

Inhaltsverzeichnis

1	Natur als Vorbild.....	1
1.1	Beispiele für Bionik im Alltag.....	1
2	Hintergrund-Informationen.....	1
2.1	Evolution der Energie-Verteilung.....	1
2.1.1	Veränderte Systemgrenzen.....	2
2.1.2	Evolutionstufen tierischen Stoffwechsels.....	2
2.1.3	Energie-Physiologie Säugetier / Mensch.....	3
2.2	Energieversorgung Technik/Tier.....	3
2.2.1	Einzeller und handwerkliche Produktion.....	3
2.2.2	Dampfmaschine/Vielzeller: Serienfertigung.....	3
2.2.3	Tierische Transportsysteme.....	4
2.2.4	Technische Transportsysteme.....	4
3	Technik- vs. Tier-Organismen.....	4
3.1	Gemeinsamkeiten Natur/Stromnetz.....	4
3.2	Unterschiede im Energietransport.....	5
3.3	„Bionische Energieversorgung“.....	5
3.3.1	Just in time – puffern – hamstern - horten.....	5
3.3.1.1	Extrem 1: Just in Time.....	5
3.3.1.2	Extrem 2: minimale Erzeugungskapazität.....	5
3.3.1.3	Zusätzliche Randbedingungen.....	6
3.4	Das könnten „bionische Stromnetze“.....	7
3.4.1	Dimensionierung von Pufferkapazitäten.....	7
3.4.2	Dimensionierung von Leitungen.....	7
3.4.3	Lokale Teilautonomie.....	7
3.4.3.1	Kraft-Wärme-Kopplung, Power-to-Heat.....	8
3.4.4	Umweg über Chemische Energieträger.....	8
3.4.4.1	Selektivität chemischen Stofftransports.....	8
4	Vom Tier zur Pflanze.....	9
4.1	Typisch Pflanze.....	9
5	Zusammenfassung und Aussicht.....	10
5.1	Das wäre erforderlich.....	10
5.2	Inselsysteme des Alltags.....	10
5.2.1	Stromkosten im Inselsystem Auto.....	10
5.2.2	Kosten chemischer Stromspeicherung.....	11
5.2.2.1	Batteriespeicher.....	11
5.2.2.2	Kosten von Power-to-gas/liquid.....	11
5.2.3	Wert einer bionischen Energieversorgung.....	11
6	Disclaimer.....	11

Zusammenfassung

In vielen Technik-Bereichen hat sich die Natur als weiser weil ressourcenschonender Lehrmeister erwiesen. Als Bionik bezeichnet man die Wissenschaft, welche diese Zusammenhänge systematisch erforscht und in die Praxis umzusetzen versucht. Vieles spricht dafür, den bionischen Ansatz, der sich in Architektur, Verkehr und Datennetzen bewährt hat, auch beim Entwurf der zukünftigen Energieversorgung anzuwenden. In diesem Papier, das mehr als Denkanstoß denn als Handlungsanweisung gedacht ist, geht es um ausgesuchte Unterthemen dieses Ansatzes.

1 Natur als Vorbild

Als Bionik bezeichnet man die Methode, Vorbilder in der Natur als Vorlage zur Konstruktion oder Verbesserung technischer Einrichtungen heran zu ziehen.

Den meisten ist nicht bewusst, dass sie im Alltag ganz selbstverständlich technische Errungenschaften nutzen, bei denen die Natur Pate gestanden hat. Zuweilen ging es den Technikern und Wissenschaftlern ähnlich wie den Laien: Erst nachdem man genauer hinschaute, stellte man – oft mehr oder weniger zufällig – fest, dass die eine oder andere vermeintlich neue technische Errungenschaft in der Natur ein alter Hut war und schon lange in viel ausgefeilterer Form existierte. In anderen Fällen nahmen Entwickler bewusst von Anfang an die Natur als Vorbild.

1.1 Beispiele für Bionik im Alltag

So untersuchte beispielsweise Otto Lilienthal (mit seinem Bruder Gustav) vor seinen ersten Flugversuchen den Flug von Vögeln und veröffentlichte die Ergebnisse 1889 in dem Buch „*Der Vogelflug als Grundlage der Fliegekunst*“. Und das erste fabrikmäßig ab 1910 in Serie hergestellte Flugzeug – die Etrich-Rumpler „Taube“ – war bewusst dem Flugsamen der *Zanonia*, einem in Südost-Asien heimischen Kürbisgewächs, nachempfunden.

Schiffs-Echolote und Ultraschall-basierte Einparkhilfen sind ein schwacher Abklatsch dessen, was Fledermäuse und Delphine mit Hilfe des Ultraschalls über ihre Umwelt erfahren. Fledermäuse „hören“ die Art der Beute und können ohne anzustoßen im Dunkeln durch ein Gewirr im Raum aufgespannter 0,1 mm dicker Drähte fliegen.

Wenn Internetknoten Datenpakete auf die verschiedenen abgehenden Leitungen verteilen, so tun sie das nach Algorithmen, die man von Ameisen abgeschaut hat. Die Ameisen „errechnen“ nämlich mit Hilfe von Duftkonzentrationen die optimale Auslastung ihrer verschiedenen Ameisenstraßen, so dass es zu keinen Staus kommt.

2 Hintergrund-Informationen

Angesichts solcher Erfolge bei der Anwendung der Bionik stellt sich die Frage, ob man nicht auch bei der Energiewende von der Natur lernen könnte. Die Antwort ist: man kann!

Vor einem tieferen Einstieg in diese Fragestellung zunächst ein paar Hintergrund-Informationen zum Verständnis. Dabei sind auch Themen einzubeziehen, die auf den ersten Blick nichts mit dem Thema Energiewende zu tun haben.

2.1 Evolution der Energie-Verteilung

Bis in die Neuzeit arbeiteten die meisten Menschen in der Landwirtschaft. Sie arbeiteten überwiegend zur Selbstversorgung, auch wenn ein vergleichsweise kleiner Anteil der Produktion für Andere (z.B. Bewohner der Städte, Klöster und Burgen) abgezweigt wurde.

Die meisten technischen Einrichtungen wurden zu dieser Zeit durch Muskelkraft angetrieben. Mit Muskelkraft erreicht man bestenfalls einige kW Leistung bei Dauerleistungsdichten in der Größenordnung von 1 W/kg¹.

Bemerkenswerte Ausnahmen bildeten Segelschiffe, Wind- und Wasserräder. Diese Ausnahmen zeichneten sich durch stundenlang verfügbare Leistungen von bis zu einigen 10 kW aus. Das war deutlich mehr, als die üblichen Gespanne der Zugtiere Esel, Ochse und Pferd leisten konnten. Diese für damalige Verhältnisse hohe Leistung und hohe Leistungsdichte ließ sich allerdings nur an geeigneten Standorten (Wasserwehr, windhöfliche Standorte) und zu bestimmten Zeiten (windiges Wetter) erreichen. Dann aber wurde die verfügbare mechanische Energie auf mehrere Maschinen verteilt. Noch heute kann man in Straupitz im Spreewald eine restaurierte Windmühle sehen, die je nach Bedarf und Wind eine Getreidemühle, eine Ölmühle oder ein Sägewerk antreibt.

Die Dampfmaschine bot zunächst ähnliche und später deutlich höhere mechanische Leistung als Wind- und Wasserräder. Und sie war unabhängig vom Wetter einsetzbar, zumindest an Orten, zu denen man die nötigen Brennstoffe transportieren konnte. Dieser Transport erfolgte wieder mit Dampfmaschinen auf Schienen als Verkehrswegen mit genormten Eigenschaften.

Schon seit den Zeiten der Wind- und Wasserräder organisierte man die zugehörigen Betriebe „um eine zentrale Energiequelle herum“. Ausgehend von einer zentralen Welle wurden die zu betriebsenden Geräte bei Bedarf mit ankuppelbaren Zahnrädern, Nebenwellen und Riemen angetrieben. Das änderte sich mit der Dampfmaschine zunächst nur wenig.

Im 20. Jahrhundert setzten sich dann aber dezentrale Antriebe mit Elektromotoren durch. Mit der Elektrifizierung wurde es günstiger, jedes Gerät mit einem eigenen Motor auszurüsten, den man jederzeit ein- und ausschalten und zudem in Leistung und Drehzahl steuern konnte.

Damit entfiel der Zwang, in jeder Werkstatt auch in Zeiten geringer Leistungsnachfrage eine eigene Dampfmaschine zu befeuern.

Oder drücken wir es präziser aus: Nun stand im Kraftwerk eine große Dampfmaschine (oder ein

entsprechendes Wasserrad) mit Generator. Diese einzelne große Stromquelle versorgte mit besserem Wirkungsgrad und besserer Auslastung viel mehr Antriebe mit Energie, als es mit eigenen kleinen Dampfmaschinen in den jeweiligen Betrieben möglich gewesen wäre. Der Effizienzgewinn war so groß, dass sich der Aufwand für das neu zu errichtende elektrische Verteilnetz lohnte.

2.1.1 Veränderte Systemgrenzen

In diesem Stromnetz stand elektrische Energie jederzeit mit standardisierter Spannung und Frequenz (im Fall von Wechselspannungsnetzen) zur Verfügung. Dafür mussten die Generatoren nun rund um die Uhr laufen.

Bald erkannte man die vorteilhaften Synergieeffekte verbundener Stromnetze und begann, die zunächst inselartig verstreuten Stromnetze immer engmaschiger miteinander zu verbinden. Derzeitiger Endpunkt dieser Entwicklung ist das Europäische Verbundnetz.

Solch ein Verbund hat den Vorteil, dass Diskrepanzen zwischen Erzeugung und Verbrauch auch überregional ausgleichbar sind. Sogar der plötzliche, ungeplante Ausfall großer Kraftwerke kann abgefangen werden.

Andererseits entsteht so erst die Möglichkeit überregionaler Blackouts wenn die entsprechenden Ausgleichsmechanismen einmal *nicht* funktionieren². Das zeigt:

Manche Fehler in solchen Verbundsystemen sind nur dann zu verstehen, wenn man das gesamte Verbundsystem betrachtet.

Genau das ist Thema der folgenden Betrachtung, die sogar noch einen Schritt weiter geht:

Die gesamte Technik im Einzugsbereich des elektrischen Verbundnetzes wird mit einem einzigen, großen komplexen Organismus verglichen, zunächst mit dem eines Tieres.

Lassen Sie sich von dieser zunächst vielleicht ungewöhnlich erscheinenden Perspektive nicht abschrecken. Die Vorteile werden sie weiter unten sicher verstehen.

2.1.2 Evolutionsstufen tierischen Stoffwechsels

Ohne sich dessen bewusst zu sein, haben die Konstrukteure mit der oben geschilderten Entwicklung Trends nachvollzogen, die man auch in der Evolution der Baupläne der Tiere findet.

Zunächst gab es nur Einzeller, die „alles selber machen mussten“. Einzeller müssen in dem chemischen Milieu leben, das die Umwelt gerade bietet. Sie müssen die Energie für ihren Stoffwechsel und

¹ Auf den gesamten Organismus bezogene Dauerleistung. Spezialisierte Muskeln allein wie die Flugmuskeln von Fliegen erreichen 80 W/kg

² Wie am 4. November 2006, als in weiten Teilen Europas durch einen Schaltfehler der Strom für mehrere Stunden ausfiel.

für aktive mechanische Bewegungen selbst bereit stellen. Sie sind entweder abhängig von Nahrung, die zufällig vorbeibereit³ oder sie müssen sich zu ihrer Nahrung treiben lassen bzw. zur Nahrung kriechen. Geht beides nicht, bleibt nur, von internen Reserven zu zehren oder den Stoffwechsel herunter zu fahren und auf bessere Zeiten zu warten.

Nach dem Zusammenschluss vieler Zellen zu mehrzelligen Tieren kam es bald zur Arbeitsteilung der Zellen. Mit als erstes entstand ein Verdauungs- bzw. Darmtrakt. Die Zellen des Darmtraktes sind darauf spezialisiert, die Nahrung chemisch zu zerlegen und aus den Bruchstücken „standardisierte“ chemische „Energieträger“ zu synthetisieren. Diese werden dann in körpereigene Flüssigkeitsräume abgegeben und stehen so den übrigen Zellen als „Brennstoffe“ (und „Baustoffe“) zur Verfügung. Ab einer Größe des Tieres von einigen Millimetern werden diese körpereigenen Flüssigkeiten (Hämolymph oder Blut) durch mehrere dezentrale Herzen oder ein zentrales Herz umgewälzt.

Im Fall Sauerstoff (O₂)-atmender Tiere⁴, müssen Zellen, die mehrere Millimeter von der Körperoberfläche entfernt sind, auch eigens mit O₂ versorgt werden. Bei Spinnen und Insekten reichen dazu feine Röhrchen (Tracheen), durch die Luft von der Oberfläche bis in die Zellen innen im Tier gelangen kann. Viele andere Tiergruppen (viele Würmer, Krebse, Wirbeltiere) entnehmen der Umgebung O₂ mit Kiemen oder Lungen, und „laden“ eine körpereigene Flüssigkeit (meistens Blut) „mit O₂ auf“, aus der sich dann die O₂-verbrauchenden Zellen bedienen.

2.1.3 Energie-Physiologie Säugetier / Mensch

Bei den Säugetieren⁵ muss das Blut lebenslänglich aktiv gepumpt werden, damit ständig alle Zellen genügend mit O₂ und Glucose versorgt sind. Im Normalfall sorgt die Lunge dafür, dass die roten Blutkörperchen im arteriellen Blut immer zu fast 100% mit O₂ beladen sind.

Darm und Leber⁶ regeln den Blutzuckerspiegel (Glucosespiegel) bei Gesunden auf einen Pegel von etwa 1,1 g/l (~6mmol/l oder ~110 mg/dl) ein. Bei einer freien Enthalpie von ca. -2880 kJ/Mol und ca. 5 l Blutvolumen kann der erwachsene menschliche Körper also etwa 84000 Ws aus dem im Blut vorhandenen Blutzucker gewinnen⁷. Bei einem Grundstoffwechsel von ca. 100 W käme man damit

also theoretisch⁸ ~14 Minuten aus; bei maximaler Leistung entsprechend etwa eine Minute. Und dann?

Wenn vom Darm kein Nachschub kommt, greift der Körper auf schnell aktivierbare Reserven aus Glykogen („Leberstärke“) zurück, die überwiegend in Leber, Niere und Muskeln gespeichert sind (einige 100 g). Das reicht dann – je nach Anstrengung – einige Stunden.

Sind auch die Glykogen-Reserven verbraucht, geht der Körper an seine Fettreserven. Damit kann man je nach Leibesfülle Tage bis Monate auskommen⁹. Umgekehrt füllt der Körper, sobald das Nahrungsangebot den Verbrauch übersteigt, zunächst die Glykogenspeicher und dann die Fettreserven wieder auf.

Bei rasch einsetzenden Extrembelastungen reicht diese Flexibilität jedoch nicht. Dann bedienen sich die Muskeln aus lokalen, internen Puffern, die zwar typischerweise nur einige Sekunden reichen, dafür aber hohe Kurzzeit-Leistungen erlauben.

2.2 Energieversorgung Technik/Tier

Die Energieversorgung der Technik vor der Erfindung der Dampfmaschine ist in manchen Aspekten mit der Strategie der Einzeller vergleichbar. Jede Einheit arbeitet für sich.

2.2.1 Einzeller und handwerkliche Produktion

Bei den Einzellern in der Natur findet man eine Vielfalt verschiedener Arten mit einer erstaunlichen Zahl unterschiedlicher Stoffwechselwege. Jeder dieser Stoffwechselwege stellt eine Anpassung an den jeweiligen Lebensraum dar.

Ähnliches gilt für die ursprüngliche Typenvielfalt von Wind- oder Wasserrädern. Wenn sich gewisse Standards herausbildeten, dann mehr zur Vereinfachung der Herstellung als aus technischen Gründen. Wegen der handwerklichen Herstellung waren Anpassungen an lokale Gegebenheiten (z.B. verfügbare Hölzer, Besspannstoffe und andere Baumaterialien, verschiedene Wasserläufe und Windhöflichkeit von Standorten) kein Problem.

2.2.2 Dampfmaschine/Vielzeller: Serienfertigung

James Watt hatte noch damit zu kämpfen, dass Schraubengewinde von Hand gedreht wurden. Deshalb passte auf jeden der Bolzen zum Festschrauben des Kesseldeckels seiner Dampfmaschinen meist nur eine bestimmte Mutter, die nicht mit anderen verwechselt werden durfte.

Mit der Serienproduktion von Dampfmaschinen entstand so ein Zwang zu industrieller, arbeitsteiliger Serienfertigung aus genormten Teilen. Die Fabri-

3 Aktive Einzeller leben so gut wie immer in wässrigem Milieu.

4 Es gibt auch sog. Anaerobier, die ihren Stoffwechsel ohne Sauerstoff betreiben können.

5 zu denen auch der Mensch gehört, auf den sich die folgenden Zahlen beziehen

6 und die anderen Organe, die durch das Insulin dazu angeregt werden, Blutzucker aufzunehmen oder abzugeben

7 Vorausgesetzt, der Abbau erfolgt aerob, d.h. bei hinreichender Sauerstoffzufuhr; Alternativ wird nur ein Bruchteil der Energie umgesetzt und man bekommt einen Muskelkater.

8 Theoretisch, weil Unterzuckerung mit einem Pegel von unter 3 mmol/l Glucose rasch zum Tode führt

9 Als Faustregel kann man sich merken: 1 kg Fett entspricht ca. 10 kWh oder ~36 000 000 Ws, womit der Körper in Ruhe also 360 000 s oder 4 Tage und 4 Stunden auskommt.

ken dazu mussten die Rohstoffe, besonders Eisen(-Erz) und Kohle von Minenbetrieben beziehen. Um die schieren Mengen zu transportieren, reichte die Muskelkraft von Zugtieren bald nicht mehr aus. Die geringe Leistungsdichte (10 W/kg) früher Dampfmaschinen und deren lange Vorwärmzeit verhinderten, dass sie sich als Straßenfahrzeug-Antrieb durchsetzten¹⁰. Deshalb „mussten“ vereinzelt schon existierende Muskelkraft-betriebene Eisenbahnen zu dampfbetriebenen Eisenbahnen¹¹ weiterentwickelt werden.

Vergleichbare Zwänge kamen auf, als sich vor gut 600 Millionen Jahren erstmals mehrzellige Organismen bildeten. In einem vielzelligen Organismus müssen die Stoffwechselwege und vor allem die Steuerung der Gene, die letztendlich die Differenzierung und Formgebung des gesamten Organismus bestimmen, aufeinander angepasst sein¹². Vielzellige Organismen bestehen aus Zellen verschiedener wohl definierter Typen. Organe bilden sich aus Gruppen von Zellen eines oder mehrerer solcher Zelltypen. Mit der Erfindung mehrzelliger Organismen „erfand“ die Natur die Serienproduktion weniger standardisierter Zelltypen als Bausteine eines Ganzen, des vielzelligen Organismus. Rasch danach erfand die Natur bei den Tieren auch den Darm, den (Blut-)Kreislauf und das Nervensystem.

2.2.3 Tierische Transportsysteme

Tierische Kreislaufsysteme transportieren

- das wässrige Umgebungsmilieu für die Körperzellen,
- Energieträger („Brennstoffe“),
- Atemgase (O₂),
- „Abgase“ (Kohlendioxid CO₂),
- Abfallprodukte des Energiestoffwechsels,
- Bausteine für Aufbau/Reparatur des Körpers,
- Abfall gestorbener Zellen und
- Signalträger (Hormone)

zu den einzelnen Zellen und von ihnen weg. Mit der Höherentwicklung der Tiere zeigt sich eine Tendenz, über dieses Transportsystem auch Abfälle der Zellen einzusammeln, zu bearbeiten, und den Rest als Harn auszuscheiden¹³.

¹⁰ Zum Vergleich: Moderne Verbrennungsmotoren erreichen 1000 W/kg

¹¹ bei der wegen des geringen Reibungskoeffizienten zwischen Rad und Schiene ein hohes Lokomotivgewicht von Vorteil ist,

¹² Abweichungen, davon, die während des Lebens einzelner Individuen entstehen, machen sich oft als unförmig wuchernde Krebsgeschwulste bemerkbar.

¹³ Regenwürmer haben beispielsweise noch in jedem Segment („Ring“) ein paar nierenähnliche Organe

- Parallel dazu gibt es ein weit verzweigtes Nervensystem zur bidirektionalen „schnellen“¹⁴ Nachrichtenübertragung.

2.2.4 Technische Transportsysteme

Vergleicht man den tierischen Organismus mit dem „Organismus Stadt“, findet man Parallelen, aber auch Unterschiede.

In einer typischen Stadt gibt es mehrere Möglichkeiten Energie, Baustoffe und Abfall zu verteilen und einzusammeln:

- Wasser und Abwasser werden über streng getrennte Netze verteilt und wieder eingesammelt,
- „Energietransport“ erfolgt
 - masselos als Elektrizität per Stromnetz,
 - massebehaftet als Energieträger Gas per Gasleitungsnetz,
 - massebehaftet als Energieträger Öl, Holz oder dergl. per Straßentransport
 - massebehaftet als Niedertemperatur-Wärme in Fernheizungsrohren
- Atemgase und Abgase werden einfach der Atmosphäre entnommen und wieder eingeleitet,
- Kompakte Abfälle werden in Mülltonnen gesammelt und per Straßentransport in konzentrierten Bearbeitungszentren gesammelt.
- Die Übertragung von Informationen erfolgt
 - per Rundfunk ungerichtet unidirektional,
 - per Mobilfunk adressiert bidirektional,
 - per Telefonnetz adressiert bidirektional,
 - per DSL adressiert bidirektional,
 - per Briefpost massebehaftet adressiert bidirektional.

3 Technik- vs. Tier-Organismen

Kommen wir zurück zum eigentlichen Thema dieses Aufsatzes, zum Stromnetz und seinem Umbau im Rahmen der Energiewende.

3.1 Gemeinsamkeiten Natur/Stromnetz

Bei einem Vergleich zwischen den Energie-Verteilungssystemen in Tieren und dem klassischen Stromnetz, wie es etwa bis zur Jahrtausendwende organisiert war, fallen Gemeinsamkeiten auf:

¹⁴ 0,1 m/s bis 120 m/s

1. Die Energie wird von einer oder wenigen zentralen Quellen (Darmtrakt, Kraftwerke) zu vielen kleinen Verbrauchern transportiert.
2. Der Leistungsbedarf der Verbraucher (Zellen, elektrische Betriebsmittel) kann sich im Bruchteil einer Sekunde um mehr als den Faktor 100 ändern.
3. Bereitstellung und Transport der Energie wird Bedarfs-abhängig moduliert.

3.2 Unterschiede im Energietransport

Es gibt jedoch fundamentale Unterschiede zwischen Natur und Technik in der Art des Energietransports.

1. Die Natur arbeitet seit je her fast ausschließlich mit regenerativen Energiequellen, die Technik arbeitet seit ~200 Jahren überwiegend mit fossilen Energieträgern.
2. Innerhalb der Tiere wird Energie immer in Form chemischer Energieträger transportiert¹⁵, das Stromnetz überträgt Energie ohne Massetransport.
3. In unseren Adern werden die Energieträger mit $<0,5$ m/s transportiert das Stromnetz überträgt Energie mit annähernd Lichtgeschwindigkeit fast verzögerungsfrei über große Distanzen.
4. Elektrische Energie ist „wertvoller“ als chemische oder thermische Energie, weil sie direkter und mit höherem Wirkungsgrad in andere Energieformen oder Energieträger gebracht werden kann.
5. Während die Natur kaum Probleme mit fluktuierenden Energieangeboten hat, muss in das Stromnetz jederzeit genau so viel Leistung eingespeist werden wie entnommen wird¹⁶.

Deshalb stellt der Energietransport im Stromnetz die extremste denkbare Form einer „just in time“-Versorgung dar – mit allen Problemen von „just in time“.

¹⁵ In der Natur spielen elektrische Spannungen in Form von Membranpotentialen bei der Umsetzung verschiedener Energieformen (Photosynthese, Atmungskette in Mitochondrien, Informations-Übertragung in Nerven) durchaus eine entscheidende Rolle. Dabei findet jedoch kein Energietransport über Distanzen von mehr als wenigen Mikrometern statt.

¹⁶ Die in elektrischen und magnetischen Feldern im Netz gespeicherte Energie entspricht etwa der Energie, die das Netz in $<0,001$ s transportiert und kann daher vernachlässigt werden.

3.3 „Bionische Energieversorgung“

Im Vergleich zum Energietransport im Stromnetz arbeitet eine Energieversorgung mittels Transport chemischer Energieträger vergleichsweise träge. Umgekehrt erzeugt ein Transport chemischer Energieträger automatisch Pufferkapazitäten in den Transportcontainern oder im Leitungsvolumen und an den Enden der Transportketten-Glieder. Man kann davon ausgehen, dass die Evolution diese Pufferkapazitäten optimiert hat. Da lohnt es sich

1. die Organisation dieser Pufferkapazitäten zu erforschen und
2. die Energieversorgung nach ähnlichen Kriterien zu strukturieren.

Eine so aufgebaute Energieversorgung wird im Folgenden als „bionisch organisierte Energieversorgung“ oder kurz „bionische Energieversorgung“ bezeichnet.

Der allein der Technik vorbehaltene masselose Energie-Ferntransport in Stromnetzen bietet große Vorteile im Vergleich zu biologischen Energie-Verteilungssystemen.

Seine Achillesferse ist der Zwang, die Speise- und Entnahmeleistung jederzeit im Einklang zu halten. Daher ist zu untersuchen, ob dieser Schwachpunkt durch Anwendung bionischer Prinzipien zu entschärfen ist.

3.3.1 Just in time – puffern – hamstern - horten

In die Optimierung von Transport- und Pufferkapazitäten gehen zahlreiche Kriterien ein, von denen hier nur die wichtigsten genannt werden sollen. Zum besseren Verständnis seien zwei Extreme beschrieben:

3.3.1.1 Extrem 1: Just in Time

Extrem 1 ist die schon erwähnte „just in time“ Strategie. Dabei gibt es – abgesehen von der Menge des auf dem Transportweg befindlichen Energieträgers im Fall materialbehafteten Transports¹⁷ – keine Pufferkapazitäten. Daraus folgt:

1. Die Erzeugungs- und Transportkapazität muss auf den größten möglichen Bedarf ausgelegt sein.
2. Erzeugung und Transport müssen sich mindestens so schnell ändern können wie der Bedarf.

¹⁷ Pufferkapazitäten in Leitungen können beträchtlich sein. Erdgas und Erdöl bewegen sich in Pipelines etwa mit Fußgängertempo, so dass allein der Inhalt der Leitungen (ohne Kavernen!) für Tage bis Wochen reicht.

3.3.1.2 Extrem 2: minimale Erzeugungskapazität

Extrem 2 minimiert die Erzeugungs- und Transportkapazität. Daraus folgt:

1. **Erzeugungs- und Transportkapazität** brauchen nur **wenig mehr als das zeitliche Mittel des Bedarfs** abzudecken.
2. Alle **Bedarfsschwankungen** müssen **aus Pufferspeichern bedient** werden, was die Aufnahme-/Abgaberate des Puffers bestimmt.
3. Die Aufnahme-/Abgaberate des **Puffers** muss der **Geschwindigkeit der Bedarfsänderung folgen** können.
4. Die **Kapazität des Puffers** muss die längsten erwarteten **Perioden abdecken, während derer der Bedarf die Erzeugungskapazität überschreitet**.
5. Die **Transportkapazität zwischen Pufferspeicher und Bedarfspunkt** muss **auf den maximalen Bedarf und dessen maximale Änderungsgeschwindigkeit ausgelegt** sein.

Wie Sie nach oben Ausführungen sicher erkannt haben, funktionieren klassische Stromnetze in erster Näherung nach den Prinzipien von Extrem 1, dem „Just in time Prinzip“.

Biologische Energieversorgungen entsprechen mehr dem Extrem 2, allerdings mit mehreren unterschiedlichen, in Stufen hintereinander geschalteten (kaskadierten) Pufferspeichern (Glucose, Glycogen, Fettreserven um nur die wichtigsten zu nennen).

3.3.1.3 Zusätzliche Randbedingungen

Das klassische Stromnetz wurde oben als „Just in time“-Energietransportsystem vorgestellt. Die Kraftwerkleistung wird zu jeder Zeit dem Bedarf nachgefragt. Das ist nur möglich, weil gute Verbrauchsprognosen dafür sorgen, dass die „überraschenden“ Abweichungen vom „Fahrplan“ nur wenige Prozent betragen. So werden für 40 GW bis 70 GW Leistungsbedarf in den deutschen Regelzonen des Verbundnetzes nur $\pm 0,7$ GW Regelleistung benötigt. Zum Vergleich: Beim Übergang vom Ruhezustand zur Stressreaktion mit Flucht kann sich die Leistung des menschlichen Stoffwechsels ohne Vorwarnung mehr als verzehnfachen. Während schneller Bewegungen (Sprung, Wurf, Sprint) können wir kurzfristig etwa das 30-fache der Ruheleistung abrufen.

Allerdings gibt es auch in klassischen Stromnetzen durchaus verschiedene Typen von Pufferspeichern.

- Auf der Erzeugerseite gibt es die sogenannte Momentanreserve in Form des

Trägheitsmoments der rotierenden Massen in Turbinen, Generatoren und Windrad-Flügeln¹⁸.

- An wenigen geeigneten Standorten gibt es Pumpspeicherwerke. Die können in Minuten zwischen der Abgabe und Aufnahme von Leistung umschalten. Aufgrund ihrer Leistungsklasse von typisch mehreren 100 MW¹⁹ sind sie an die höchste Netzebene angebunden.
- Die Netzweige zu einzelnen als wichtig betrachteten Verbrauchern²⁰ mit Anschluss an die Mittelspannungs- und Niederspannungsebene sind über eine USV gegen mehr oder wenige lange Versorgungsunterbrechungen abgesichert.
- In den feinsten Verästelungen der Niederspannungsebene gibt es Puffer, die jeder aus eigener Anschauung kennt: Jedes Netzteil verstetigt das Wechselspannungsbedingt unstete Leistungsangebot, indem es Energie in Siebkondensatoren und Siebdrosseln zwischenspeichert.

Trotzdem sind alle diese Puffertypen nicht geeignet, netzweit Störungen von nur einer Minute abzufedern. Sie reichen auch nicht, um Leitungen vor Verbrauchsspitzen zu schützen (s.o. 3.3.1.2, S. 6).

In einem „bionischen Stromnetz“ gäbe es Puffer mit ähnlichen Aufgaben wie im tierischen Organismus: Puffer würden den Energiefluss verstetigen, Lastspitzen abfedern und einen kurz- oder mittelfristigen „Hungerbetrieb“ ermöglichen.

Jeder, der einmal versucht hat, abzunehmen, weiß, dass der Körper erst dann auf seine Fettreserven zurück greift, wenn die Glykogen-Reserven aufgebraucht sind (und sich schon ein Hungergefühl eingestellt hat s.o. 2.1.3, S 3). Alternativ könnte theoretisch ja schon mit beginnendem Glykogen-Abbau auch mit dem Fettabbau begonnen werden. Das ist aber nicht der Fall und zwar aus gutem Grund: Der Fettabbau ist biochemisch aufwändiger und mit mehr Verlusten (~30 %) verbunden als der aerobe Glykogen-Abbau. Dazu sind die Fettreserven erheblich kompakter und leichter zu lagern, als wenn dasselbe Energie-Äquivalent als Glycogen oder gar als im Blut gelöste Glucose gespeichert werden sollte²¹.

18 Windrad-Flügel sind in ihrer Drehzahl zwar gewöhnlich nicht wie Synchrongeneratoren starr an die Netzfrequenz gekoppelt, aber seit einigen Jahren kann die Regelung der Umrichter eine solche Kopplung nachbilden.

19 Zusammen haben alle Pumpspeicherwerke Deutschlands ~6 700 MW Generatorleistung, also knapp 10 % des Leistungsbedarfs. Ihre Gesamt-Speicherkapazität beträgt ~40 000 MWh.

20 Krankenhäuser, Rettungsleitstellen, Mobilfunkstationen, Flugauflicht, Telefonvermittlungsstellen, Rechenzentren

21 Der Brennwert von reinem Fett ist ~39 000 J/g, der von Fettgewebe ~29 000 J/g. Glucose mit dem Brennwert von 1 g

Das Beispiel zeigt: der „Wert“ eines Pufferspeichers für Energie bemisst sich auch nach

1. dem **Wirkungsgrad**,
2. der **Leistungsdichte**, dem Leistungsge-
wicht und dem Leistungsvolumen,
3. der **Energiedichte**, dem Energiegewicht
und dem Energievolumen,
4. den Speicherkosten pro **Energiemenge**,
5. der **Skalierbarkeit**,
6. der **Redundanz**
und nicht zuletzt
7. nach der **Wichtigkeit** der Versorgung.

Auch die Kapazität von Pufferspeichern will opti-
miert sein, wie sich ebenfalls leicht am Beispiel der
menschlichen Fettreserven verdeutlichen lässt:

Wer zu mager ist, friert leicht und hat im Krank-
heitsfall weniger Reserven, was die allgemeine Le-
benserwartung verkürzt. Fettleibige hingegen ver-
kürzen ihre Lebenserwartung durch Überlastung
von Stoffwechsel, Kreislauf und Bewegungsappa-
rat, die im wahrsten Sinn des Wortes zu viel (er)tra-
gen müssen. Da hamstert und hortet der Körper
mehr als im Normalfall gut tut.

3.4 Das könnten „bionische Stromnetze“

3.4.1 Dimensionierung von Pufferkapazitäten

Wer Sport treibt und/oder körperlich arbeitet,
braucht mehr Nahrung als eine „Sofakartoffel“.
Trotzdem essen wir nicht im Moment größter kör-
perlicher Anstrengung. In einer bionisch organisier-
ten Energieversorgung sind nämlich Bereitstellung
von Energie und akuter Bedarf weit gehend vonein-
ander entkoppelt. Wenn wir (oder unsere tierischen
Verwandten) unter Stress geraten, wird das Ver-
dauungssystem im Rahmen der Kampf-oder-
Flucht-Reaktion sogar auf Sparflamme geschaltet,
aber trotzdem mehr Blutzucker bereit gestellt. Aus-
gerechnet zur Deckung des Maximalbedarfs greift
die Biologie auf Puffer zurück! Entsprechend sind
die Puffer dimensioniert. Winterschläfer legen so-
gar „Jahreszeiten-Speicher“ an. Gleiches würde für
eine bionisch organisierte Energieversorgung gel-
ten. Die Dargebotsabhängigkeit der erneuerbaren
Energien wäre dann kein Problem mehr.

3.4.2 Dimensionierung von Leitungen

Wenn einzelne Körperteile einen erhöhten Energie-
bedarf haben, erweitert sich in diesen Körperteilen
der Durchmesser der kleinsten Verästelungen der
Arterien, durch die dann mehr Blut fließen kann.
Diese Regelung ist sehr effektiv, weil bei gegebenem
Druck die Strömungsgeschwindigkeit mit der
vierten Potenz des Durchmessers eines „Rohres“

Fettgewebe muss in 1,6 l Blut gelöst werden. Höhere Kon-
zentrationen würden zu osmotisch bedingten Problemen füh-
ren.

zunimmt²².

In technischen Systemen ist das im weitesten Sinn
mit der Funktion eines regelbaren Ortsnetztrafos
(eines RONTs) vergleichbar.

Wenn sich aber zu viele oder alle²³ Kapillaren des
Körpers auf weit stellen, ist der Kreislauf überlastet.
In diesem „Schock“ genannten lebensgefährlichen
Zustand bricht der Blutdruck zusammen. Im Be-
reich der Elektrotechnik wäre das vergleichbar mit
dem Spannungsabfall (oder Frequenzabfall), der
sich in einem Stromnetz einstellt, wenn mehr Ver-
braucher gleichzeitig eingeschaltet werden, als der
Auslegung entspricht.

Bei chronisch erhöhtem Bedarf wie z.B. sportlichem
Training, aber auch wenn benachbarte Gefäße
ausfallen, entstehen zusätzliche neue Adern. So
wie Netzplaner mehr Leitungen legen, wenn zu-
sätzliche neue Verbraucher angeschlossen werden
oder wenn alte Leitungen marode geworden sind.

Beim Start zu einem Sprint leisten Beine und Ge-
säß bis mehrere Kilowatt – eine Leistung, die nur
wenige Sekunden lang aufrecht erhalten werden
kann, weil die Energie dafür aus lokalen, dezentra-
len Speichern bereit gestellt wird. In klassischen
Stromnetzen müssten alle Leitungen vom Kraft-
werk ausgehend für solche Spitzenleistungen aus-
gelegt sein. In einem bionisch organisierten Strom-
netz gäbe es für Verbraucher mit hohen zu erwar-
tenden Spitzenlasten passende dezentrale Puffer-
speicher. In Einzelfällen existiert so etwas schon –
aus wirtschaftlichen Gründen!

Ein Beispiel für solch einen Pufferspeicher ist das
Schwungrad-System am Max-Planck-Institut für
Plasmaphysik in Garching, das 20 Minuten lang be-
schleunigt wird um dann 10 s lang 150 MW Lei-
stung abzugeben. Dank des Pufferspeichers werden
so die Leitung zum Schwungrad und das vorgela-
gerte Netz statt mit 150 MW nur mit 1,25 MW be-
lastet.

In ausgedehnten Netzen dünn besiedelter Gebiete
(z.B. in ländlichen Gegenden der USA) werden lan-
ge, schwache Endzweige des Netzes heute schon
mit Akkumulatoren stabilisiert. So kann man kurze
Lastspitzen dem lokalen Puffer entnehmen statt die
gesamte Zuleitung des Netzzweiges verstärken zu
müssen. Es reicht, wenn die Stickleitung für etwas
mehr als den mittleren Leistungsbedarf dimensio-
niert ist (s.o. 3.3.1.2, S. 6).

Umgekehrt beginnt man, die Energie aus Lei-
stungsspitzen von Windparks lokal in Batterien zu
speichern, um Leitungen zu entlasten und um ga-
rantierte Regelleistung bereit stellen zu können,
was eine höhere Vergütung bringt.

22 Diese Folge des Gesetzes von Hagen-Poiseuille gilt für Blut
wegen der roten Blutkörperchen in kleinsten Verästelungen
nur eingeschränkt.

23 Zum Beispiel durch Stammhirn-Verletzung, Vergiftung oder
durch unkontrolliertes Eindringen von Bakterien in den Blut-
kreislauf (Sepsis, „Blutvergiftung“)

3.4.3 Lokale Teilautonomie

Bionisch organisierte Stromnetze könnten aber noch mehr. Mit Pufferspeichern und redundanten Kraftwerken ausgerüstet, wären „bionische Stromnetze“ mehr oder weniger immun gegen Großstörungen. Im Fehlerfall würden sie sich einfach automatisch in viele kleine autonome Inselnetze aufteilen.

Damit diese automatische Aufteilung auf allen Netzebenen funktionieren könnte, müssten alle potentiellen Inselnetze – und daher alle Netzebenen und Netzsegmente – Pufferspeicher und regelbare Kraftwerke geeigneter Leistung und Kapazität enthalten.

Solch ein Notbetrieb vieler Inselnetze benötigt in der Summe mehr Regelenergie als der Regelbetrieb im Verbund und wäre entsprechend kostspieliger. Die Zusatzkosten würden sich aber vermutlich wegen der vermiedenen Versorgungsunterbrechungen trotzdem rechnen. Für den Großteil dieser Einsparungen würde es ausreichen, wenn der Inselbetrieb zumindest kurzfristig möglich wäre²⁴. Das biologische Pendant dazu ist der abgeschnittene Finger, der unter guten Bedingungen auch nur einige Stunden überleben kann, bis er eventuell wieder angenäht wird.

3.4.3.1 Kraft-Wärme-Kopplung, Power-to-Heat

Alles in Allem gewinnt der Muskel mechanische Energie aus chemischer Energie mit einem Wirkungsgrad von etwa 33%. Der Rest wird zu Abwärme. Bei den geschilderten vorgelagerten chemischen Umwandlungen fällt zusätzliche Abwärme an. Bei Säugetieren und Vögeln so viel, dass sie damit ihre Körperkerntemperatur auf 37°C bzw. 41°C einstellen können.

In der Technik spricht man bei Kraftwerken, deren Abwärme zum Heizen genutzt wird, von Kraft-Wärme-Kopplung – also auch ein alter Hut in der Natur.

Droht der Körper zu unterkühlen, reicht die „normale“ Abwärme nicht. Dann können wir uns „warmzittern“. Auch kleine Tiere wie Hummeln bringen sich so auf „Flug-Temperatur“. Darüber hinaus verfügen Menschen als Babys und manche andere Säugetierarten²⁵ lebenslänglich über „Braunes Fettgewebe“²⁶. Das kann Fett direkt ohne Muskelzittern verbrennen, allein um Wärme zu erzeugen.

Als „Power to Heat“ bezeichnen Techniker die Umwandlung von Strom in Wärme. Weil elektrische Energie entropisch viel wertvoller als (Niedertemperatur-)Wärme ist, erscheint dies zunächst unsinnig, auch wenn dies mit einer Wärmepumpe ge-

24 Notstromversorgungen werden gewöhnlich auch nicht für Dauerbetrieb ausgelegt.

25 besonders solche, die nach Winterruhe oder nach Winterschlaf rasch aktiv werden müssen

26 das seine Farbe und seinen Namen einer besonders hohen Dichte an Mitochondrien in den Zellen verdankt

schieht. Die Umsetzung in einem Widerstand ist aber nur üblich, wenn die Betriebsmittel „nichts kosten“ dürfen, oder wenn der Strompreis negativ ist, die „Vernichtung“ elektrischer Energie also bezahlt wird.

Natur und Technik nutzen also beide „Power to Heat“, aber mit unterschiedlichen Einsatzzwecken.

3.4.4 Umweg über Chemische Energieträger

In der Technik werden zur Zeit (2015) neben Großbatterie-Speichern erste Power-to-Gas- oder Power-to-Liquid-Anlagen entwickelt und erprobt. Damit soll ein zeitliches und/oder räumliches Überangebot per se nicht speicherbarer elektrischer Energie in leicht speicherbare chemische Energieträger umgewandelt werden. Für Jahreszeiten-Speicher sind flüssige chemische Energieträger attraktiver als gasförmige, da sie bis zum Faktor 1000 weniger Volumen beanspruchen²⁷.

In der Natur sind wechselseitige Umwandlungen chemischer Energieträger völlig selbstverständlich. Wenn in der Peripherie akut eine hohe Nachfrage nach Energie ist, „wird verwertet, was gerade da ist“. Fehlt dem Muskel O₂ während sein Glykogen-Vorrat noch nicht aufgebraucht ist, wird das Glykogen (und damit Glucose) nicht komplett zu CO₂ und Wasser, sondern nur zu Milchsäure abgebaut, die ins Blut abgegeben wird²⁸. Das Recycling erfolgt zeitlich und räumlich von Verbrauch getrennt in der Leber. Die macht aus der Milchsäure wieder Glucose, aus welcher der Muskel später seinen Glykogen-Vorrat wieder auffüllt.

Im Extremfall (Hunger, extremes Fasten) nutzt der Körper sogar Struktureiweiße zur Energiegewinnung²⁹. Die Abbauprodukte müssen dann von der Leber entgiftet werden³⁰.

3.4.4.1 Selektivität chemischen Stofftransports

Solches Recycling von Abbauprodukten und Re-synthese von Energieträgern fällt der Natur leicht, weil sie in ihren Stofftransport-Leitungen einen Trick beherrscht, den die Technik für den Stofftransport nicht nutzt, aber gerade in den Informationsnetzwerken einführt:

Bis vor einigen Jahren existierten für Telefonie, Telex, Kabelfernsehen etc. getrennte Netzwerke, Übertragungskanäle und -Codierungen. Heute gibt es für fast alles ein und dasselbe Netzwerk, das In-

27 Ein Normkubikmeter Erdgas (oder Methan) hat einen ähnlichen Heizwert wie 1 l Heizöl, nämlich ~10 kWh

28 Die damit einher gehende Übersäuerung empfindet man als Muskelkater

29 Wie ein Dampfschiffkapitän, der als Notlösung das Mobilar verheizt, um noch den rettenden Hafen zu erreichen.

30 Bestreitet der Körper wegen zu Protein-lastiger Ernährung (übermäßiger Fleischkonsum) seinen Betriebsstoffwechsel mit Proteinabbau, reicht die Entgiftung evtl. nicht aus. Dann entstehen Harnstoffkristalle in den Gelenken und in Folge Gicht. Der Volksmund sagt: Der ist so reich, der frisst sich die Gicht an.

ternet. Darüber schickt man alle möglichen Typen von Nachrichten, die dazu in Datenpakete mit genormtem „Adresskopf“ (IP-Adresse) „verpackt“ werden. Die Switches, Router und Endgeräte handhaben die für sie bestimmten Datenpakete allein vermittelt dieser Adresse, egal welche Bedeutung die Nutzdaten in den Datenpaketen haben³¹.

Der Vorteil ist leicht verständlich: man braucht so nur ein einziges Netzwerk, das nach einem einheitlichen Schema funktioniert anstatt wie früher verschiedene unterschiedlich organisierte Netzwerke parallel betreiben zu müssen. Das ist ein größerer Vorteil als der Aufwand zur Erkennung der richtigen Datenpakete in Switches, Routern und Endgeräten.

In der Natur ist dies jedoch auch einmal wieder ein alter Hut. Die Adern des Blutkreislaufs transportieren ständig tausende verschiedener Moleküle und „Pakete“ wie die roten Blutkörperchen oder Zellen des Immunsystems. Mit Hilfe selektiver Rezeptoren und Kanäle erkennen die mit dem Kreislauf verbundenen Zellen, welche der Moleküle für sie eine Bedeutung haben. Die Selektivität beruht dabei auf den Formen der Moleküloberflächen, die damit eine vergleichbare Rolle spielen wie die IP-Adressen im Internet. Hormon- und Antigen-Moleküle steuern die Zellen von außen über Rezeptoren³². Andere Moleküle, wie z.B. die der Energieträger, werden von selektiven Kanälen erkannt, in die Zelle aufgenommen und verarbeitet.

Auch die Technik nutzt in Form von Öl- oder Gaspipelines Rohrleitungen zum Transport von chemischen Energieträgern. Ingenieure kämen derzeit allerdings kaum auf die Idee, in diesen Pipelines erstens Rohrpost³³ und dazu Gemische aus chemisch völlig heterogenen Stoffen zu transportieren und die einzelnen Komponenten an verschiedenen Zielorten entlang der Rohre durch mechanische und chemisch selektive Filter wieder getrennt zu entnehmen.

Wenn, dann realisiert die Technik chemisch selektiven Stofftransport indem sie die einzelnen Stoffe in getrennten Gebinden mit Fahrzeugen transportiert.

4 Vom Tier zur Pflanze

Eine bionisch organisierte Strom- und Energieversorgung kann statt tierischer auch pflanzliche Organismen zum Vorbild nehmen. Auch unter den Pflanzen gibt es vom archaischen Einzeller bis zu den entwicklungsgeschichtlich jüngsten Arten verschiedenste Baupläne und Überlebensstrategien.

31 Bemerkenswerterweise geht die Natur im Nervensystem den gegenteiligen Weg. Da bestimmt die Identität eines Neurons (Identität der Leitung) die Bedeutung seiner Aktivität.

32 Können aber durchaus auch aufgenommen und verarbeitet werden.

33 was unseren roten Blutkörperchen entsprechen würde

4.1 Typisch Pflanze

Die folgenden Betrachtungen beziehen sich besonders auf mehrjährige Blattpflanzen. Pflanzen waren durch ihre ortsgebundene Lebensweise von jeher gezwungen, besonders viele Merkmale zu entwickeln, die auch für eine technische bionisch organisierte Energieversorgung wünschenswert wären:

1. **Pflanzen müssen vollständig von der dargebots-abhängigen Sonnenenergie leben.**
2. **Pflanzen müssen mit dem Dargebot an Sonnenenergie an ihrem Standort auskommen. Sie können nicht einmal wie Tiere bei Energiemangel (Hunger) Nahrungsquellen aktiv aufsuchen.**
3. **Pflanzen versorgen sich im Gegensatz zu Tieren nicht ausgehend von einem zentralen Darmtrakt. Sie müssen ihre primäre „Energiegewinnung“ in den Blättern (und ggf. anderen grünen Pflanzenteilen) und damit dezentral betreiben.**
4. **Pflanzen müssen alle Energie, die während Licht-armer Zeiten benötigt wird (Nacht, Winter), aus selbst angelegten Puffern mit chemischen Energieträgern beziehen.**
5. **Pflanzen müssen sich auch nach extremen Störungen reorganisieren, sich ggf. sogar aus kleinen Teilstücken wieder vollständig aufbauen können.**
6. **Pflanzensamen sind unter günstigen Bedingungen nach vielen tausend Jahren noch keimfähig³⁴.**
7. **Die letzten beiden Punkte implizieren, dass maßgebliche Anteile der Regelung der Energieflüsse und der Reorganisation ausschließlich auf lokal verfügbaren Informationen und lokal implementierten Regelkreis-Komponenten beruhen.**

Pflanzen erreichen allerdings nur sehr geringe Leistungsdichten³⁵. Das ist u.a. daran erkennbar, dass sich auch große Pflanzenteile nur selten mit Hilfe ihres Stoffwechsels merkbar über die Umgebungstemperatur hinaus erwärmen³⁶.

Höhere Pflanzen verfügen über zwei Typen von Leitbündeln zum Stofftransport. Das Xylem transportiert Wasser und (besonders im Frühjahr, wenn Blätter neu angelegt werden müssen,) Zucker von

34 Man hat aus Bestandteilen von Samen von vor über 30 000 Jahren (vor der letzten Eiszeit!) wieder intakte Pflanzen ziehen können.

35 Auf die Fläche bezogen einige Prozent dessen, was man von Solarzellen kennt: Solarzellen erreichen heute im kommerziellen Masseneinsatz etwa 15 % Wirkungsgrad. Bei der Bioenergie-Gewinnung „erntet“ man etwa 1% der Sonnenenergie. Die primäre Ausbeute der Pflanzen ist aber deutlich höher.

36 Ausnahmen wie beispielsweise der Aronstab locken mit Wärme Insekten zur Bestäubung an.

der Wurzel zu den Blättern. Das Phloem transportiert Zucker, die bei der Photosynthese aus Wasser und CO₂ hergestellt werden, in Richtung Wurzel. Trotzdem wird bei Belichtung schon im Blatt ein Stärkevorrat angelegt. Mit dessen Hilfe betreibt die Pflanze nachts, wenn keine Photosynthese stattfindet, den Stoffwechsel des Blattes. Mit den Begriffen für technische Energieversorgungsnetze ausgedrückt bedeutet dies:

Pflanzen sind dank dezentraler peripherer Puffer bestens für die täglichen und saisonalen Lastflusswechsel gerüstet.

Technisch würde das einem Stromnetz entsprechen, das aus einer Vielzahl von Photovoltaikanlagen gespeist wird, von denen jede auch über einen Akku verfügt, dessen Pufferkapazität für mindestens eine Nacht ausreicht.

Der Bauplan von Pflanzen ist „offener“, redundanter und dezentraler als der von Tieren. Pflanzen können sich leichter als Tiere mit ihrer Form an äußere Umstände anpassen. Kleinere Hindernisse werden einfach „umwachsen“. Und wer schon einmal Stecklinge zu Zierpflanzen oder Bäumen herangezogen hat, weiß aus eigener Anschauung, dass ein Zweig oder ein Stängel mit ein paar Blättern zu ganzen Pflanzen regenerieren können.

Verhältnismäßig kleine Bruchstücke einer Pflanze enthalten also alle Informationen und genügend Stoff- und Energievorräte, um alle fehlenden Teile ergänzen zu können.

Auf technische bionisch organisierte Strom- und Energieversorgungen übertragen würde dies der Fähigkeit entsprechen, dass sich kleine, durch Verinselung entstandene Teilnetze während des Inselbetriebs aus sich heraus zu autonomen, dauerhaft stabilen kleinen Netzen umstrukturieren könnten.

Die Keimfähigkeit nach Jahrtausenden kommt einer jahrtausendelangen Schwarzstartfähigkeit der kleinstmöglichen Inselnetze gleich.

5 Zusammenfassung und Aussicht

Würde man die „Energiewende“ nach dem Vorbild der Natur gestalten, also Strom- und Energieversorgung bionisch organisieren, gäbe es die meisten der „Energiewende“ zugeschriebenen Probleme nicht.

- **Dargebotsabhängige Energieversorgung ist bei Tieren kaum und bei Pflanzen gar kein Problem.**
- **Material- und Energieträger-Transportsysteme sind auf den mittleren Bedarf ausgelegt.**

- **Spitzenlasten werden weitgehend unabhängig von den primär genutzten Energiequellen aus kaskadierten Puffern chemischer Energieträger bedient.**
- **Tierische, aber noch mehr pflanzliche Organismen sind nach teilweiser Zerstörung in erheblichem Maße regenerationsfähig.**
- **Technisch wäre es kein unüberwindliches Problem, die technischen Energieversorgungssysteme ebenfalls mit diesen Fähigkeiten zu versehen.**

5.1 Das wäre erforderlich

Dazu wären folgende Schritte nötig

1. **Auf allen Netzebenen werden massiv Puffer eingerichtet, auch wenn der Pufferungs-Wirkungsgrad deutlich unter 100 % liegt.**
2. **Die Kapazität der Puffer und die Regelungszeitkonstante nehmen von der Peripherie des Netzes zur höchsten Netzebene zu.**
3. **Die Regelung des Netzes wird hierarchisch so organisiert, dass möglichst viele Netzzweige möglichst auf allen Ebenen aus sich heraus autonom regelbar und zumindest zeitweise – besser aber dauerhaft – Inselbetrieb-fähig werden.**
4. **Umwandlung elektrischer Energie in chemische Energieträger und zurück sowie der Transport beider würde Standard.**
5. **Die Vernetzung des Stromnetzes mit bisher nicht elektrisch angetriebenen Energieverbrauchern (Heizung, Verkehr) würde Standard.**
6. **Als Input in das System würden nur noch regenerative Energien herangezogen.**

Doch solche Merkmale eines Energieversorgungssystems dürften noch eine Weile Wunschdenken bleiben.

5.2 Inselsysteme des Alltags

Die **Natur** arbeitet unter anderen Randbedingungen als technische Entwickler(innen). Sie kennt **nur eine Währung: Langfristigen, Generationen übergreifenden Erfolg in der Evolution.**

Bisher scheinen vielerlei wirtschaftliche Gründe dagegen zu sprechen, auch in technischen Systemen möglichst viele Tricks der Natur zu nutzen. Die Kilowattstunde könnte zu teuer werden.

5.2.1 Stromkosten im Inselsystem Auto

Wenn es um's Auto geht, akzeptieren wir jedoch (ohne nachzurechnen!) auch extrem hohe Kilowattstunden-Preise:

Ein guter Dieselmotor verbraucht pro Kilowattstunde mechanisch abgegebener Arbeit 220 g bis 250 g Diesel. Das entspricht einem Preis von etwa 0,25 € / kWh bis 0,30 € / kWh für die mechanische Energie, die auf die Räder gebracht wird³⁷.

Kraftfahrzeug-Generatoren („Lichtmaschinen“) haben Wirkungsgrade zwischen 50 % und 75 %. Folglich ist obiger Preis für die im Auto gebrauchte elektrische Energie mit mindestens 1,3 bis 2 zu multiplizieren.

Für den Teil, der in der Batterie zwischengespeichert wird, kommt nochmal der Faktor 1,25 und mindestens 0,15 € / kWh für den Batterieverschleiß dazu.

Ein Preis von

0,70 € / kWh bis 1,00 € / kWh

für die Elektrizitätsversorgung der Hilfsantriebe und Komfort-Einrichtungen (Anlasser, Servolenkung, Klimaanlage, Navi, Radio) im Auto ist also nicht übertrieben.

Dafür bietet das „Inselsystem Automobil-Stromnetz“ einige der aufgelisteten Merkmale: Schwarzstartfähigkeit, Pufferung, hohe Dynamik, kurzfristige Unabhängigkeit von Generatorleistung und Verbraucher-Leistungsbedarf. Wohlgedenkt: Hier ist die Rede von einem Auto mit Verbrennungsmotor.

5.2.2 Kosten chemischer Stromspeicherung

5.2.2.1 Batteriespeicher

Für Elektro-PKW, die zwischen 0,1 kWh/km und 0,3 kWh/km brauchen, fallen neben ~0.30 € kWh für den Ladestrom derzeit ~0.50 € kWh Batterie-kosten an³⁸.

Hersteller großer Batteriespeicher im MWh-Bereich kalkulieren mit Speicherkosten von 0.06 € kWh zwischengespeicherten Strom³⁹.

5.2.2.2 Kosten von Power-to-gas/liquid

Die langfristigen Kosten einer chemischen Zwischenspeicherung elektrischer Energie als Wasserstoff, Methan oder flüssiger Energieträger sind derzeit nicht zuverlässig zu ermitteln. Die reinen Speicherkosten sind nicht das Problem. Anfang des 21.

³⁷ Bei Ottomotoren ist der Preis wegen des geringeren Wirkungsgrades noch höher.

³⁸ Renault verlangt z.B. als Batteriemiete bei seinem Elektro-PKW Zeo:
bei 15000 km/Jahr, 4 Jahren Vertragslaufzeit 0,47 € / kWh
bei 12500 km/Jahr, 1 Jahr Vertragslaufzeit 0,65 € / kWh.

³⁹ Persönliche Auskunft eines Herstellers, Stand 2014, Bleiakku-System mit 3 Sätzen Akkus in 20 Jahren

Jahrhunderts verfügten ~1/4 bis 1/3 der Haushalte in Deutschland über eine Ölheizung mit Jahreszeitspeicher für größenordnungsmäßig 1000 l pro Person und Jahr. Das entspricht vom Brennwert her etwa dem 10-fachen des Elektroenergie-Bedarfs. Das Problem sind die energetischen und finanziellen Kosten der Umwandlungsprozesse. Die dazu nötigen Verfahren befinden sich im Stadium der Grundlagenforschung bis Technikum. Vorhersagen wären daher genau so spekulativ wie es Vorhersagen zu Preis und Leistungsfähigkeit der Photovoltaik vor 25 Jahren waren: Skeptiker behaupteten damals, PV-Anlagen könnten über ihre Betriebsdauer nicht einmal die Energie zu ihrer Herstellung und Installation einspielen⁴⁰.

5.2.3 Wert einer bionischen Energieversorgung

Eine hypothetische, vollständig bionisch organisierten Energieversorgung böte im Vergleich zur heutigen folgende Vorteile:

1. **Rückgriff nur auf regenerative Energiequellen,**
2. **Keine Nettoproduktion von klimaschädlichem CO₂.**
3. **Unabhängigkeit von internationalen wirtschaftlichen Fluktuationen und Konflikten,**
4. **implizite Stabilität durch Fähigkeit zum dezentralen Inselbetrieb.**

Der Wert dieser Vorteile ist situationsabhängig und nur unter Einbeziehung der externen Kosten der „klassischen“ fossilen und atomaren Energieversorgung zu ermitteln. Man „fühlt“ diese Kosten erst,

- wenn es Versorgungsausfälle mit gravierenden Folgekosten gibt oder
- wenn man begreift, in wie weit Ereignisse wie Dürren, Starkregen, Ernteauffälle, Völkerwanderungen etc. indirekt unserem Umgang mit Energie geschuldet sind.

Leider wird das Verhalten der meisten – und von den Folgen ihres Tuns noch nicht betroffenen – Akteure von der „Tragik der Allmende“⁴¹ bestimmt. Eine Vorahnung dieser Kosten haben heute vielleicht schon die (ehemaligen) Bewohner von Tschernobyl, Fukushima und Kalifornien...

6 Disclaimer

August 2015

Dr. Josef Gödde

⁴⁰ Tatsächlich liegt die energetische Amortisationszeit Standortabhängig bei ~5 Jahren.

⁴¹ Auch als **Tragödie des Allgemeinguts** oder **tragedy of the commons** bezeichnet.