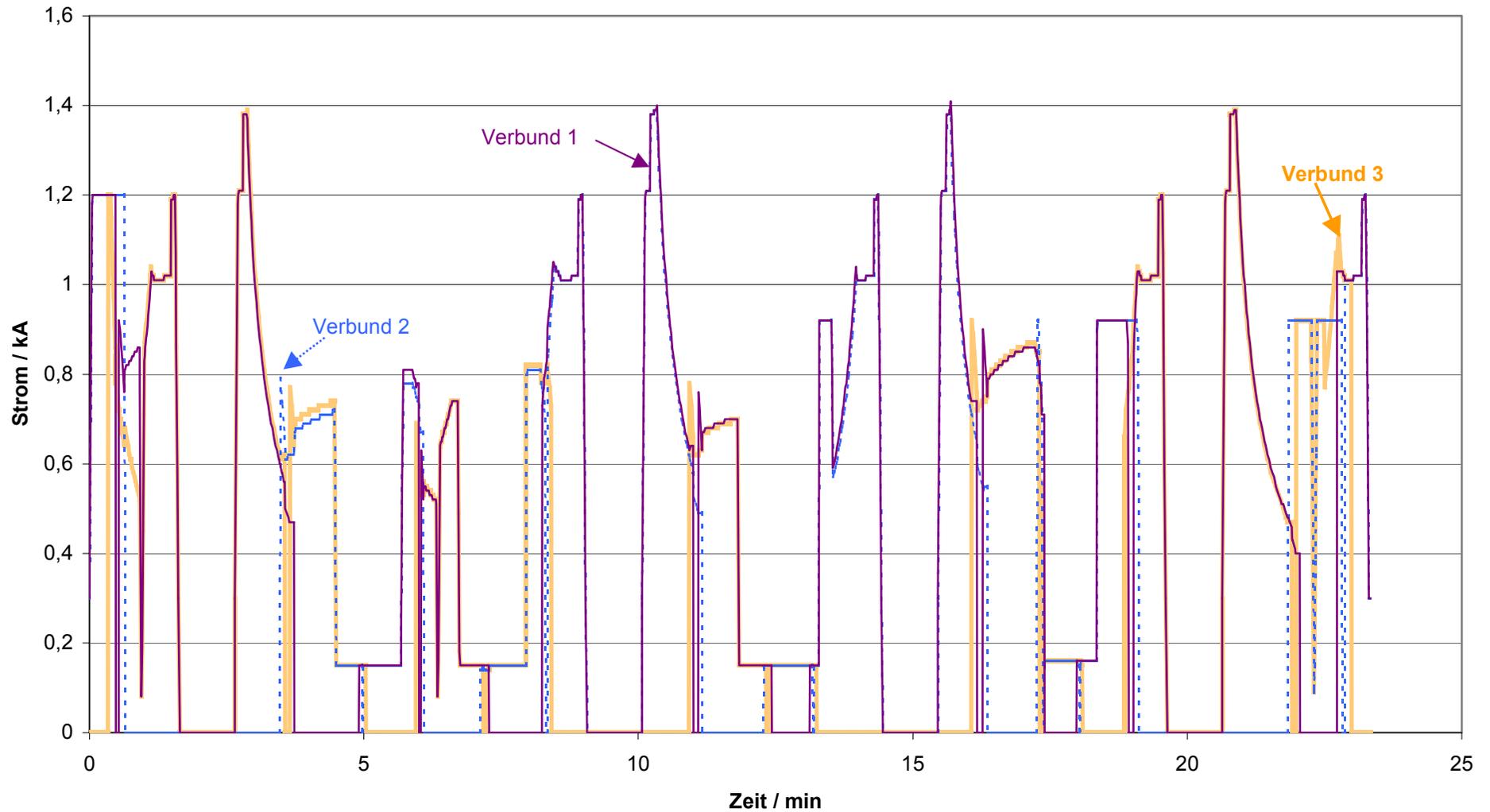


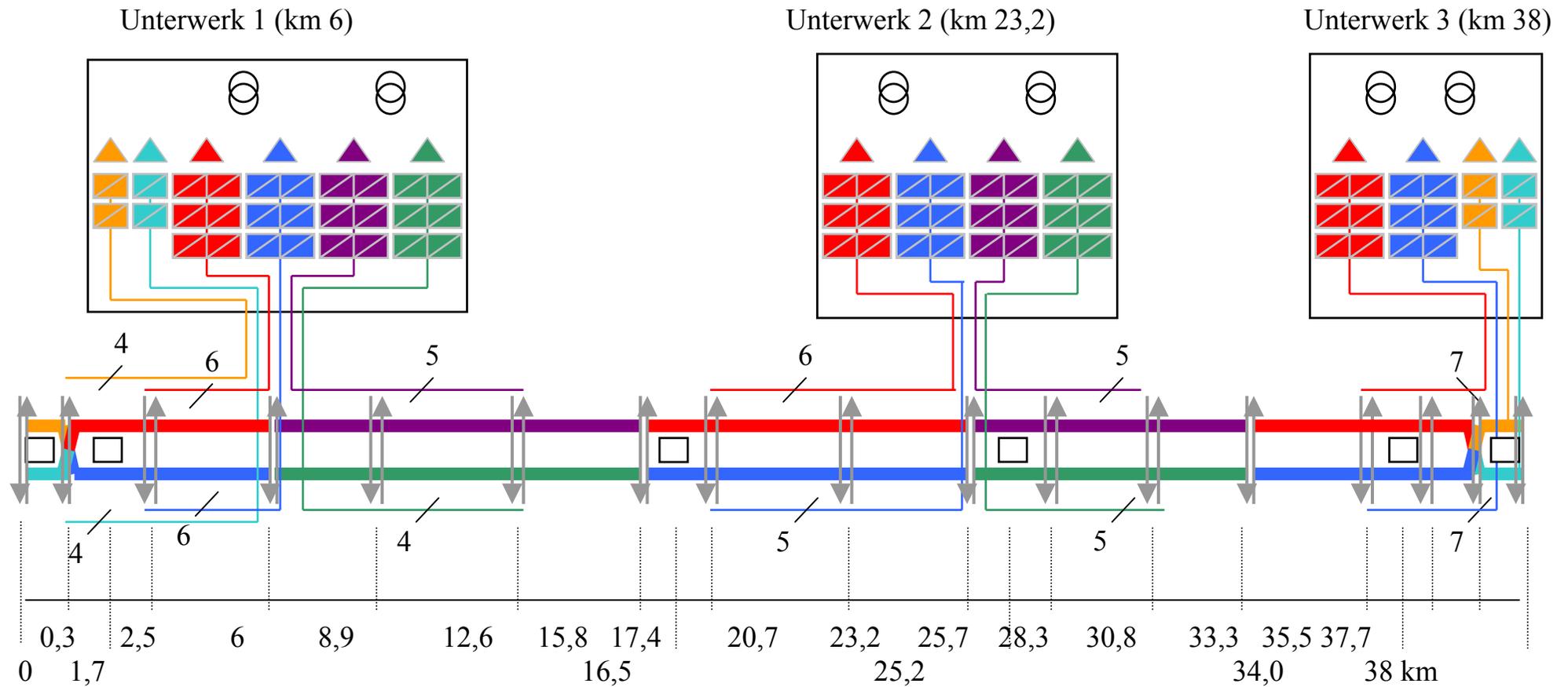






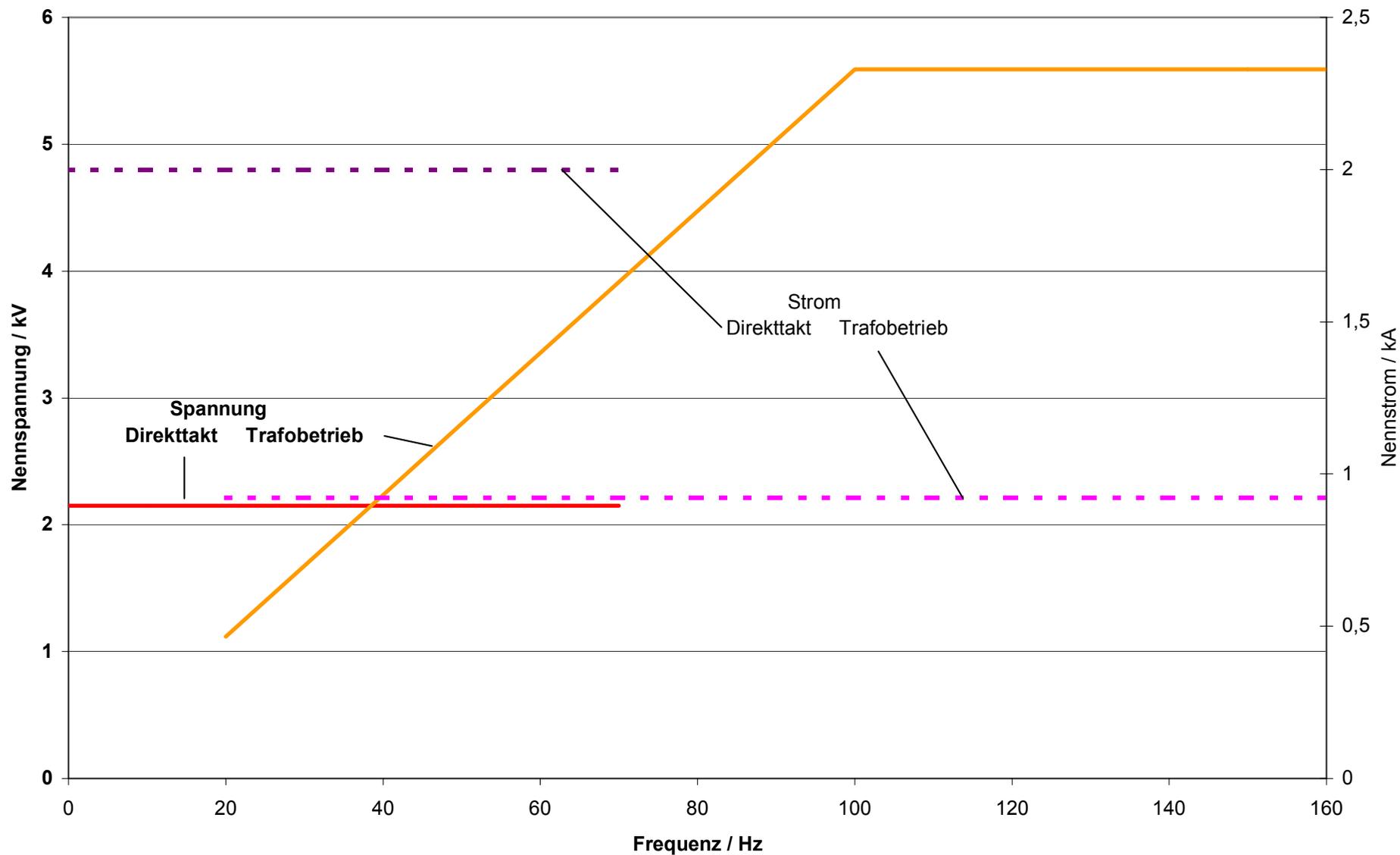
### Spur a

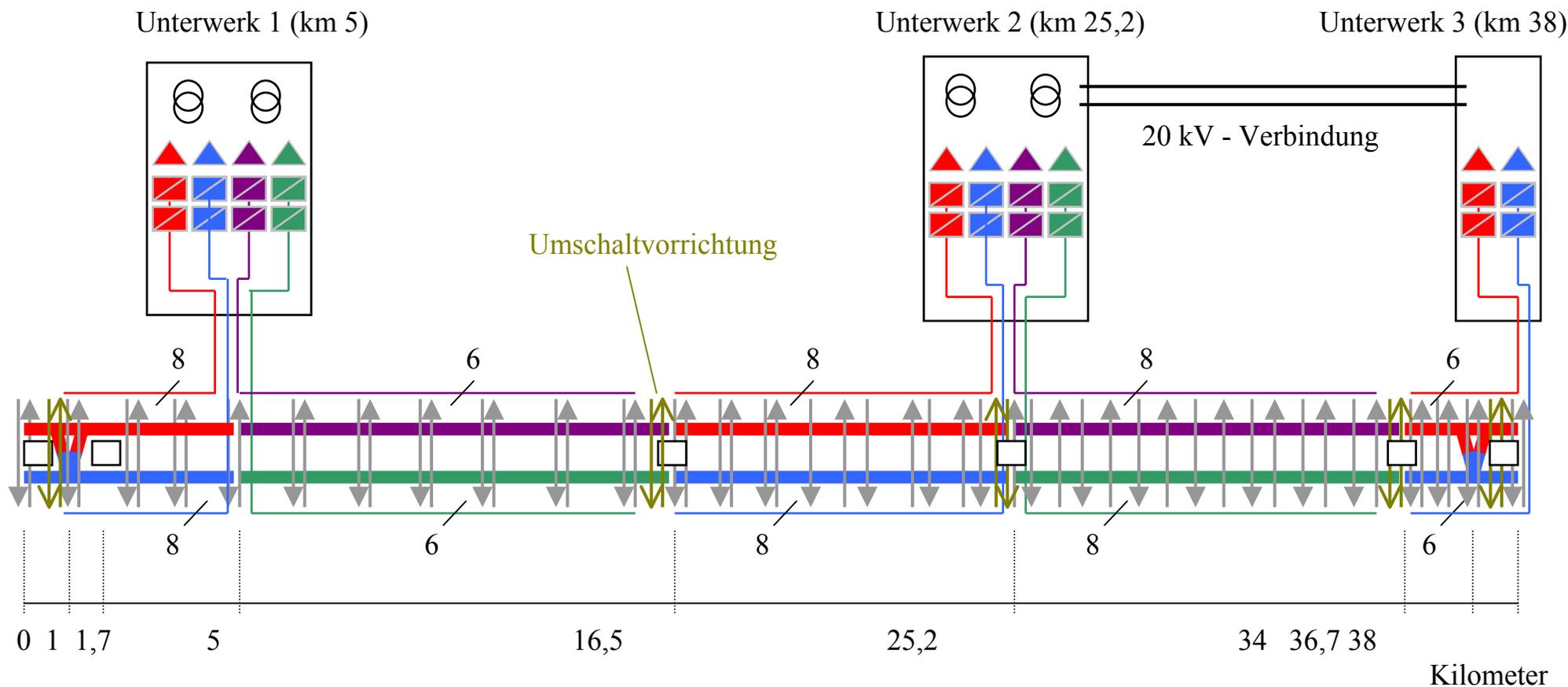




**Legende:**

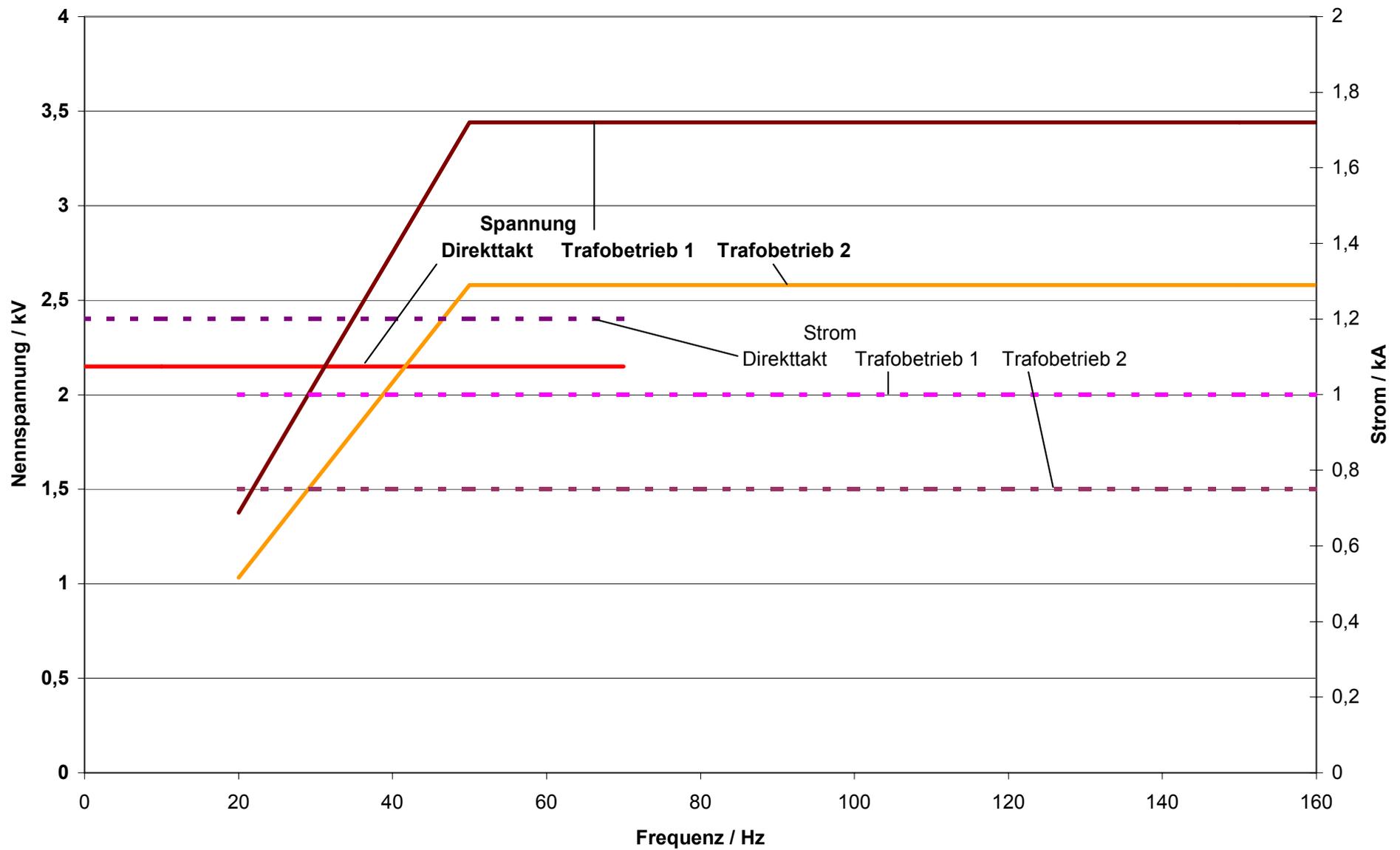
	Hochspannungsanlage		Betriebsleittechnik-Dezentrale		Wechselrichter
	Station		Kabelsystem		Antriebsbereich
	Schaltstelle rechte Statorn (beide Spuren)		Schaltstelle linke Statorn (beide Spuren)		

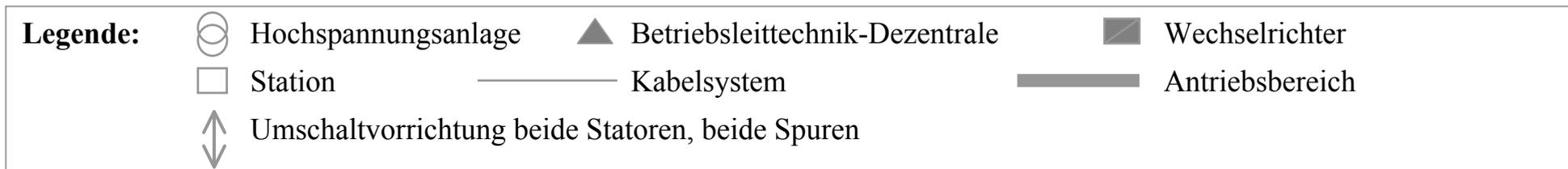
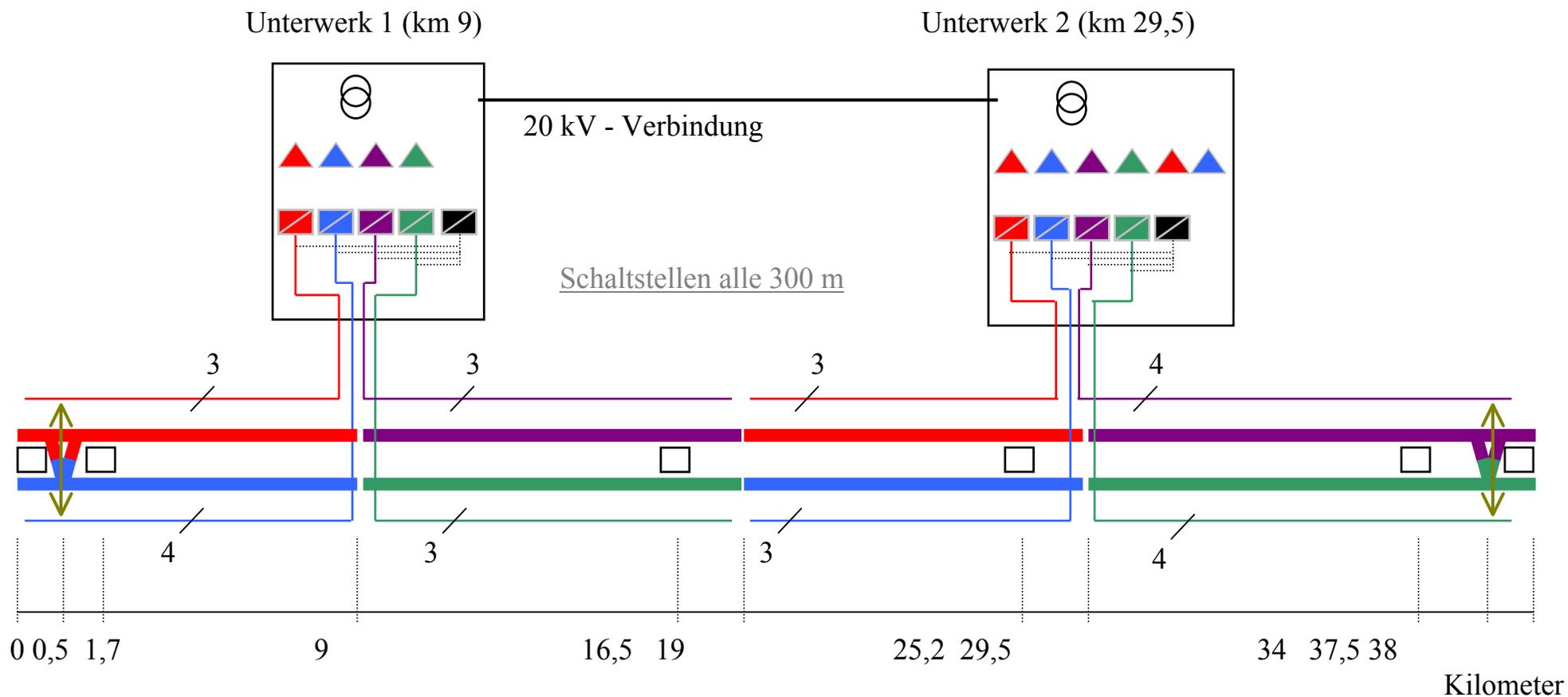


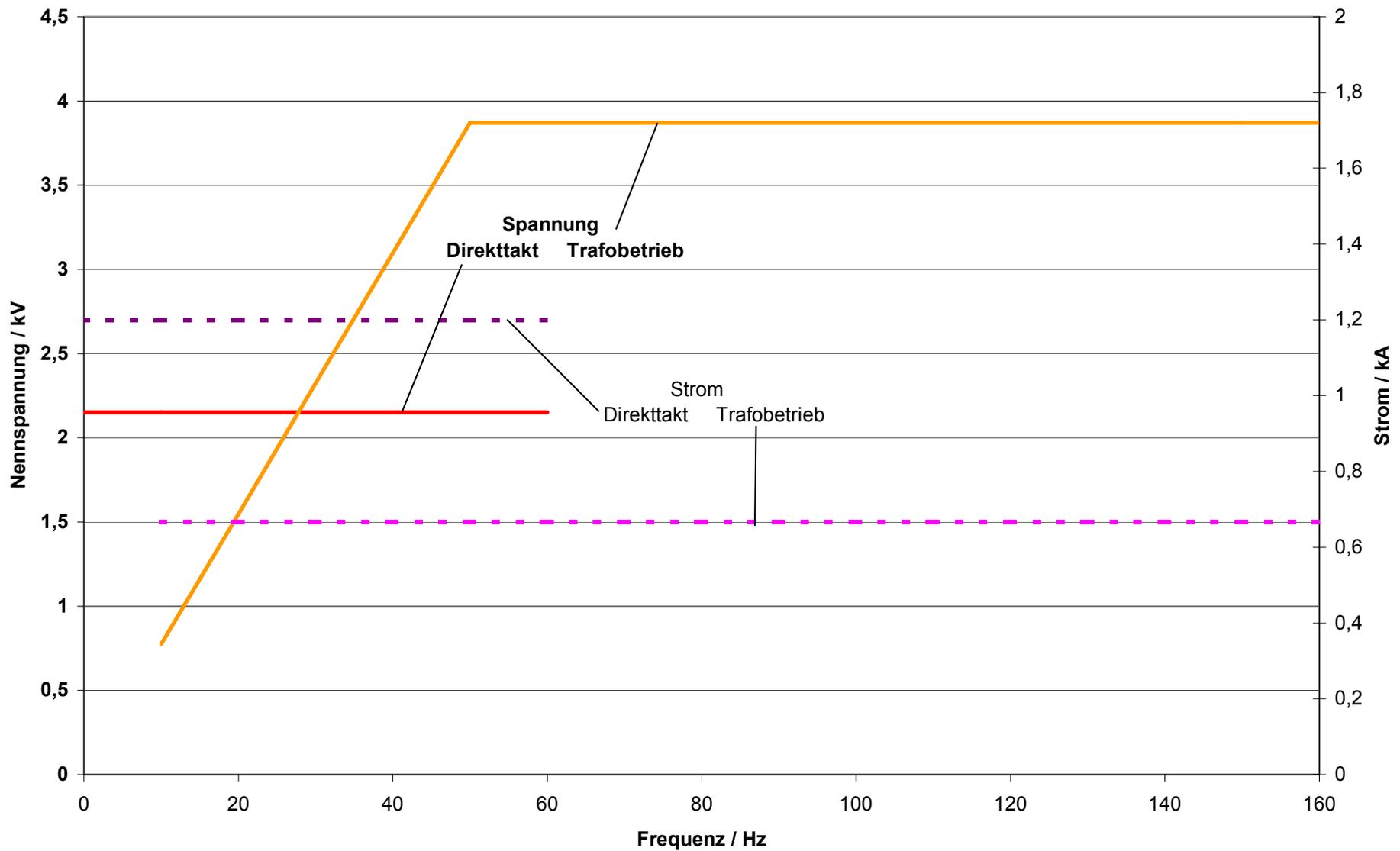


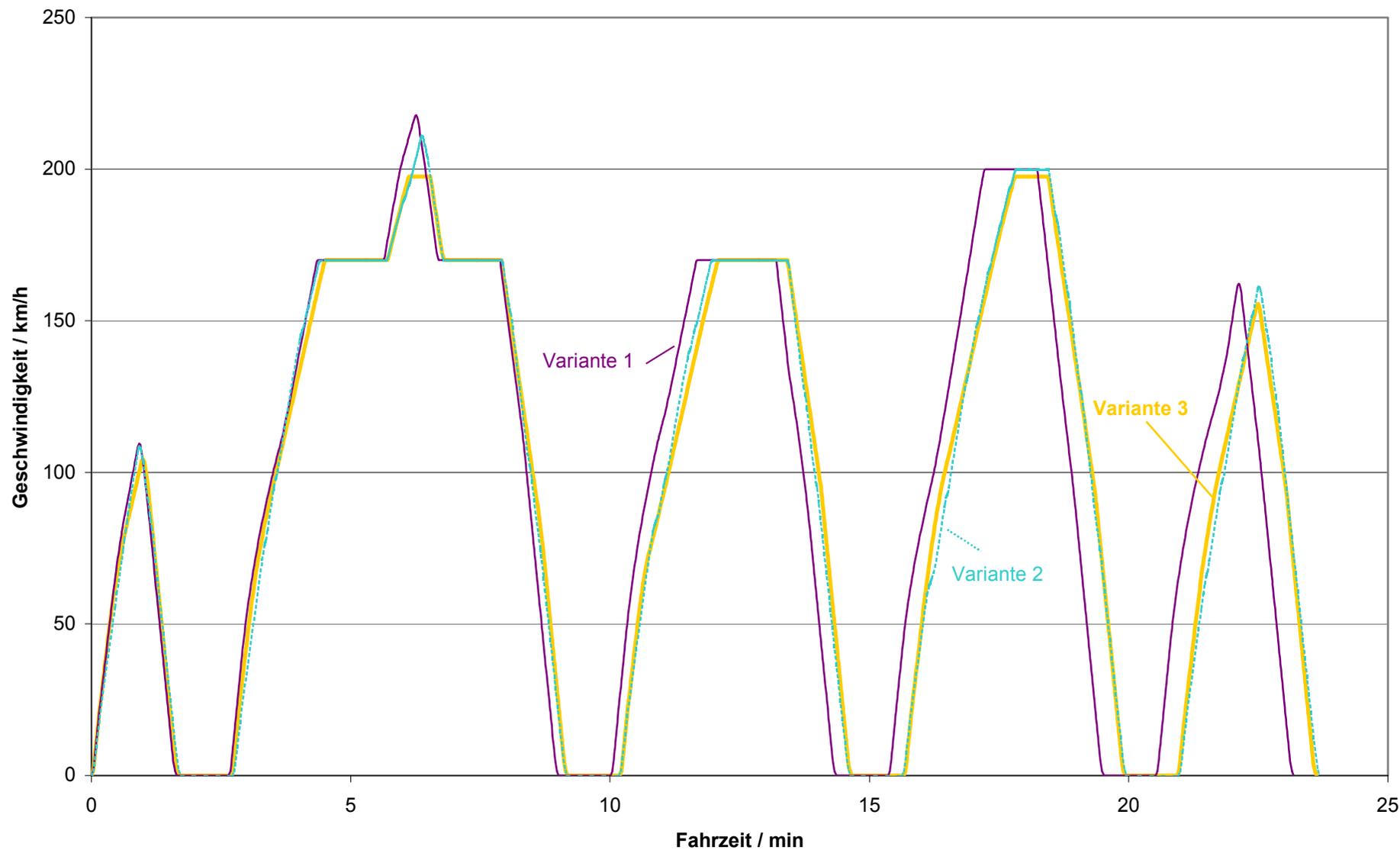
**Legende:**

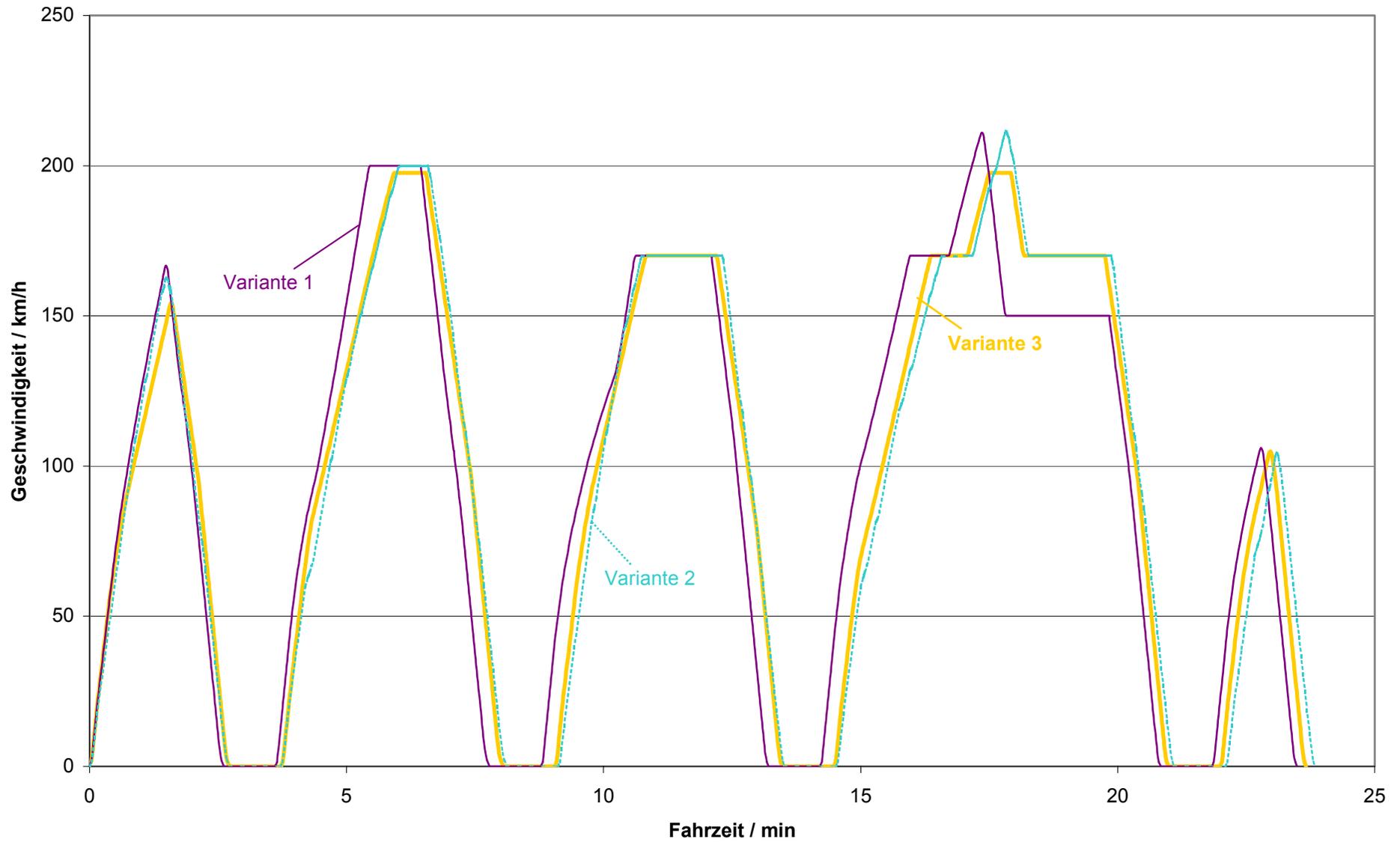
	Hochspannungsanlage		Betriebsleittechnik-Dezentrale		Wechselrichter
	Station		Kabelsystem		Antriebsbereich
	Schaltstelle rechte Statoren (beide Spuren)		Schaltstelle linke Statoren (beide Spuren)		

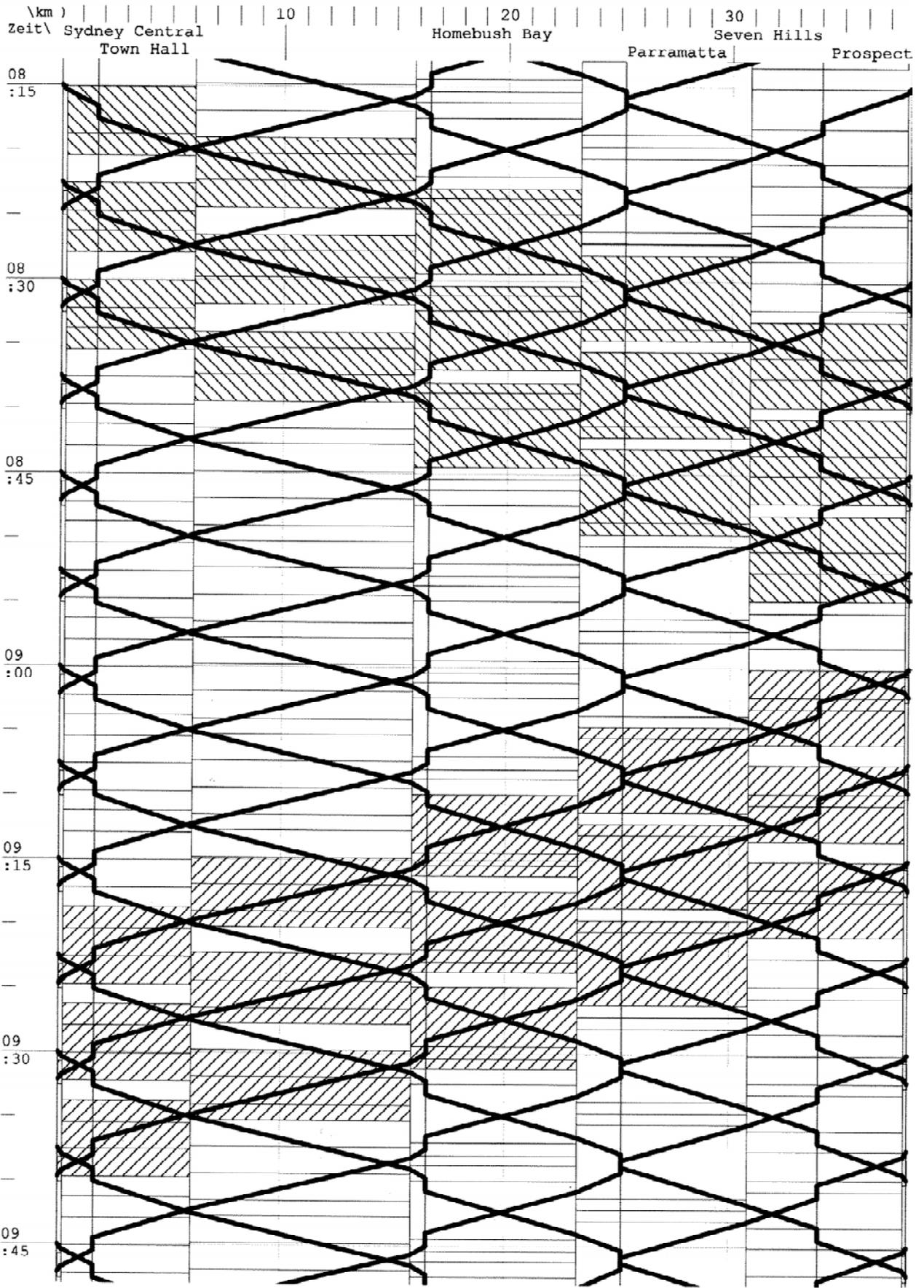




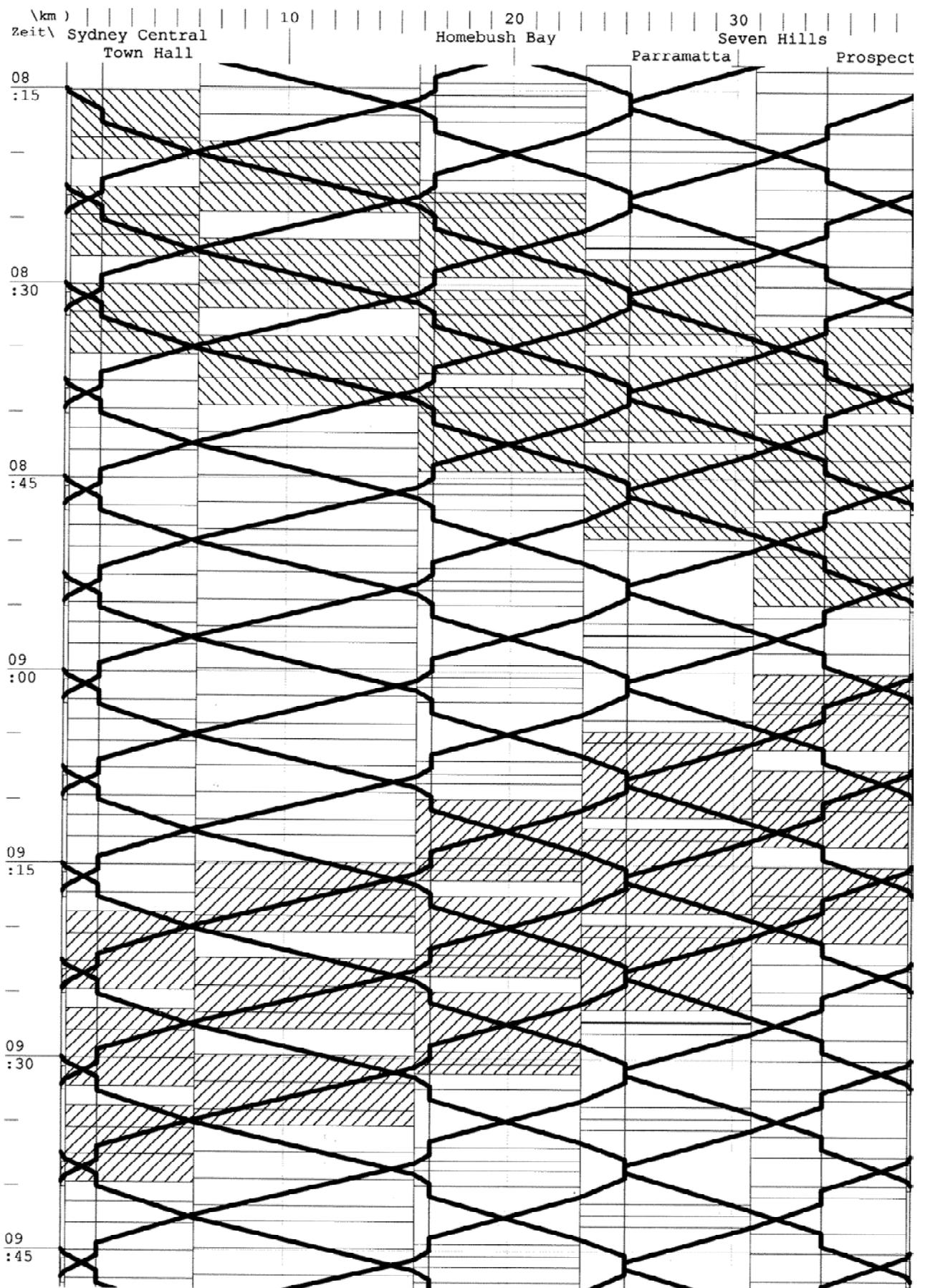




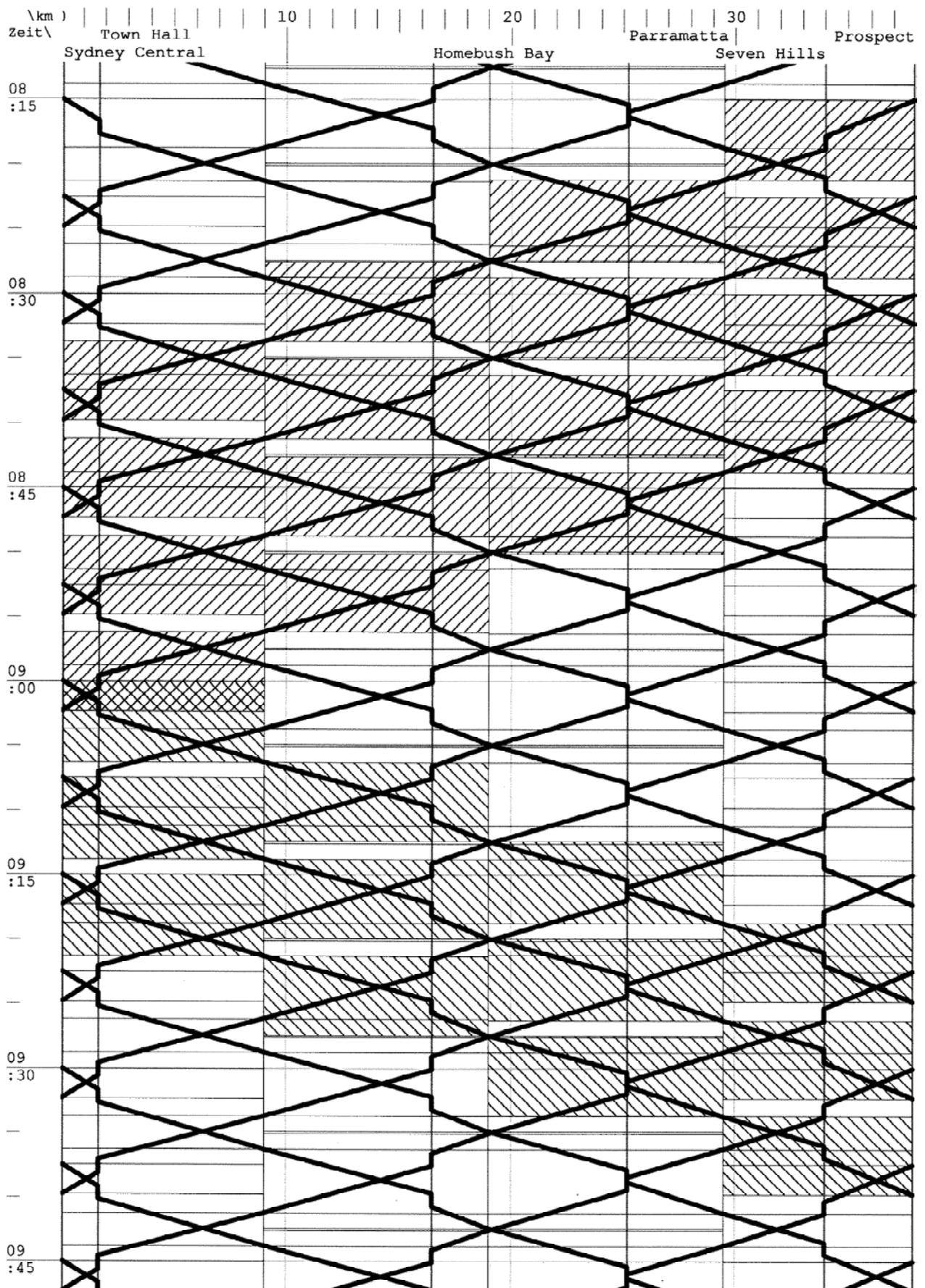




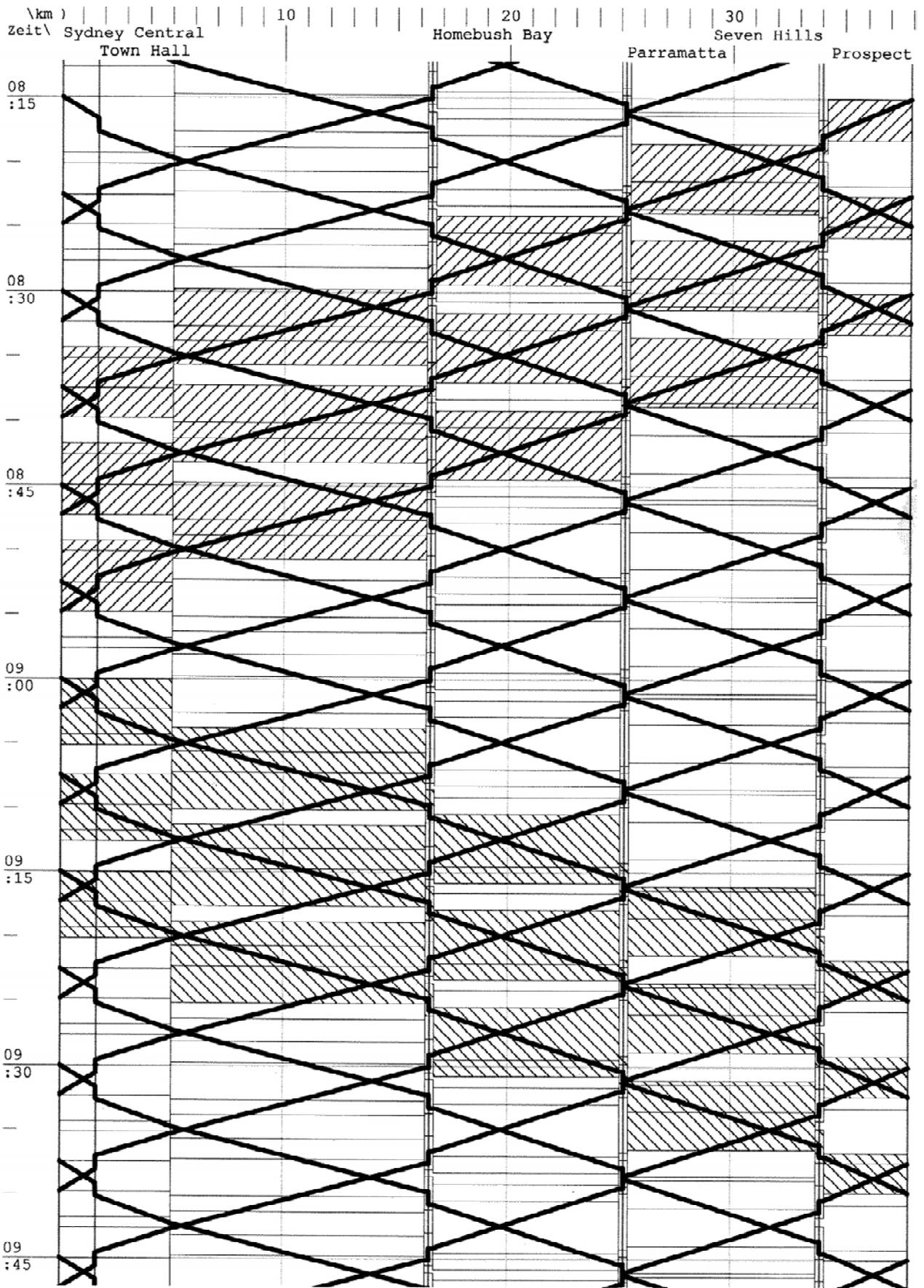
**Magnetschnellbahn für den schnellen Regionalverkehr –  
Optimierung des Langstatorantriebs und der Energieversorgung**



**Magnetschnellbahn für den schnellen Regionalverkehr –  
Optimierung des Langstatorantriebs und der Energieversorgung**



**Magnetschnellbahn für den schnellen Regionalverkehr –  
Optimierung des Langstatorantriebs und der Energieversorgung**

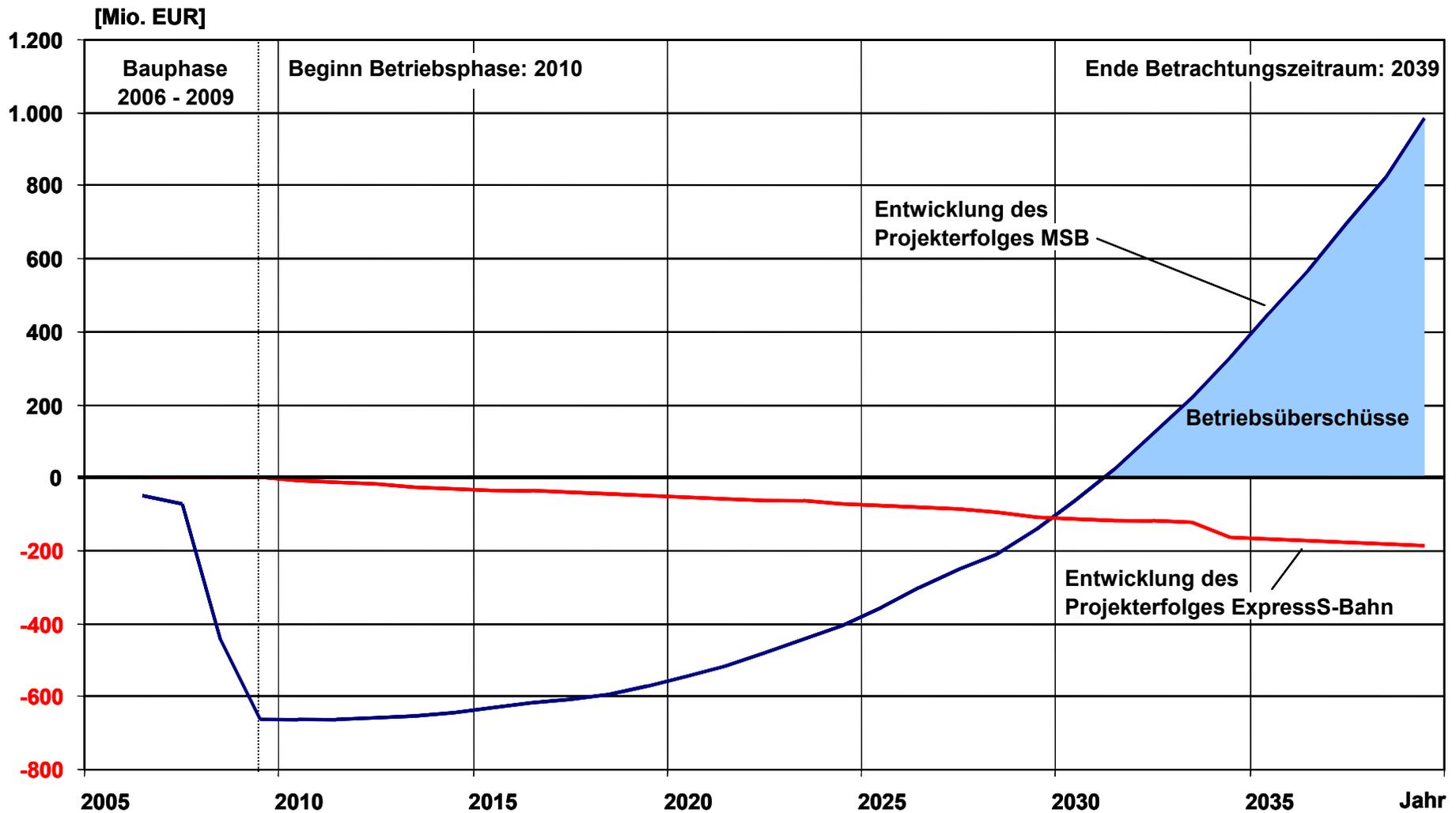


**Magnetschnellbahn für den schnellen Regionalverkehr –  
Optimierung des Langstatorantriebs und der Energieversorgung**

Kostengruppe	Betriebskosten/Jahr	
	MSB 350 km/h 10 min	Express S-Bahn 160 km/h 17 min
<b>Instandhaltung</b>	<b>7,0 Mio EUR</b>	<b>10,6 Mio EUR</b>
<b>Energie</b>	<b>7,9 Mio EUR</b>	<b>2,2 Mio EUR</b>
<b>Betriebspersonal</b>	<b>1,7 Mio EUR</b>	<b>3,1 Mio EUR</b>
<b>Versicherung</b>	<b>2,8 Mio EUR</b>	<b>1,6 Mio EUR</b>
<b>Sonstige <sup>1)</sup></b>	<b>8,7 Mio EUR</b>	<b>8,7 Mio EUR</b>
- Marketing	0,6 Mio EUR	0,6 Mio EUR
- Vertrieb	4,5 Mio EUR	4,5 Mio EUR
- Operating	0,5 Mio EUR	0,5 Mio EUR
- Gepäck	3,1 Mio EUR	3,1 Mio EUR
<b>Gesamt</b>	<b>28,2 Mio EUR</b>	<b>26,1 Mio EUR</b>

Höchstgeschwindigkeit  
Fahrzeit

Quelle: [17]



(abzgl. öffentliche Invest-Zuschüsse)  
 Betrachtungszeitraum: 30 Betriebsjahre, Eskalation: 3 % für Betriebskosten, 1,5 % für Erlöse;  
 Finanzierungskosten MSB für 636 Mio. € bei Zinssatz 4,5 %  
 Aufkommen S-Bahn: 60 % des Aufkommens MSB

Quelle: [17]