



## 1 Einleitender Überblick

*Prof. Dr. Wolfgang Busch, Dipl.-Ing. Friederike Kaiser*

Speicher werden in der zukünftigen Energielandschaft eine zentrale Rolle spielen. Pumpspeicherwerke stellen dabei zurzeit die Spitzentechnologie dar. Welche Entwicklungen gibt es im Bereich der Pumpspeicher-Technologien und was sind die Rahmenbedingungen heute und in Zukunft?

Dieser Tagungsband bietet einen transdisziplinären Einblick in dieses spannende Thema für Wissenschaftler, aber auch Betreiber, Entscheider und Experten. Die zentralen Inhalte sind:

- **Technologie:** Eine Auswahl verschiedenster Konzepte der unkonventionellen Pumpspeicher wird durch die Autoren der jeweiligen Ideen beschrieben. Darüber hinaus werden Themen allgemeiner Natur von der Netzintegration bis zur optimierten Betriebsweise erläutert.
- **Recht:** In juristischer Hinsicht bietet die Thematik der Energiespeicherung reichlich Stoff für Diskussionen. Mit den Beiträgen zum regulierungsrechtlichen Rahmen sowie zum Planfeststellungs- und Genehmigungsrecht wird ein Einblick in dieses Fachgebiet ermöglicht.
- **Ökonomie:** Die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen für Pumpspeicherung unterliegen zurzeit großen Veränderungen durch die Integration fluktuierend einspeisender erneuerbarer Energiequellen in den Strommarkt. Die möglichen ökonomischen Betriebsmodelle der Pumpspeicherung werden daher aus verschiedenen Perspektiven beleuchtet.

Für die Inhalte der Beiträge sind die jeweiligen Autoren verantwortlich.





## 2 Technologie

## Das Zusammenspiel von Energiespeichern und Übertragungsnetzen

### V. WEINREICH

Der Grundsatz der Energieversorgung, die Erzeugung und den Transport elektrischer Energie als zusammenhängende Aufgabe zu verstehen, ist durch die Erneuerbaren Energien, den Stromhandel und die veränderte Gesetzgebung neuen Herausforderungen unterworfen. Kein Stromerzeuger hat noch ein Interesse daran, die Stromerzeugung in der Nähe des Verbrauchers zu platzieren, um Transportwege kurz zu halten oder so viel Erzeugungskapazität bereitzustellen, dass auch die bedarfsstärksten Stunden des Jahres abgedeckt werden. Die Standorte der Energieerzeugung werden durch Windstärke, Sonnenintensität oder Transportpreise für Brennstoffe bestimmt. Dies führt zu einer Struktur bei den Erzeugungskapazitäten, die weder zeitlich noch räumlich auf die Transportkapazität des Netzes und den Stromverbrauch abgestimmt ist, trotzdem bleibt die Notwendigkeit der hochverfügbaren Versorgung. Um diese Aufgabe zu erfüllen sind zusätzliche Ideen, technische Entwicklungen und Realisierungen notwendig, die die elektrische Energie in Bezug auf zeitliche und räumliche Verfügbarkeit bedarfsgerecht und variabel einsetzbar machen. Bereits heute kommen die Stromnetze an die Grenzen ihrer Transportmöglichkeiten, es sind zunehmend aufwendige und teure Maßnahmen notwendig, um die Stromnetze zu jeder Zeit stabil betreiben zu können. Die deutschen Übertragungsnetzbetreiber sehen die Erhöhung der Transportkapazität als eine Kernaufgabe an, um dem räumlichen Aspekt der veränderten Erzeugungsstruktur zu begegnen. Ein Stromnetz selbst kann elektrische Energie nicht speichern, die in Deutschland vorhandenen Energiespeicher können aktuell nicht mehr als 10% des deutschen Strombedarfs über 10 Stunden speichern oder freigeben. Auf der Erzeugungseite ist es aber theoretisch und praktisch möglich, dass Wind und Sonne über 3 Wochen nahezu keinen Beitrag zur Deckung des Energiebedarfs leisten, ein Ausbau der Erneuerbaren Energien kann dieses Problem kaum lösen. Es fehlt im Hinblick auf die Energiewende also an der zeitlich bedarfsorientierten Bereitstellung von Strom. Diese Entwicklung legt die Überlegung nahe, (elektrische) Energie in erheblicher Menge zu speichern und dem Stromnetz je nach Bedarf wieder zuzuführen. Allerdings erfordert die Bereitstellung großer Speicherkapazitäten neue Ideen, die Bereitschaft Veränderungen zu akzeptieren ebenso wie die Unterstützung von Politik, Forschung und Gesellschaft.



Volker Weinreich  
 Leiter Schaltleitung Lehrte/Head of Control Centre Lehrte  
 Netzführung | Schaltleitung Lehrte  
 TenneT TSO GmbH  
 Vor dem Nordwald 14  
 D-31275 Lehrte  
 Volker.Weinreich@tennet.eu  
 www.tennet.eu



## **Gegenüberstellung Unkonventioneller Pumpspeicher**

**W. BUSCH, F. KAISER**

Energie aus Biomasse, Sonnenstrahlung, Wind, Wasserbewegung und Erdwärme steht nahezu unendlich zur Verfügung und besitzt im Gegensatz zu fossiler Energie einen geringen ökologischen Fußabdruck. Daher sollen diese erneuerbaren Energien im Zuge der Energiewende die fossilen Brennstoffe zunehmend ersetzen. Zwei der am stärksten genutzten erneuerbaren Energiequellen – Wind und Sonne – speisen jedoch fluktuierend in das Netz ein. Aus diesem Grund ist der Einsatz von Energiespeichern zum Ausgleich der Energiemengen zwischen Bedarfs- und Erzeugungszeiten sinnvoll. Pumpspeicher sind heutzutage die einzige großtechnische Energiespeichertechnik und werden bereits seit rund 100 Jahren betrieben. Moderne Anlagen erreichen Wirkungsgrade von über 80%. [1] In den letzten Jahren hat sich ihr bewährtes Geschäftsmodell jedoch durch den Zubau von Erzeugern erneuerbarer Energie gewandelt. Früher waren relativ regelmäßige Betriebs-Fahrpläne üblich: Nachts günstigen Strom kaufen und damit das Wasser in ein höher gelegenes Reservoir pumpen und am Mittag bei Spitzenlast und Spitzenpreis den Speicher leeren, um den Strom teurer zu verkaufen. Diese sogenannte „Stromveredelung“ ist heute kaum noch rentabel, da mittags zumeist viele Fotovoltaik Anlagen Strom in das Netz einspeisen – somit entfällt das bisher überwiegende Geschäftsmodell, welches den verbraucherseitigen Mittagspeak wirtschaftlich ausnutzte. Andererseits eröffnet sich durch die fluktuierend einspeisenden erneuerbaren Energiequellen Sonne und Wind ein neues Anwendungsfeld, nämlich der flexiblere Einsatz der Pumpspeicher zur Netzstabilisierung u.a. durch Erbringung von positiver und negativer Regelleistung. [2]

### **Pro und Contra Pumpspeicher**

Trotz der geänderten ökonomischen Rahmenbedingungen durch das Abschmelzen des Mittagspeaks sprechen viele technische Aspekte für den vermehrten Einsatz von Pumpspeichern: [2]

- Bereitstellung von hoher positiver und negativer Regelleistung innerhalb weniger Sekunden
- Erbringung von Momentanreserve
- Blindleistungs-Kompensation
- Kurzschlussleistung
- Schwarzstartfähigkeit
- Oberschwingungskompensation
- Verbesserung der Netzsymmetrie durch Einsatz von Asynchronmaschinen mit moderner Umrichtertechnik.

In den letzten Jahren ist der mit dem Bau übertägiger (konventioneller) Pumpspeicher verbundene hohe Landschaftsverbrauch ein immer größeres Problem bei der Genehmigung geworden. Die mehrere Millionen Kubikmeter fassenden Speicherbecken stellen einen großen Eingriff in das Landschaftsbild dar und erzeugen Widerstand in der Bevölkerung sowie bei Natur- und Landschaftsschützern. Derartige



Neubauprojekte verfügen heute über eine geringe Akzeptanz. Beispiele hierfür sind die Projektplanungen für Pumpspeicherwerke bei Atdorf und bei Riedl.

### **Begriffsdefinition**

#### a) Konventionelle Pumpspeicherung

Pumpspeicherung findet in einem Pumpspeicherwerk<sup>1</sup> statt, welches, sofern es nicht um eine lokale sondern prinzipielle Beschreibung geht, auch mit „Pumpspeicher“ abgekürzt werden kann. Die Funktion basiert auf einem einfachen technischen Prinzip: Aus einem unteren Wasserreservoir wird mittels einer durch einen Elektromotor angetriebenen Pumpe Wasser in ein oberes Reservoir gepumpt, dabei wird die elektrische Energie des Stroms in potentielle Energie (auch Lageenergie genannt) umgewandelt. Dieser Vorgang entspricht der Ladung des Energiespeichers. Beim Entladevorgang fließt das Wasser wieder herunter, wobei es eine Turbine antreibt, die wiederum mit dem Generator verbunden ist, welcher aus der Drehbewegung Strom generiert. Der Strom kann somit über einen Transformator (kurz: Trafo) aus dem Stromnetz entnommen werden und auch wieder in das Netz eingespeist werden. Dabei kann insgesamt (von Trafo zu Trafo) ein Wirkungsgrad von über 80% erreicht werden. [1] [3] In Deutschland gibt es 26 Pumpspeicherwerke mit einer Leistung von jeweils über 20 MW. Das derzeit größte ist das Pumpspeicherwerk Goldisthal mit 1060 MW. Relevant für das deutsche Stromnetz sind auch einige Pumpspeicher der benachbarten Länder, wie das Pumpspeicherwerk Vianden (1096 MW, Erweiterung um 200 MW im Bau) in Luxemburg. Insgesamt verfügt der deutsche Energiemarkt somit über rund 8 GW Pumpspeicher-Leistung. Bei sämtlichen dieser Pumpspeicherwerke sind die Wasserreservoirs als Speicherbecken an der Erdoberfläche ausgeführt, während das Maschinenhaus und die Druckleitung teilweise auch als unterirdische Maschinenkaverne ausgeführt sind. Innerhalb der konventionellen Pumpspeicher gibt es also bautechnische, aber auch maschinentechnische Unterschiede, wie z.B. den Einsatz von Synchron- oder Asynchron-Maschinen, auf die hier jedoch nicht im Detail eingegangen werden soll.

#### b) Unkonventionelle Pumpspeicher:

In Abgrenzung zu den zuvor beschriebenen konventionellen Pumpspeichern, zeichnen sich unkonventionelle Pumpspeicher durch eine entscheidende Änderung im prinzipiellen Aufbau aus, wie z.B. die untertägige Anordnung (fast) sämtlicher Komponenten oder Nutzung anderer Speichermedien (beispielsweise ein Festkörper statt Wasser). Die Gemeinsamkeit der hier beschriebenen Technologien sind die folgenden:

---

<sup>1</sup> Der Begriff „Pumpspeicherkraftwerk“ ist dem Begriff „Pumpspeicherwerk“ nur dann vorzuziehen, wenn es einen natürlichen Zufluss im oberen Wasserreservoir gibt und somit eine Stromerzeugung ohne vorherigen Pumpvorgang möglich wäre, also ein (Wasser-)Kraftwerksbetrieb möglich ist. [2]



- Mechanische Energiespeicher bei denen mittels
- Elektromotor und Pumpe
- elektrische Energie in potentielle Energie mit einer
- Höhendifferenz  $\Delta h$  bzw. einer Druckdifferenz  $\Delta p$  umgewandelt wird.
- Diese potentielle Energie wird wieder in elektrische Energie zurückgewandelt mittels
- Turbine und Generator.

Durch den quasi identischen Maschinenpark von konventionellen und unkonventionellen Pumpspeichern gelten im Allgemeinen dieselben Vorteile bezüglich Erbringung von Regelleistung, Netzdienlichkeit, Zyklfestigkeit und weiterem. Natürlich ist zu beachten, dass die anlagentechnische Umsetzung darüber entscheidet ob und in welchem Umfang die genannten Vorteile zutreffen.

### Prinzipien und Konzepte unkonventioneller Pumpspeicher

Auch wenn sich die Technik konventioneller Pumpspeicher in der Praxis bewährt hat und sie über einen hohen Wirkungsgrad verfügen, sind in den letzten Jahren auf Grund der oben kurz benannten monetär nicht bewertbaren Akzeptanzprobleme alternative Ideen und Konzepte entwickelt worden, die im Folgenden kurz dargestellt und charakterisiert werden sollen. Zur Systematisierung der aus der Literatur bekannten Konzepte wurden sie in drei Gruppen von Pumpspeichertypen eingeordnet:

Tabelle 1: Liste der hier betrachteten Unkonventionellen Pumpspeicher-Konzepte und deren Systematik

Pumpspeichertyp	Konzept / Name
1. Höhendifferenz-Pumpspeicher:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ringwallspeicher</li> <li>• Staustufen als Pumpspeicher</li> <li>• untertägliches Pumpspeicherwerk in Erz-Lagerstätten</li> <li>• untertägliches Pumpspeicherwerk in Steinkohle-Lagerstätten</li> <li>• teilweise untertägliches Pumpspeicherwerk in Braunkohle-Lagerstätten</li> </ul>
2. Kolbenhub-Pumpspeicher:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gravity Power</li> <li>• Lageenergiespeicher</li> <li>• Power Tower</li> </ul>
3. Offshore-Pumpspeicher:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Buoyant Energy</li> <li>• Stensea</li> </ul>

Zur Ergänzung und zum Vergleich sollen hier auch Druckgas-Energiespeicher betrachtet und erläutert werden. Es handelt sich zwar nicht um *Pumpspeicher*, jedoch sind es ebenfalls mechanische Energiespeicher, die auf große stoffliche Speichervolumina angewiesen sind und deren Stromerzeugung über eine Turbine und Generator erfolgt. Daraus ergibt sich eine ähnliche Konstellation wie bei Pumpspeicher-



technologien bezüglich der Netzdienlichkeit und der Vermarktbarkeit. Eine weitere Analogie zu den Pumpspeichern besteht darin, dass es eine etablierte Technologie gibt (Druckluft-Energiespeicher, kurz CAES) sowie diverse Varianten, die sich in einem konzeptionellen Stadium befinden:

Tabelle 2: Liste der zum Vergleich betrachteten Energiespeicher-Konzepte

Energiespeichertyp	Konzept (Name)
4. Druckgas-Energiespeicher:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Druckluft-Energiespeicher (CAES)</li> <li>• Isobarer Adiabater Druckluftspeicher mit kombinierter Verbrennung (ISACOAST-CC)</li> <li>• Adiabater Druckluftspeicher (AA-CAES oder bspw. ADELE)</li> <li>• Hochdruck Druckgasspeicher (UPS®Aero)</li> <li>• Druckgasspeicher mit hydraulischer Komponente (UPS®Hydro)</li> </ul>

### 1. Höhendifferenz-Pumpspeicher

Höhendifferenz Pumpspeicher, zu denen prinzipiell auch die konventionellen Pumpspeicher gehören, sind diesen in Funktion und Aufbau überaus ähnlich.

Die Energie dieser Speicher entspricht der eingelagerten potentiellen Energie des Wassers, welche sich wie folgt berechnet [3]:

$$E_{\text{pot}} = \rho_{\text{Wasser}} \cdot g \cdot \Delta h \cdot V_{\text{Wasser}} \quad (1)$$

mit $E_{\text{pot}}$	Potentielle Energie
$\rho$	Dichte des Wassers (bei Umgebungstemperatur)
$g$	Gravitationskonstante
$\Delta h$	mittlere Höhendifferenz oberes und unteres Wasserreservoir
$V$	Volumen des Wassers im oberen Reservoir

Zu erkennen ist ein linearer Zusammenhang zwischen der potentiellen Energie und der Höhendifferenz  $\Delta h$  bzw. dem Volumen  $V$ , da die Dichte des Wassers und die Gravitationskonstante als konstant betrachtet werden können. Um die Energiemenge eines Pumpspeicherwerks zu vergrößern, ist also eine Erhöhung der Wassermenge  $V$  oder der Höhendifferenz  $\Delta h$  notwendig.

Die folgende Abbildung veranschaulicht den Aufbau von Höhendifferenz-Pumpspeicherwerken:



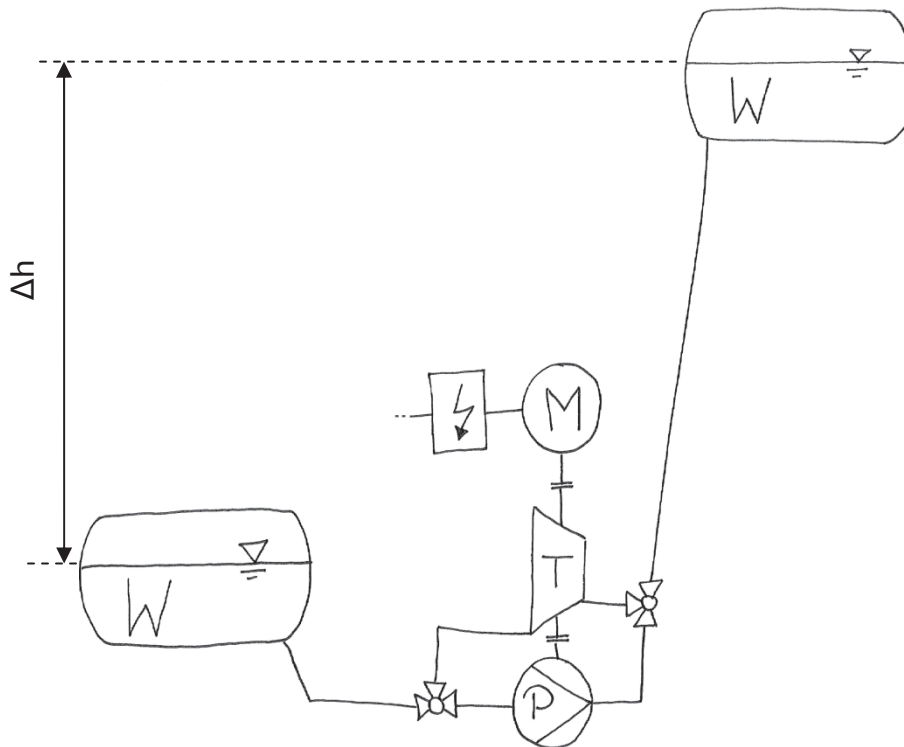


Abbildung 1: Prinzipskizze der Höhendifferenz-Pumpspeicher mit Pumpe (P), Turbine (T), Motor/ Generator (M) und Transformator ( $\zeta$ ), wobei je nach Konzept die Art des Wasserreservoirs (W) variiert.

Die nutzbare Energiemenge des Energiespeichers (Kapazität) fällt durch Reibungsverluste in den Maschinen, deren Eigenverbrauch und Strömungsverluste in Rohrleitungen und Maschinen etwas niedriger aus. Diesen Sachverhalt repräsentiert auch der Wirkungsgrad  $\eta$ , der sich zusammensetzt aus den einzelnen Wirkungsgraden der Energieumwandlungsschritte im Transformator, Motor, Pumpe, den Strömungsverhältnissen in den Rohrleitungen, Turbine, Generator und schließlich wieder einem Transformator. Der Speichervorgang selber wird in erster Näherung als verlustfrei betrachtet, da sich Verdunstungseffekte oder Wasserverluste aus anderen Gründen und Zugewinn durch Regen oder geregelten Wasserzutritt die Waage halten. Im Einzelfall kann es hier zu Abweichungen kommen. [4]

Bei dieser Art von Energiespeichern ist die *Leistung* der Pumpe und der Turbine mit der *Kapazität* über die Dauer des Ein- bzw. Ausspeichervorgangs gekoppelt und kann somit weitgehend unabhängig voneinander entsprechend der räumlichen Gegebenheiten und technisch-wirtschaftlichen Notwendigkeiten frei gewählt werden. Desweiteren ist bei diesem Aufbau die Zyklusfestigkeit sehr hoch, da alle hier eingebundenen Vorgänge elektro-mechanischer Natur und somit maschinenbaulich sehr gut beherrschbar sind.

Obwohl Funktionsweise, Maschinenpark und Berechnung bei diesen Energiespeichern (weitestgehend) mit denen von konventionellen Pumpspeichern übereinstimmen, gibt es doch zum Teil erhebliche Unterschiede.

Das Konzept des **Ringwallspeichers** verzichtet im Gegensatz zu klassischen Pumpspeichern auf landschaftlich vorgegebene Höhenunterschiede. Der Konzept-



vorschlag sieht vor, diese Höhenunterschiede *künstlich* zu schaffen, indem Dämme errichtet werden. Dies ermöglicht zwar den Bau eines Ringwallspeichers in der Ebene, erhöht jedoch das Investitionsvolumen und verstärkt das Problem des Landschaftsverbrauchs. Der Autor des Konzeptes, Matthias Popp, gibt an, dass eine Wirtschaftlichkeit ab einer gewissen Größe erreicht werden kann [5]. Die von ihm vorgeschlagene Konfiguration übertrifft jedoch selbst monumentale Bauten wie den Dreischluchten-Staudamm. Als alternative Lösung schlägt Popp die Verwendung natürlich vorhandener Höhendifferenzen vor, um auch bei kleineren Baugrößen eine wirtschaftliche Errichtung zu ermöglichen [5]. Somit nähert sich diese Idee wieder der klassischen Pumpspeicherbauweise an geodätische Höhendifferenzen optimal zu nutzen.

Die **Nutzung von Staustufen** bietet sich an, da bereits Höhenunterschiede, Wasser und Pumpen mit zugehöriger Infrastruktur an den Schleusen [6] vorhanden sind. Eine Erweiterung um Turbinen erscheint also zunächst als eine eher geringe Investition. Nun stellt sich jedoch die Frage, ob die Energiemenge lohnenswert ist. Die Höhendifferenz ist mit wenigen Metern im Vergleich zu typischen Pumpspeichern mit Fallhöhen von mehreren hundert Metern sehr gering, jedoch könnte ein besonders großes Volumen diesen Nachteil wettmachen. Das zur Verfügung stehende Volumen zu bestimmen, ist nicht trivial: hier müssen die möglichen Pegelschwankungen mit der wirksamen Flusslänge multipliziert werden, sowie jahreszeitliche Schwankungen und andere Einflussfaktoren der Umwelt und der wirtschaftlichen Nutzung der Flüsse berücksichtigt werden. Studien zu diesem Thema wurden am Forschungszentrum Jülich und der Leuphana Universität durchgeführt. Ein Zwischenergebnis dieser Arbeiten ist, dass die von den 326 in Deutschland existenten Schleusen rund 22 Standorte zu einem Energiespeicher >1MWh ausgebaut werden könnten. Hervorzuheben ist das Schiffshebewerk Lüneburg in Scharnebeck mit potenziell 25 MWh Speicherkapazität. Insgesamt ist bei optimalem Ausbau jedoch lediglich eine Kapazität von ca. 400 MWh zu erreichen, was etwa 1% der in Deutschland installierten Pumpspeicher-Kapazität entspricht [6]. Somit ist dieses Konzept zwar reizvoll, jedoch nur für lokal begrenzte Projekte anwendbar.

Die nahezu komplette Verlagerung eines Pumpspeicherwerks in den Untergrund bietet sich als weiteres Konzept an. Die aktuelle Forschung **untertägiger Pumpspeicherwerke** verfolgt zwei verschiedene Ansätze: im Ruhrgebiet untersuchen die Universitäten Duisburg-Essen und Bochum [7] die Möglichkeiten der Nutzung ehemaliger RAG Kohlebergwerk-Standorte, während das Energieforschungszentrum Niedersachsen, eine Einrichtung der TU Clausthal, die Nachnutzung ehemaliger Erzbergwerke vorsieht. Beide Ideen haben gemeinsam, dass der Landschaftsverbrauch minimal ist und gänzlich auf bewährter Maschinenteknik und teilweise sehr hohen Fallhöhen basiert. Dennoch besteht ein gravierender Unterschied zwischen beiden Ansätzen: Während vom Erzbergbau geschaffene Hohlräume noch nach Jahrhunderten unverändert erhalten bleiben [8], da das umgebende Gestein äußerst standfest ist, ist es in einer Kohlelagerstätte notwendig, die Hohlräume so zu konstruieren und zu bauen, dass Hohlraumkonvergenzen durch das die Kohle umgebende „weiche“ Sedimentgestein und den Gebirgsdruck vermieden werden. Dies ist nur mit überaus hohem technischem Aufwand möglich, der die Wirtschaftlichkeit belasten dürfte [9]. Bemerkenswert ist u.a., dass in beiden Konzepten durch die Verlagerung aller Ein-