

Entwicklung eines quantitativen Modells „Nachhaltiges Deutschland“

Band 3: Das D3 EE Modell zur Energiewende und ihren Auswirkungen auf Rohstoffanspruch- nahme und Volkswirtschaft

Abschlussbericht

TEXTE 97/2018

Umweltforschungsplan des
Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3714 11 101 0
UBA-FB 002681

**Entwicklung eines quantitativen Modells
„Nachhaltiges Deutschland“
Band 3: Das D3 EE Modell zur Energiewende
und ihren Auswirkungen auf Rohstoff-
inanspruchnahme und Volkswirtschaft**

Abschlussbericht

von

Kai Neumann, Franc Grimm
Consideo GmbH, Lübeck

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber:

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
info@umweltbundesamt.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

 [/umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)
 [/umweltbundesamt](https://twitter.com/umweltbundesamt)

Durchführung der Studie:

Consideo GmbH
Maria-Goeppert-Str. 1
23562 Lübeck

Abschlussdatum:

September 2017

Redaktion:

Fachgebiet I 1.1 Grundsatzfragen, Nachhaltigkeitsstragien und -Szenarien,
Ressourcenschonung
Ullrich Lorenz

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, November 2018

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den
Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung

Im Auftrag des Umweltbundesamts haben Consideo, adelphi, Ecologic Institut, FEST und sociodimensions ein quantitatives Simulationsmodell zur Analyse eines möglichen Wandels der Gesellschaft hin zu mehr Nachhaltigkeit entwickelt. Es entstand im Rahmen des Projekts „Entwicklung eines quantitativen Modells „Nachhaltiges Deutschland““ aus dem Ressortforschungsplan des Umweltbundesamtes. Das Modell wurde eingesetzt, um verschiedene Ausrichtungen gesellschaftlicher Wandelprozesse auf ihre potentiellen Auswirkungen auf die Umwelt, den Klimawandel, die Ressourcen-Inanspruchnahme, die Wirtschaft, die Wohlfahrt und die Zufriedenheit in der Bevölkerung zu untersuchen

Im Auftrag des Umweltbundesamts haben Consideo, adelphi, Ecologic Institut, FEST und sociodimensions ein quantitatives Simulationsmodell zur Analyse eines möglichen Wandels der Gesellschaft hin zu mehr Nachhaltigkeit entwickelt. Es entstand im Rahmen des Projekts „Entwicklung eines quantitativen Modells „Nachhaltiges Deutschland““ aus dem Ressortforschungsplan des Umweltbundesamtes. Das Modell wurde eingesetzt, um verschiedene Ausrichtungen gesellschaftlicher Wandelprozesse auf ihre potentiellen Auswirkungen auf die Umwelt, den Klimawandel, die Ressourcen-Inanspruchnahme, die Wirtschaft, die Wohlfahrt und die Zufriedenheit in der Bevölkerung zu untersuchen.

Die wesentlichen Projektergebnisse sind in vier eigenen Berichten dokumentiert:

1. Das quantitative D3-Modell (das „D“ steht für Deutschland, und die „3“ steht für Bevölkerung, Wirtschaft und Politik): Der Bericht beschreibt das Ursache-Wirkungsmodell mit seiner Vielzahl an Faktoren (mehr als 4.000 Faktoren) und erläutert die methodische Herangehensweise und den Aufbau des Modells. Weiterhin bietet der Bericht eine Einführung in die wesentlichen Bedienelemente des Modells, welches direkt über einen Link durch das Umweltbundesamt auch zur Erweiterung und Beantwortung weiterer Fragen genutzt werden kann.
2. Simulation der Potentiale und Auswirkungen einer Transformation hin zu einer nachhaltigen Gesellschaft: Der Bericht umfasst konkrete Erkenntnisse zu den Möglichkeiten und Grenzen der Simulation sozialer Systeme sowie konkrete Szenarien zur Transformation und ihrer Auswirkungen.
3. Simulation des Ausbaus erneuerbarer Energien in Deutschland (D3 EE Modell): Der Bericht dokumentiert ein zusätzliches entstandenes, eigenständiges Simulationsmodell. Über das D3 EE Modell wurde der Ausbau der erneuerbaren Energien simuliert sowie die damit verbundene Rohstofffinanspruchnahme und mögliche wirtschaftliche Auswirkungen.
4. D3 - Planspiel: Der Bericht führt in ein Planspiel ein, das durch das D3 Modell inspiriert wurde und in dem Spielerinnen und Spieler (z.B. auch an Schulen) die Rolle der BürgerInnen, der Politik und der Wirtschaft einnehmen können, um darüber unterschiedliche Sichtweisen und Perspektiven in Beziehung miteinander setzen zu können. Es vermittelt den Lock-In- und die Spillover-Effekte.

Mithilfe des D3 Modells lassen sich Erkenntnisse über gesellschaftliche Interaktionen im Zusammen- und Wechselspiel von technischer Effizienzsteigerung, sozialen Innovationen, Suffizienz-Ansätzen und sozio-ökonomischen Effekten (z. B. arm/reich, Migration, Überalterung) generieren. Ziel war es, auf Basis des D3 Modells die dynamische Interaktion der unterschiedlichen Teilespekte der drei Nachhaltigkeitsdimensionen „Ökologie“, „Ökonomie“ und „Soziales System“ innerhalb der planetaren Belastungsgrenzen besser zu verstehen und damit das systemische Verständnis Nachhaltiger Entwicklung insgesamt weiterzuentwickeln.

Der vorliegende Bericht stellt den dritten Bericht dar und richtet sich an Interessenten an der Machbarkeit und den Nebenwirkungen einer Energiewende in Deutschland. Das auch für das

Umweltbundesamt selbst zu nutzende D3 EE Modell erlaubt basierend auf System Dynamics und Prozessen mit Constraints (ToC) Szenarien zum Ausbau von Offshore- und Onshore-Windkraft, Photovoltaik, Power-To-Liquid/Gas und Batteriespeichern für Deutschland unterteilt in Nord und Süd auf Tagesbasis von 1990 bis 2050 mit ihrer Ressourcen-Inanspruchnahme auch unter Berücksichtigung von Recycling verglichen mit der durch konventionelle Energiequellen zur Erzeugung von elektrischer Energie zu simulieren. Die Nachfrage nach elektrischer Energie wie auch die Parameter für die Ressourcen-Inanspruchnahme unterschiedlicher Energiequellen können in Szenarien variiert und so unterschiedliche Ausbaupfade bewertet werden. Zusätzlich ist eine volkswirtschaftliche Betrachtung der Kostenverläufe enthalten. Das Modell zeigt dabei nur grobe Entwicklungen – eine Integration in den europäischen Energiemarkt oder spezifische Technologien werden nicht betrachtet.

Drei Szenarien bzw. Erkenntnisse sind in diesem Bericht beschrieben: 1. Der bisherige Ausbaupfad würde zu einem Gleichgewicht von Zu- und Rückbau weit unterhalb der angestrebten 100 Prozent erneuerbaren Stromerzeugung führen. 2. Das Ziel der 100 Prozent erneuerbaren Stromerzeugung würde nur durch einen massiven Ausbau vor allem auch der Power-To-Liquid/Gas Kapazitäten erreicht. Die Investitionskosten hierfür wären riesig, aber volkswirtschaftlich günstiger, als ein weiterer Import fossiler Brennstoffe. 3. Die Ressourcen-Inanspruchnahme mit hohen Recyclingquoten eines zügigen Ausbaus erscheint nach vorliegender Datenlage wesentlich geringer als die Fortsetzung des Verbrauchs fossiler Energieträger.

Das Modell kann direkt über einen Link aufgerufen und für eigene Szenarien genutzt werden

Abstract

For the Federal Environmental Agency of Germany a consortium of Consideo, adelphi, Ecologic Institute, FEST and sociodimensions developed a quantitative simulation model to run scenarios on the potentials for a transition of society towards sustainability. The model explores the effects of a transition on the environment, climate change, use of resources, the economy, welfare and happiness.

The results from this project are documented in four parts:

1. The quantitative D3 model (D for Deutschland, 3 for society, economy and politics): The report describes the cause and effect model with its more than 4,000 factors and how it can be used. The Federal Environmental Agency can directly use the model to alter and enhance it and to answer different questions.
2. The simulation of potential transitions towards sustainability and their effects. The report also covers insights on the possibilities and limitations of the simulation of social systems.
3. The simulation of the shift towards renewable energy (D3 EE model): The report describes an additional simulation model that looks more into the details of the use of renewable energy and its implications for the use of resources as well as its economic effects.
4. The D3 simulation: The report describes a separate model that can be used as a simulation game to allow e.g. pupils to play the roles of citizens, politicians, or business-people and experience their interdependencies through the lock-in effect and the spillover effects as they are explained in this report at hand.

The D3 model can be used to generate findings on societal interactions in interplay with increasing technical efficiency, social innovations, eco-sufficiency approaches, and socio-economic effects (e.g. rich/poor, migration, aging societies). The goal was to use the “Sustainable Germany” model to better understand the dynamic interaction between the different aspects of the three dimensions of sustainability “ecology”, “economy” and “social system”) within the planet’s carrying capacity and, in doing so, to advance our systematic understanding of sustainable development overall.

This report describes the D3 EE model that allows for scenarios on paths of energy transition using different technologies (onshore/offshore wind energy, photovoltaic, battery, power to gas/liquid, energy grid) and considering their need for resources with a recycling of older facilities starting 1990 and running on a daily basis until 2050 looking at Germany divided by its north and south. The objective of the model is less an exact forecast that would have to include the European energy market and rather specific technologies.

The results from three scenarios: the current path will lead to an equilibrium far below 100 percent as the repowering of existing facilities will match the newly added capacities in any scenario with a constant rate of new facilities. Crucial in all scenarios reaching 100 percent renewable electricity seems to be the availability of power to liquid/gas capacities. The third scenario on the least resource consumption of possible paths to renewable energy already shows with only rough data that any path should be developed as fast as possible as the resource use for conventional energy seems to outweigh any need of resources from renewables.

For the economical evaluation of the transition towards renewable energy is not based on markets but instead compares the margin costs of conventional sources for electric energy with the investments into renewables. It shows that while the price for electricity would certainly rise the overall costs for energy including the mobility sector would be lower. From an economical point of view the outcome of the transition would be extremely positive as the investments into renewables would foster the domestic economy to a larger part while little money would return through exports from countries we have to pay for the delivery of fossile resources for conventional energy.

The model can now be used to extended scenarios, e.g. on possible developments of technology, additional demands for electricity from other fields etc..

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	7
Abbildungsverzeichnis	9
Abkürzungsverzeichnis	10
Zusammenfassung	11
Summary	12
1 Einleitung	13
1.1 Das D3 Modell	13
1.2 Das D3 EE Modell	13
2 Umfang und Grenzen des D3 EE Modells	16
2.1 Betrachtete Technologien	16
2.2 Betrachtete Rohstoffe	16
2.3 E-Mobilität, volkswirtschaftliche Bewertung, etc.	17
2.4 Volkswirtschaftliche Bewertung, etc.	17
2.5 Regionale und zeitliche Dimensionierung	17
2.6 Datenquellen und -qualität	17
2.7 Qualität der Simulationsergebnisse	17
3 Aufbau und Handhabe des Prozess-Modells	19
3.1 Prozess-Modellierung mit dem iMODELER	19
3.2 Modellausschnitt: Ausbau Erneuerbarer Energien	21
3.3 Modellausschnitt: Recycling von Ressourcen	22
3.4 Modellausschnitt: Abbau von Ressourcen	23
3.5 Modellausschnitt: Verwendung der erneuerbaren Energien	24
3.6 Modellausschnitt: Deckung des Energiebedarfs	25
3.7 Modellausschnitt: Rohstoff Inanspruchnahme	27
3.8 Modellausschnitt: Volkswirtschaftliche Bewertung	28
4 Anwendungen des Modells	30
4.1 Analyse: Welchen Anteil können die erneuerbaren Energien beim derzeit vorgesehenen Ausbau erreichen (Szenario 1)	30
4.2 Analyse: Welcher Ausbau von Photovoltaik und Windenergie könnte das 100% erneuerbare Energien Ziel erreichen (Szenario 2)	32
4.3 Analyse: Welche Rohstoff-Inanspruchnahme ist mit dem Ausbau verbunden (Szenario 3)	34
4.4 Analyse: Szenarien zu den Kapazitäten von Power-To-Liquid/Gas	36
4.5 Analyse: Bewertung der Kosten der Energiewende	38
4.6 Mögliche, weitere Fragestellungen	41

5 Fazit und Ausblick.....	41
6 Quellen	42

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prozess-Faktoren.....	20
Abbildung 2: Ausbau erneuerbarer Energien zur Stromerzeugung	21
Abbildung 3: Ausbau als Prozess in Abhängigkeit von Ressourcen.....	22
Abbildung 4: Recycling von Rohstoffen.....	23
Abbildung 5: Abbau von Rohstoffen	24
Abbildung 6: Prozesse verwenden das Angebot erneuerbarer Stromerzeugung.....	25
Abbildung 7: Prozesse bedienen die Nachfrage nach elektrischer Energie	26
Abbildung 8: Rohstoff Inanspruchnahme.....	27
Abbildung 9: Volkswirtschaftliche Bewertung des Ausbaus	29
Abbildung 10: Anteil erneuerbarer Stromproduktion bei derzeitigem Ausbau.....	31
Abbildung 11: Rohstoff-Inanspruchnahme bei derzeitigem Ausbau	32
Abbildung 12: Parameter, die zum Erreichen des 100 Prozent Ziels führen.....	33
Abbildung 13: Notwendigkeit von Power-To-Liquid/Gas Kapazitäten.....	34
Abbildung 14: Rohstoff-Inanspruchnahme bei Erreichen des 100 Prozent Ausbauziels	35
Abbildung 15: Tabellarische Ansicht Rohstoff-Inanspruchnahme	35
Abbildung 16: Wirkung von Recycling	36
Abbildung 17: Notwendige Nicht-Auslastung von Power-To-Liquid Kapazitäten.....	37
Abbildung 18: Einsparung von Erdöl durch E-Mobilität	38
Abbildung 19: Entwicklung des kalkulatorischen Strompreises bei Erreichen des Ausbauziels	39
Abbildung 20: Entwicklung des kalkulatorischen Strompreises bei jetzigem Pfad	39
Abbildung 21: Die Gesamtkosten des Ausbaus aus volkswirtschaftlicher Sicht	40
Abbildung 22: Volkswirtschaftliche Bewertung des jetzigen Ausbaupfades	41

Abkürzungsverzeichnis

EEG	Erneuerbare Energien Gesetz (in der jeweiligen Fassung)
P2L/G	Power to Liquid, Power to Gas
ToC	Theory of Constraints
UBA	Umweltbundesamt

Zusammenfassung

Das D3 EE Modell erlaubt Szenarien (Varianten bzw. Ergänzungen eines Szenarios) mit ausgewählten Technologien (Onshore-Windkraft, Offshore-Windkraft, Photovoltaik, Batterien, Power-To-Gas, Lastverschiebung und Leitungsausbau) den Ausbau der Erneuerbaren Energien und die Rohstoff-Inanspruchnahme unter Berücksichtigung auch des Rückbaus alter Anlagen mit dem Recycling der darin enthaltenen Rohstoffe im Zeitverlauf bis 2050 auf Tagesbasis in seinen Größenordnungen zu simulieren.

Für die Modellierung wurde basierend auf System Dynamics der iMODELER mit seinen speziellen Faktoren zur Prozess-Modellierung gewählt. Diese erlauben ohne aufwändige Formeln den Aufbau von Kapazitäten und die Deckung der Nachfrage nach Strom als Prozesse in Abhängigkeit der Verfügbarkeit von Ressourcen abzubilden. Die Analyse zeigt dabei die Auslastung und auch die Nicht-Auslastung von Kapazitäten.

Deutschland wird in dem Modell in Nord und Süd unterteilt und Nachfrage und Angebot werden auf Tagesbasis jeweils als Durchschnittswerte für den Tag und für die Nacht betrachtet. Das Modell kann leicht erweitert werden und die Annahmen können in Szenarien jederzeit variiert werden. Das zentrale Szenario in diesem Bericht berücksichtigt beispielsweise die Elektrifizierung des Verkehrssektors.

Monte-Carlo-Analysen ergeben, dass der bisherige Ausbaupfad (EEG 2017) das Ziel der 100 Prozent Stromversorgung aus erneuerbaren Energien verfehlten würde und dass erst ein massiver Ausbau - ab einem bestimmten Zeitpunkt auch von Power-To-Gas/Liquid Kapazitäten - das Ziel erreichbar macht. Dieser massive Ausbau führt ab dem Zeitpunkt des Erreichens der Altersgrenze erster Anlagen zu einem Gleichgewicht an Rück- und Zubau. Ein weniger massiver Ausbau würde auch zu einem Gleichgewicht entsprechend unterhalb von 100 Prozent führen, da auch dann der Rückbau der älteren Anlagen ins Gewicht fallen wird.

Aus diesem Gleichgewicht resultiert ein Recycling, was zu einem schon fast konstanten anthropogenen Rohstofflager mit nur wenig Abbau weiterer Rohstoffe führen kann. Der massive Ausbau ist nicht nur der notwendige Weg zum Erreichen des 100 Prozent-Ziels - der dadurch niedrigere Verbrauch fossiler Rohstoffe wiegt offenbar auch den erheblichen Aufbau des anthropogenen Rohstofflagers bezogen auf die Gesamt-Rohstofffinanzierungsbedarf deutlich auf.

Eine volkswirtschaftliche Bewertung des Modells zeigt zudem, dass beispielsweise mit der Elektrifizierung des Verkehrssektors der theoretische (nicht auf Marktmechanismen basierend, sondern von Kosten und Investitionen abgeleitet) Strompreis im Vergleich zu heute steigen würde, für die Verbraucher - zumindest im Schnitt - aber im Vergleich zu konservativen Szenarien die Kosten eher geringer wären. Eine Bewertung der Investitionen mit ihrer inländischen Wertschöpfung verglichen mit der nur geringen Wertschöpfung bei Import von fossilen Brennstoffen zeigt zudem einen enormen volkswirtschaftlichen Nutzen des Ausbaus der erneuerbaren Energien, und das bereits ohne die Bewertung der indirekten Folgen der Nutzung fossiler Brennstoffe zu berücksichtigen.

Das Modell eignet sich sehr gut weitere Fragen etwa auch zur Berücksichtigung des Wärmeenergiebedarfs zu beantworten und andere Annahmen etwa der Entwicklung von Technologien durchzuspielen. Auch können nach gleichem Muster über Prozesse, Nachfragen und Angebote ähnliche Modelle, etwa zur Biomasse-Ökonomie, erstellt werden.

Summary

The D3 EE model allows for scenarios on paths of energy transition using different technologies (onshore/offshore wind energy, photovoltaic, battery, power to gas/liquid, energy grid) and considering their need for resources with a recycling of older facilities starting 1990 and running on a daily basis until 2050 looking at Germany divided by its north and south. The objective of the model is less an exact forecast that would have to include the European energy market and rather specific technologies. Rather it allows to look at the average technologies and the rough scales for Germany in order to provide for a better understanding of the magnitudes, necessary speed, dynamics and patterns behind the energy transition and its implications for the use of resources. Different assumptions can be easily altered as the model itself can now be used by the federal environmental agency via link (Umweltbundesamt).

For the modeling we used the System Dynamics approach together with special features of the software iMODELER to simulate processes that are limited by the availability of resources (based on the theory of constraints, ToC).

The development of capacities of renewables, the supplies by the different energy sources to meet the demand for electric power, and the digging for resources are processes. Resources that could be constraint are for example the locations for wind power, the materials needed for photovoltaik, the capacity from the power grid needed to transfer energy from the north to the south, the capacity for power to liquid/gas to use an oversupply of renewable energy and so forth. The iMODELER automatically indicates resources that are constraints as well as resources that are unused.

The model uses time series (e.g. to model the history of renewable energy from 1990 on) as well as parameters, that can be easily altered, e.g. to add demand for electricity for mobility, industrial processes etc., or to model a change of technology over time, e.g. less material need per output for offshore wind energy.

The model can be used to test the magnitude of consequences of any scenario. The project featured three scenarios: First a scenario as it is planned by the German government right now (according to the EEG 2017). Second a scenario on the least needed path of transition that fulfils the goal of 100 percent renewable energy by 2050. And finally some evaluation of the different paths to 100 percent renewables with regard to their need for resources, their overall material consumption.

The results: the current path will lead to an equilibrium far below 100 percent as the repowering of existing facilities will match the newly added capacities in any scenario with a constant rate of new facilities. Depending, of course, on possible extreme weather developments, it is less a question whether facilities are added to the north or south and even offshore wind energy is not so crucial as the availability of power to liquid/gas capacities. They will at the beginning be unused to a large degree in order to be available later. In principal the model would allow to use battery capacities as an alternative or in combination but so far we lack data on their need for resources. The third scenario on the least resource consumption of possible paths to renewable energy also lacks data. Nevertheless the rough data already shows that any path should be developed as fast as possible as the resource use for conventional energy seems to outweigh any need of resources from renewables. Depending on the rate of recycling the repowering of existing, older facilities leads to an ever smaller need for additional resources in the long run.

For the economical evaluation of the transition towards renewable energy we depicted a scenario that also considered additional electricity for the mobility sector. This evaluation is not based on markets but instead compares the margin costs of conventional sources for electric energy with the

investments into renewables. It shows that while the price for electricity would certainly rise the overall costs for energy including the mobility sector would be lower. From an economical point of view the outcome of the transition would be extremely positive as the investments into renewables would foster the domestic economy to a larger part while little money would return through exports from countries we have to pay for the delivery of fossile resources for conventional energy.

The model can now be used to extended scenarios, e.g. on possible developments of technology, additional demands for electricity from other fields etc..

1 Einleitung

Das quantitative D3 EE Modell ermöglicht eine Simulation des Ausbaus der Stromerzeugung durch erneuerbare Energien und der dafür benötigten Ressourcen in vereinfachter Form für Photovoltaik, Onshore- und Offshore-Windkraft, den Nord-Süd-Netzausbau, den Einsatz von Power-To-Liquid/Gas Anlagen, von Batterie-Speichern und auch von Lastverschiebung.

Das D3 EE Modell ist eine Erweiterung des Projektes „Entwicklung eines quantitativen Modells „Nachhaltiges Deutschland“ (FKZ 3714 11 101 0), in dem ein sehr umfangreiches System Dynamics Modell, kurz D3-Modell entwickelt wird.

1.1 Das D3 Modell

Zielsetzung des hier nicht weiter beschriebenen D3 Modells ist die Entwicklung eines (überschaubaren, allerdings mit bereits mehr als 4.000 Faktoren) dynamischen, quantitativen und „planspielfähigen“ „Nachhaltigkeits-Models“, mit dem sich Aussagen über gesellschaftliche Interaktion im Zusammen- und Wechselspiel von technischer Effizienzsteigerung, sozialen Innovationen, Suffizienz-Ansätzen und sozio-ökonomischen Effekten (z.B. arm/reich, Migration, Überalterung) darstellen lassen. Das UBA erhält hierüber ein Instrument zur Entwicklung und Validierung politischer Maßnahmenvorschläge sowie eine Planspiellösung für die Umweltaufklärung / Umweltbildung. Ausgehend von Verhaltensweisen der Bevölkerung aber auch von politischen Maßnahmen wird geschaut, wie sich diese Impulse auf Gesellschaft, Wirtschaft und Umwelt auswirken könnten.

In dem D3 Modell wird dabei auch die Nachfrage nach erneuerbaren Energien seitens der Verbraucher und durch Vorgaben durch die Politik abgebildet. Vereinfacht wird dabei auch eine Abhängigkeit der Verfügbarkeit erneuerbarer Energien vom Netzausbau und von der Bereitstellung von Speichertechnologien angenommen. Die Ausbauten wirken dabei über wenige, ausgewählte Branchen bzw. Rohstoffe auch auf den so genannten RMC.

Eine detailliertere Betrachtung der Energiewende unter Berücksichtigung der Ressourcen-Aufwände ist mit dem D3 Modell derzeit nicht vorgesehen, wenngleich das Projekt auch auf den Zusammenhang von Treibhausgasemissionen und Ressourcen-Inanspruchnahme abhebt. Daraus resultiert die Motivation, dieses in einem kleineren, eigenständigen D3 EE Modell etwas genauer zu untersuchen.

1.2 Das D3 EE Modell

Es ist bekannt, dass die Rohstofffinanspruchnahme (gemessen in Rohstoffäquivalenten) zu einem signifikanten Teil durch fossile Rohstoffe geprägt wird. Der Energiebedarf der Gesellschaft (auch indirekt durch Konsum) gehört also mit zu den Hebeln, wenn es um den Zusammenhang zwischen nachhaltigem Verhalten, Treibhausgasemissionen und Rohstofffinanspruchnahme geht. Gleichzeitig wird der Umbau der Energieinfrastruktur zu einer höheren Ressourcen-Inanspruchnahme führen.

Ziel des D3 EE Modells ist es, basierend auf z.B. der „Kresse-Studie“ (Wuppertal Institut, 2014), 100% Strom aus EE- (und weiteren Recherchen) genauer zu untersuchen, welche Nachfragen bei den

Rohstoffen (v.a. Stahl/Eisen, Mineralische Baustoffe, Zement/Beton, Buntmetalle und „Technologie-Rohstoffe“) im Zeitverlauf für den Ausbau der jeweiligen Techniken im Energiesystem inkl. der Speicher und des Netzausbau entstehen.

In den genannten Studien werden die grundsätzliche Machbarkeit eines Umsteigens zu 100 Prozent auf erneuerbare Energien begründet wie auch die grundsätzlich ausreichende Verfügbarkeit der benötigten Rohstoffe für zwar nicht alle Technologien, aber für genügend Technologien, die den Wandel möglich machen. Die konkret realisierbare Geschwindigkeit, die Entwicklung von Preisen, das Recycling am Ende von Lebenszyklen und die notwendige Kapazität der dahinter steckenden Branchen scheint durch die bestehenden Studien noch nicht betrachtet zu sein.

Selbst wenn wir davon ausgehen, dass global die Mengen der Rohstoffe nicht kritisch sind, so ist davon auszugehen, dass die reale Verfügbarkeit vor Ort sowohl von politischen und wirtschaftlichen Konstellationen abhängig ist. Um solche, etwaigen Engpässe zu identifizieren, bietet sich die Entwicklung eines Prozess-Modells mit den Funktionalitäten des Process-iMODELers an. Dieser erlaubt die Abhängigkeit von Prozessen von Ressourcen ohne aufwändige Formeln abzubilden und dann die Engpässe im Sinne der Theory of Constraint (ToC von E.Goldratt) zu identifizieren. Constraints oder Engpässe sind die Ressourcen, die einzelne Prozess- oder auch Projektschritte limitieren. In der Praxis scheitern viele Projekte, da diese Engpässe nicht vorhergesehen wurden. Um Verbesserungen insgesamt überhaupt erzielen zu können, müssen die Engpass-Ressourcen erhöht oder substituiert werden.

Mit dem D3 EE Modell ist es möglich, die Dynamiken zwischen begrenzten wirtschaftlichen und technischen Ressourcen bei den Branchen, sowie den Rohstoffen (und grundsätzlich auch ihrer Preise) und der möglichen Geschwindigkeit der Transformation zu betrachten.

Voraussetzung bei dieser Untersuchung ist, dass zunächst der „Endpunkt“ 100% Treibhausgasneutralität im Energiesektor erreicht wird. Die Endenergiennachfrage leiten wir aus der Energie-Prognose-Studie ab. Die unterschiedlichen EE -Techniken (Beschränkung auf Stromerzeugung,-Umwandlung, -Speicherung) erzeugen Ihrerseits verschiedene Nachfragen nach Ressourcen. Diese gilt es im Zeitverlauf darzustellen und in späteren Simulationsläufen hinsichtlich Engpässen in der Versorgung oder der Optimierung der eingesetzten Rohstoffaufwände zu testen. Zudem enthält das Modell den späteren Rückbau von Anlagen und das Recycling der darin verwendeten Rohstoffe.

Das Modell nimmt einige Vereinfachungen vor, die weiter unten detailliert beschrieben und begründet werden. Der Mehrwert liegt vor allem in der Möglichkeit, das Modell flexibel zu nutzen und zu erweitern, um weitere Was-Wäre-Wenn-Fragestellungen zu beantworten.

Das Projekt verfolgt daher folgende Ziele:

- ▶ die Entwicklung eines ersten simulationsfähigen Modells auf Grundlage wissenschaftlicher Vorarbeiten
- ▶ erste Szenarien zum Zusammenhang zwischen Erreichen der Ausbauziele der Erneuerbaren Energien und der dafür benötigten Ressourcen-Inanspruchnahme
- ▶ die vielfältigen Nutzungsmöglichkeiten des Modells und der Prozessmodellierung der Auftraggeberin zu vermitteln.

Der vorliegende Projektbericht beschreibt vier Bereiche:

- ▶ mit der Einleitung geschehen die Zielsetzung des Modells
- ▶ die gewählten Ausschnitte bzw. Systemgrenzen und Einschränkungen des Modells

- ▶ den Ansatz der Prozess-Modellierung, den Aufbau des Modells und der Umgang mit diesem Modell
- ▶ Analyse-Ergebnisse zu den beauftragten Fragen

2 Umfang und Grenzen des D3 EE Modells

2.1 Betrachtete Technologien

In dem D3 EE Modell werden Offshore- und Onshore-Windkraft sowie Photovoltaik zur Stromerzeugung betrachtet. Die übrigen Erneuerbaren Energien zur Stromerzeugung sind zusammengefasst ab 2015 konstant gehalten und die nicht-erneuerbaren Energien sind gemäß ihrer heutigen Anteile berücksichtigt, welche sich durch den Atomausstieg und über einen Stellhebel im Modell auch den möglichen Kohleausstieg noch mal verändern können. Die Rohstoffe werden in Gruppen unterteilt, die in ein Anthropogenes Lager fließen bzw. als fossiler Rohstoffverbrauch gewertet werden. Der Wärmeenergiebereich wird komplett heraus gelassen.

Für die Speicherung von Energie wurde neben der Speicherung durch Power-To-Gas Anlagen auch der Einsatz von Batterie-Speichern betrachtet. Grundsätzlich angelegt ist auch ein mögliches Lastmanagement, das einen Teil der Nachfrage um ein bis zwei Tage zu verschieben erlaubt. Es bezieht sich auf ein bis zwei Tage und nicht etwa auf Stunden, da das Modell jeweils Tag und Nacht von 1990 bis 2050 simuliert.

Für das Stromnetz wird angelehnt an die im übernächsten Punkt gewählte räumliche Einteilung nur eine Verbindung zwischen Nord und Süd als Summe der konkret geplanten Einzeltrassen betrachtet.

Die Technologien bzw. die unterschiedlichen Typen und Generationen von Anlagen werden dabei nicht explizit durch Faktoren ausgedrückt. Ein Faktor beschreibt beispielsweise nur die installierten MW Offshore Windkraft. Allerdings beschreiben weitere Faktoren im zeitlichen Verlauf den Flächen- und Rohstoffbedarf je installierte MW. Darüber können technologischer Fortschritt zum einen, und für den Blick zurück beim Rückbau älterer Anlagen die freiwerdenden Ressourcen zum anderen simuliert werden.

Bei der Simulation wird zudem die Annahme getroffen, dass zuerst die Technologien (Windenergie, PV, konventionell...) für erneuerbare Energien eingesetzt werden, gefolgt von den konventionellen Technologien.

2.2 Betrachtete Rohstoffe

Um die Anzahl der Faktoren im Modell nicht zu groß werden zu lassen, werden nur

- ▶ mineralische Rohstoffe (Beton, Kies)
- ▶ Technologiemetalle (seltene Erden etc.)
- ▶ eisenartige Rohstoffe (Eisen, Stahl)
- ▶ Buntmetalle (Kupfer, Aluminium)

in Anlehnung an die groben RMC-/RMI-Kategorien unterschieden.

Zudem wird der Bedarf an Flächen und an Endenergie für den Ausbau der in diesem Modell betrachteten Erneuerbaren Energien zur Stromerzeugung betrachtet. Der Energiebedarf für den Ausbau und insbesondere das Recycling von Anlagen wird der übrigen Nachfrage nach elektrischer Energie hinzugefügt, die entsprechend durch die verfügbaren Energieträger gedeckt wird und damit gegebenenfalls zum Verbrauch fossiler Energieträger führt.

Im Modell dokumentiert ist dabei die Vereinfachung, dass der Energieaufwand für den Ausbau auf elektrische Energie bezogen wird, und nicht etwa nach Treibstoffen gesondert ausgewiesen wird.

2.3 E-Mobilität, volkswirtschaftliche Bewertung, etc.

In der aktuellen Version des Modells ist zudem die Elektrifizierung des Verkehrssektors mit einem am Ende in 2050 gemäß einer Sektorkopplungsstudie (HTW, 2016) definierten Bedarf von 337 TWh pro Jahr an zusätzlicher Elektrischer Energie enthalten. Nach diesem Muster kann das Modell auch zur Berücksichtigung von elektrischer Energie für industrielle Prozesse, benötigte Überschüsse beim Power-To-Liquid/Gas, oder zur Wärmeerzeugung erweitert werden. Weitere Aspekte der E-Mobilität, etwa der Rohstoffbedarf der dahinter stehenden Technologien, werden in diesem Modell nicht berücksichtigt. Jederzeit können andere Annahmen zum Bedarf elektrischer Energie für den Verkehrssektor erprobt werden. Zu der Frage, inwieweit P2G/L auch hierzu importiert oder selbst erzeugt wird, siehe Kapitel 5.3.

2.4 Volkswirtschaftliche Bewertung, etc.

Um auch die Kosten zu berücksichtigen, wurden grob die Größenordnungen der Investitionen und die der eingesparten fossilen Brennstoffe betrachtet. Beide wurden dann hinsichtlich ihrer Wertschöpfung im Inland bewertet und theoretische Preise abgeleitet.

2.5 Regionale und zeitliche Dimensionierung

Die Zeiteinheit des D3 EE Modells sind Tage für eine Simulation von 1990 bis 2050. Es werden jeweils Tag und Nacht eines Tages explizit betrachtet.

Räumlich unterscheidet das Modell nur Nord- und Süddeutschland. Die Trennung erfolgt durch Bundesländer, für die auch einzeln Daten gefunden wurden, welche eine solche Trennlinie sinnvoll machen. Zum Süden gehören Rheinland Pfalz, Hessen, Thüringen, Bayern, Baden Württemberg und das Saarland.

2.6 Datenquellen und -qualität

Ursprünglich sollte es bei dem D3 EE Modell um die Dynamisierung der Daten aus wenigen Quellen - vor allem der bereits erwähnten 'KRESSE' und '100% Strom aus EE' Studien - gehen. Bei der konkreten Modellierung stellte sich aber heraus, dass die meisten Parameter eigens recherchiert werden müssen. Einige Parameter sind zudem sehr schwer zu ermitteln, weshalb hier vorerst durch eine Kategorie gekennzeichnete Schätzwerte eingetragen sind. Diese können jederzeit durch bessere Werte (etwa aus dem Sachverständigengutachten aus dem UBA) mit Angabe von Quellen direkt im Modell ausgetauscht werden.

Aufgrund dieser Möglichkeit der Ergänzung von Daten und Erweiterung des Modells sind generell die Quellen für die Daten direkt im Modell hinterlegt, so dass mit der Aktualisierung des Modells auch bessere Quellen dort und nicht hier im Bericht zu finden sind. Das Modell selbst ist direkt über den folgenden Link aufzurufen: <http://www.imodeler.info/ro?key=CFWoCuVy2wWeyNSohddFjaw>

Ein ausführlicher Modell-Bericht als Word- oder PDF-Datei inkl. Beschreibung der Datenquellen kann jederzeit direkt aus dem Modell heraus erstellt werden (Menü...Presenter...Export).

2.7 Qualität der Simulationsergebnisse

Drei Aspekte sind bei der Bewertung der Simulationsergebnisse zu berücksichtigen:

- ▶ Zuerst handelt es sich, wie beschrieben, um ein vereinfachtes Modell mit nur ausgewählten Technologien und ihren durchschnittlichen Parametern, eingeteilt in grobe Regionen sowie der Simulation eines nur groben Zeitrasters.
- ▶ Zudem sind einige Daten derzeit noch Schätzwerte.

- Schließlich ist die dahinterliegende Simulation von Natur aus komplex, da sowohl die Nachfrage nach Strom als auch das Angebot durch die wetterabhängigen erneuerbaren Energien nicht exakt vorhersehbar sind.

Gerade der letzte Punkt zusammen mit dem groben Zeitraster ist von Bedeutung. Wenngleich die schwankende Nachfrage und das variierende Wetter (Wind und Sonne) bei der Simulation durch Normalverteilung und Monte-Carlo-Simulation grundsätzlich zu berücksichtigen sind, ist das Ergebnis dieser Simulationen doch immer ein geglätteter Mittelwert. In der Summe eines Tages gibt es kleinere Schwankungen als in einzelnen Stunden. Konkret mag es an einem Tag Wind und Sonne gegeben haben, aber zu bestimmten Stunden zu wenig oder zu viel. Annahme hier, dass die Speicher und das Lastmanagement, die über Tage hinweg wirksam sind, grundsätzlich auch innerhalb von Tagen wirksam sind und somit die grobe Vereinfachung für dieses Modell zulässig ist.

Das Modell selbst ist mit Zufallswerten für das Wetter (ein eigener Simulator alternativ zu der Möglichkeit, konkrete Wetterjahre zu hinterlegen) und Durchschnittswerten für die Strom-Nachfrage für das Jahr 2014 (je nach Datenlage auch zulässig vereinfachend mit Daten der Vorjahre) valide. Zuerst wurde ohne weitere Veränderungen (*ceteris paribus*) dieses Basis-Szenario in die Zukunft simuliert, um dann die aktuellen Pläne zum Ausbau der Erneuerbaren Energien und der Leitungskapazität sowie den Ausstieg aus der Kernkraft und die erwartete leichte Zunahme bei der Nachfrage (die im Modell durch den zunehmenden Bedarf für den Ausbau der erneuerbaren Energien bzw. das Recycling von Rohstoffen aus zurückgebauten Anlagen leicht verstärkt wird) zu berücksichtigen.

3 Aufbau und Handhabe des Prozess-Modells

Das D3 EE Modell wurde als Prozess-Modell basierend auf System Dynamics unter Verwendung so genannter Process-iMODELER-Faktoren entwickelt. Die Nachfrage nach Strom wird dabei durch Prozesse wie den Verbrauch erneuerbarer Energien, konventionelle Stromerzeugung oder eben auch Nicht-Deckung bedient. Die Prozesse hängen jeweils von Ressourcen ab, deren Kapazität ihrerseits durch Prozesse zum Ausbau der erneuerbaren Energien beschrieben werden. Die Ausbau-Prozesse benötigen Ressourcen aus einem Ressourcen-Bestand, der durch Abbau neuer Ressourcen oder durch Recycling wieder aufgefüllt wird. Bei der Auswertung zeigt die Simulation dann direkt, welche Prozesse laufen, also welche Technologien in welchem Umfang genutzt werden, welche Ressourcen verbraucht werden, und welche Ressourcen (Kapazitäten) möglicherweise ungenutzt bleiben.

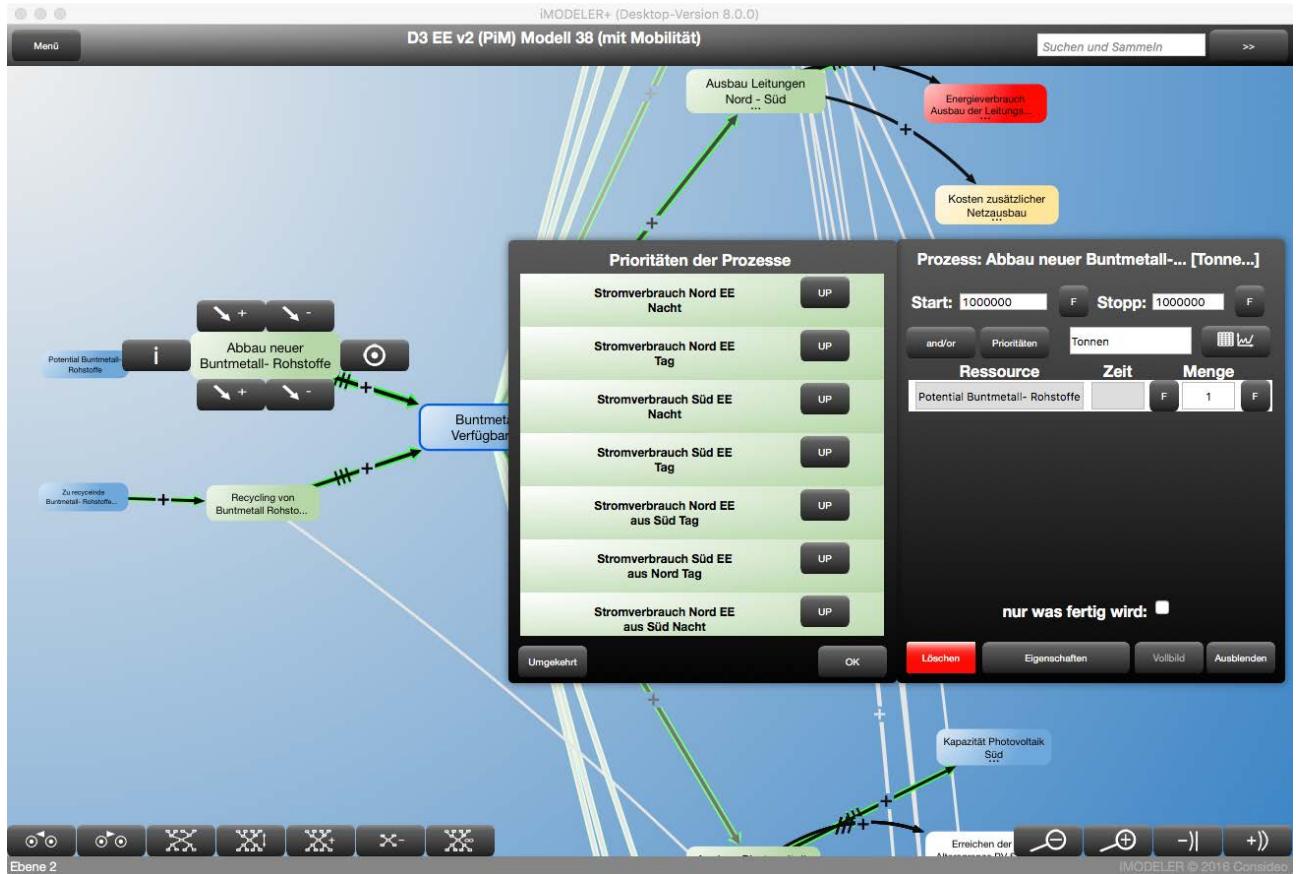
Wie das konkret im Modell aussieht, wird in den folgenden Unterkapiteln jeweils exemplarisch dargestellt. Vorweg ein Unterkapitel zu den verwendeten Faktor-Typen und Kategorien.

3.1 Prozess-Modellierung mit dem iMODELER

Als Simulationswerkzeug wurde der iMODELER gewählt. Neben diversen weiteren Vorteilen sind damit zum einen die Modelle direkt im Internet-Browser per Link verfügbar, und zum anderen bietet der iMODELER die Besonderheit so genannter Process-iMODELER Faktoren. Für dieses Modell wurden verwendet:

- ▶ Prozess-Faktoren: Mit diesen werden meist aber nicht ausschließlich Bestände (Bestands-Ressourcen-Faktoren) in Abhängigkeit von der Verfügbarkeit von Ressourcen (Ressourcen-Faktoren) abgebaut und neue Bestände (Bestands-Ressourcen-Faktoren) aufgebaut. Die Ressourcen können dabei ein UND oder ein ODER Kriterium haben. Beispielsweise erfolgt der Ausbau der erneuerbaren Energien als Prozess abhängig von der Verfügbarkeit (Bestands-Ressourcen-Faktor) der jeweiligen Ressourcen und Rohstoffe. Die Rohstoffe werden durch die Prozesse Abbau neuer Rohstoffe oder Recycling von zurückgebauten Anlagen gewonnen. Zwischen Prozess-Faktoren gibt es eine Prioritäten-Liste. So kann angegeben werden, dass ein Recycling Vorrang vor dem Abbau neuer Ressourcen hat.

Abbildung 1: Prozess-Faktoren



Die Prioritäten-Liste mit dem Vorrang von Recycling vor Abbau neuer Ressourcen sowie die der Prozess des Abbaus neuer Buntmetall-Rohstoffe, der den gleichen Wert bei Start- und Stopp hat, was dazu führt, dass jeglicher Verbrauch gleich wieder aufgefüllt und damit dem Prozess zugeordnet werden kann.

- Bestands-Ressourcen-Faktoren: Diese werden durch normale oder Prozess-Faktoren aufgefüllt oder abgebaut. Beim Auffüllen spielt das Stop-Kriterium, was bei den Prozessen definiert werden kann, eine Rolle. Abbildung 1 zeigt, dass nur bis zu einem bestimmten Stand wieder aufgefüllt wird, und dass dabei wenn möglich das Recycling Vorrang hat.
- Ressourcen-Faktoren: Diese werden im Modell zumeist zur Darstellung von Kapazitäten etwa zur Leitung von Strom, zur Speicherung oder zur Energieerzeugung genutzt. Eine Ressource kann von den Prozessen genutzt werden oder je Zeiteinheit ungenutzt bleiben. Eine besondere Verwendung dieses Faktortypen haben wir für die Nachfrage von Strom gewählt. Anstelle eines intuitiv näherliegenden Bestands-Ressourcen-Faktors ist im D3 EE Modell die Nachfrage nach Strom ein Ressourcen-Faktor. Als Bestand hätte dieser automatisch eine Verzögerung und würde dann erst einen Monat später bedient. Als Ressource wird die Nachfrage sofort durch die Prozesse der nachhaltigen und der konventionellen Stromversorgung 'bedient'. Damit Nachfrage nicht 'nicht-bedient' bleibt, gibt es einen weiteren Prozess (Faktor "Nicht-gedeckte Nachfrage"), der in der Priorität nachrangig zu nicht-gedeckter Nachfrage führt (siehe Abb. 7). Die Bezeichnung Ressourcen-Faktor ist in diesem Falle irreführend.

Neben diesen speziellen Faktortypen werden zahlreiche aus System Dynamics bekannte Bestands-, Fluss- und Hilfsfaktoren genutzt.

Das Modell umfasst bereits über 404 Faktoren und über 800 Verbindungen bei 22280 Simulationsschritten und mehr als 15000 so genannte Wirkungsschleifen. Um übersichtlich angezeigt werden zu können, bietet die Software diverse Hilfestellungen. Eine ist der Wechsel von Perspektiven

und die Ansicht einer begrenzten Zahl von Verbindungsebenen ausgehend von dem Faktor, der aktuell im Zentrum der Perspektive ist. Die Abbildungen im Folgenden zeigen das Modell aus unterschiedlichen Perspektiven mit mal mehr und mal weniger Verbindungsebenen.

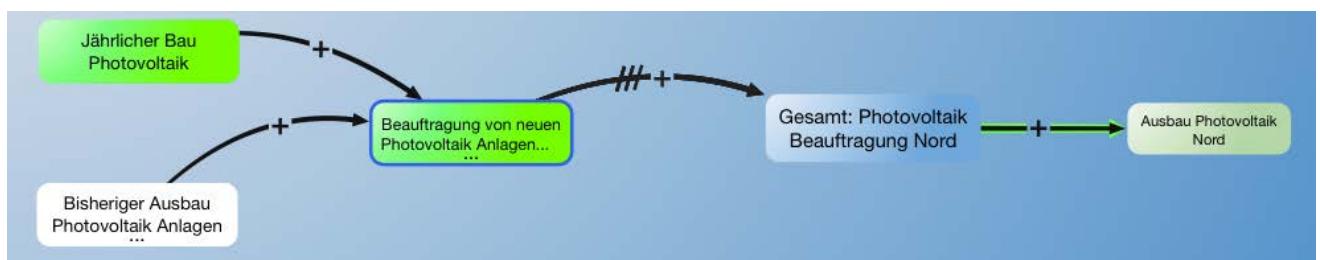
Von den im D3 EE Modell definierten Kategorien ist besonders erwähnenswert die Kategorie „Stellschraube“, über deren Faktoren beispielsweise der Ausbau der Windenergie variiert werden kann. Wichtig außerdem die Kategorie „Parameter“ für die Daten nebst Quellen, die in das Modell geflossen sind, und die Kategorie „Schätzwerte“ für die Faktoren, für die noch keine oder nur vage Daten hinterlegt sind.

Über den Presenter (Menü...Presenter) können zudem ausgewählte Ausschnitte und weitere Erläuterungen zum Modell direkt über das Modell angeschaut werden.

3.2 Modellausschnitt: Ausbau Erneuerbarer Energien

Der Ausbau der jeweiligen erneuerbaren Technologien für erneuerbare Energie beginnt mit der Beauftragung, einem Faktor mit der Kategorie 'Stellschraube' bzw. einem Parameter (weiss gefärbt) für die Annahme eines konstanten Zubaus, wie Abbildung 2 zeigt:

Abbildung 2: Ausbau erneuerbarer Energien zur Stromerzeugung

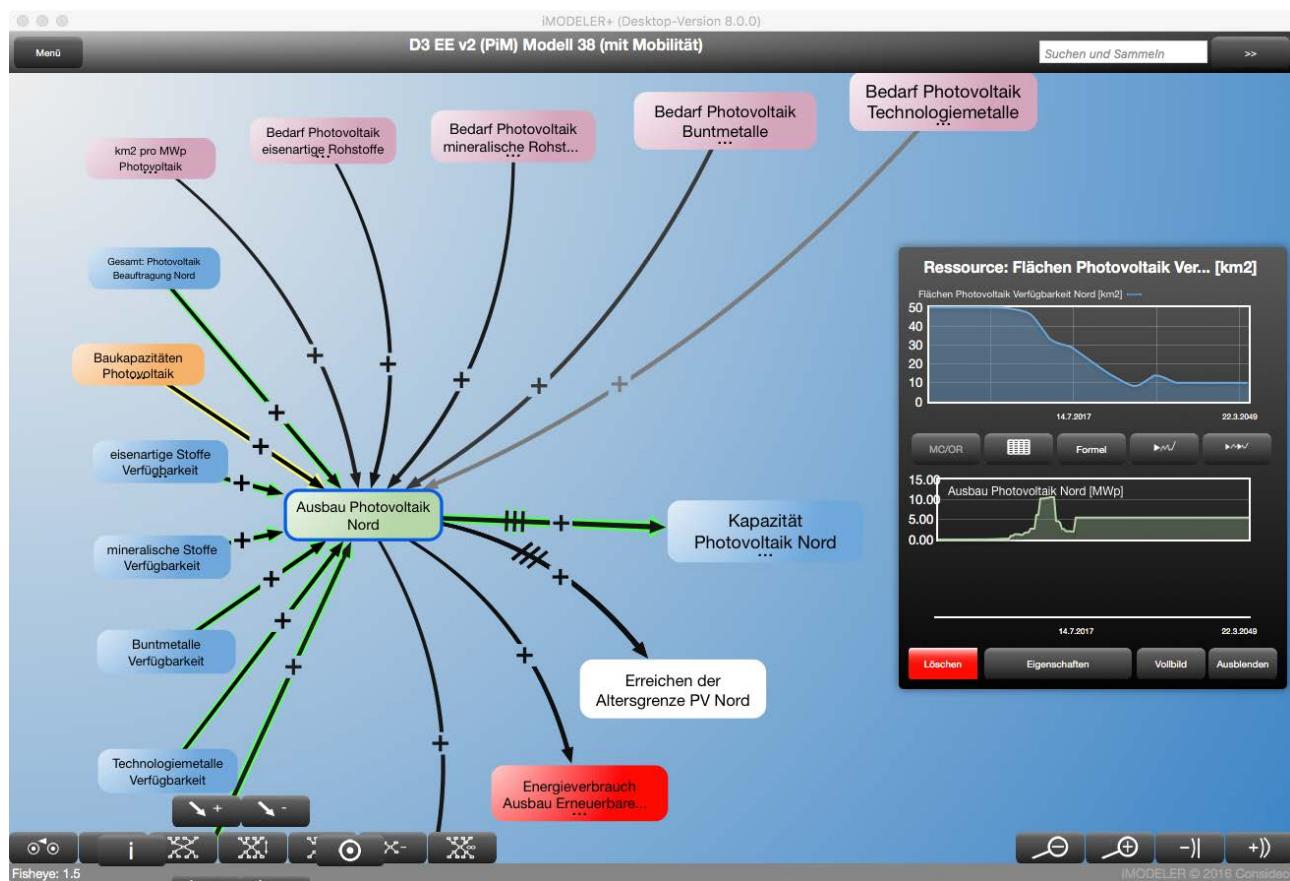


Bildung des Auftragsbestands für weitere Photovoltaik-Anlagen in Nord

Abbildung 3 zeigt: Der Faktor „Gesamt: Photovoltaik Beauftragung Nord“ beschreibt die Menge in MWp, die im Norden hinzugebaut werden soll, als Bestands-Ressourcen-Faktor. Der nachfolgende Prozess „Ausbau Photovoltaik Nord“ baut diesen Bestand dann in Abhängigkeit von den jeweiligen Ressourcen ab. Dabei sind zum einen die Bestands-Ressourcen der jeweiligen Metalle etc. angefügt, und zum anderen die Ressource 'Photovoltaik-Baukapazitäten', welche auch für den Rückbau älterer Anlagen genutzt wird. Diese Ressourcen sind im Modell angelegt, aber noch nicht mit Daten versehen und daher erst einmal nur mit einer sehr hohen, unkritischen Zahl versehen worden! Für die Metalle und Mineralien sind jeweils Parameter Faktoren (so durch eine Kategorie benannt) angefügt, die beschreiben, wie viel von den Beständen der Prozess des Ausbaus je MWp benötigt.

Das Ergebnis des Ausbaus ist die Kapazität Photovoltaik Nord als Bestands-Ressource. Der Ausbau erhöht diese, der Rückbau senkt diese. Der aktuelle Wert der Kapazität wird über einen normalen Faktor berechnet zum Ressourcen-Faktor für den Prozess des Stromverbrauchs aus erneuerbaren Energien (Abb. 6).

Abbildung 3: Ausbau als Prozess in Abhängigkeit von Ressourcen



Der Ausbau von Technologien in Abhängigkeit von den Ressourcen. Die Simulationskurve zeigt dabei, dass die Flächen bis zu dem Zeitpunkt abnehmen, zu dem der Rückbau alter Anlagen im Gleichgewicht mit dem Zubau neuer Anlagen zu sein scheint.

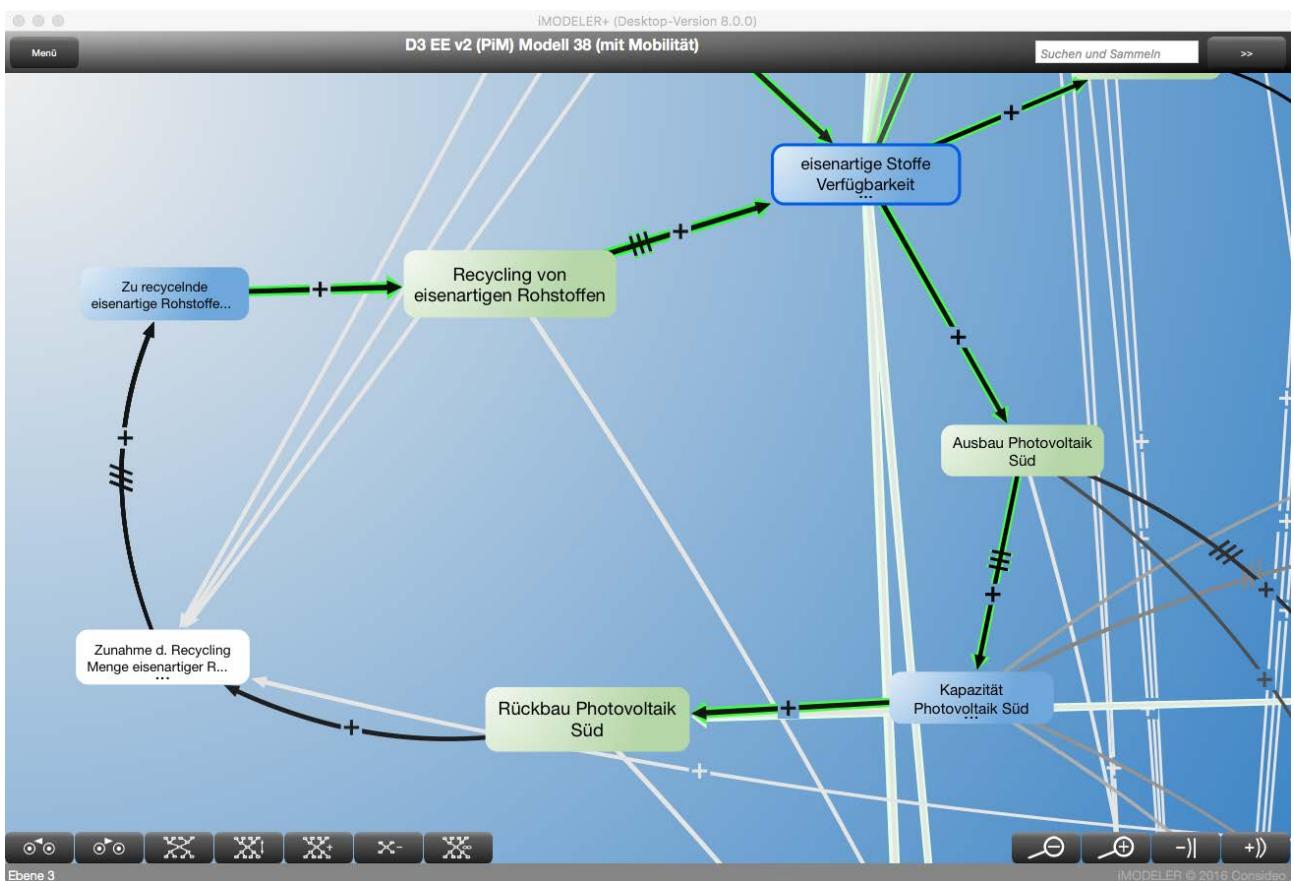
3.3 Modellausschnitt: Recycling von Ressourcen

Die für die Ausbau-Prozesse benötigten Rohstoffe werden einem Bestand entnommen, in der folgenden Abbildung der Faktor 'eisenartige Stoffe Verfügbarkeit'. Dieser wird zum einen durch Recycling zurückgebauter Anlagen erhöht, und zum anderen durch den Abbau neuer eisenartiger Rohstoffe (siehe nächstes Kapitel).

Der Prozess baut dann die Kapazität, hier von Photovoltaik Süd, auf. Zeitverzögert (Faktor 'Erreichen der Altersgrenze PV Süd') wird dann ein Bestand an Aufträgen zum Rückbau der alten Anlagen gebildet. Dieser Rückbau kostet Energie, reduziert die Kapazität, und setzt Flächen und potentielle Rohstoffmengen für ein Recycling frei. Das Recycling ist dann ein eigener Prozess, der die Verfügbarkeit der Rohstoffe wieder erhöht und dabei seinerseits Energie verbraucht. Derzeit haben die Faktoren zu den Recyclingquoten der einzelnen Rohstoffe je nach Technologie zwischen 80 und 100 Prozent.

Wie bereits erwähnt wird über den Parameter 'Bedarf an' ein über die Zeit variabler Wert möglich, der technischen Fortschritt darstellen kann. Es können also heutige Anlagen mehr eines Rohstoffes brauchen, als zukünftige. Und wenn später die Anlagen zurückgebaut werden, wird dank der Zeitverzögerung auch zwischen dem Parameter und dem Rückbau die Ressourcen-Menge damaliger Anlagen wiedergewonnen.

Abbildung 4: Recycling von Rohstoffen

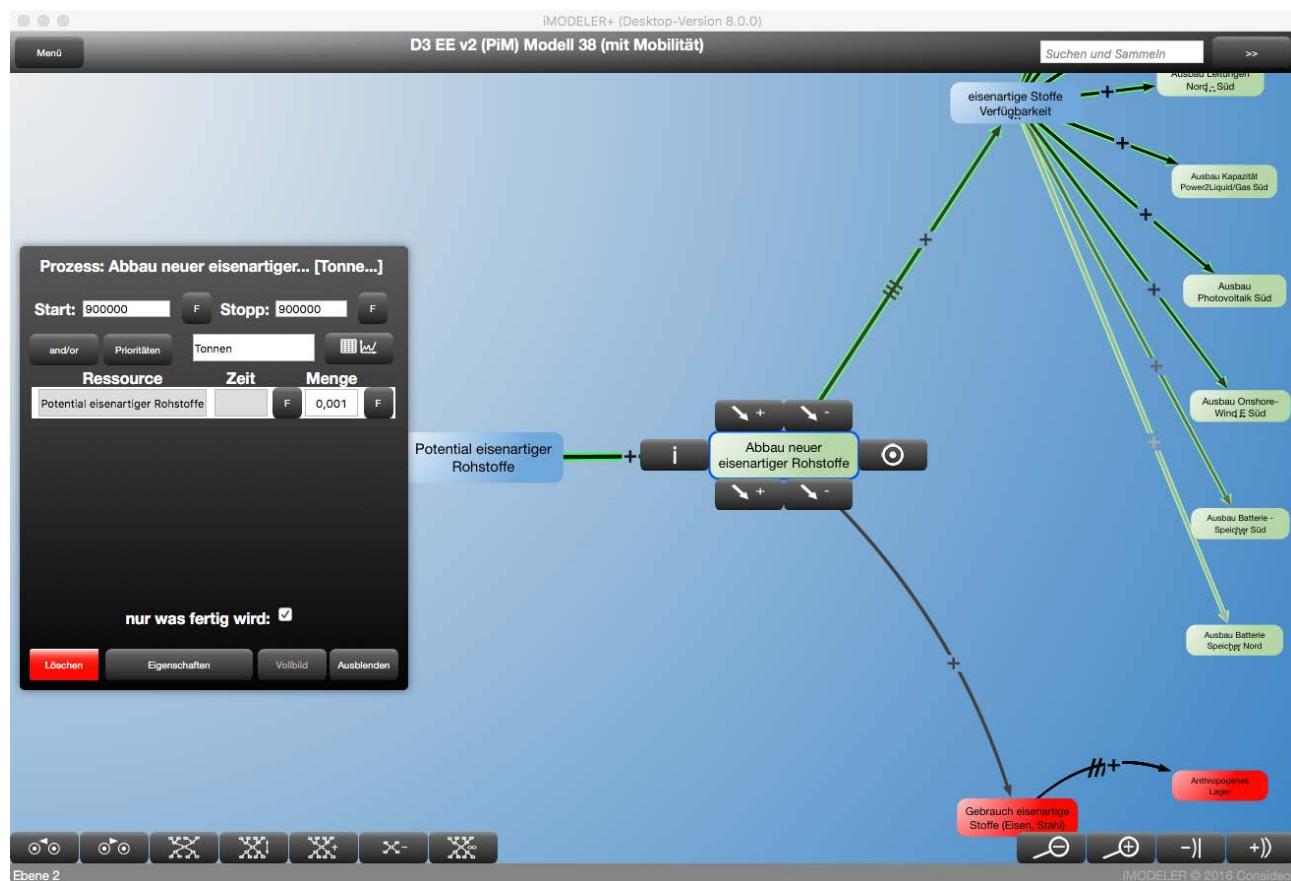


Die Rohstoffe werden für die Ausbau-Prozesse verwendet und zeitverzögert werden diese so aufgebauten Kapazitäten wieder zurückgebaut und damit ein Bestand für ein Recycling gebildet, welcher den Rohstoff-Bestand wieder auffüllen kann.

3.4 Modellausschnitt: Abbau von Ressourcen

Da Studien zufolge die meisten Rohstoffe nicht kritisch sind, bedient sich dieses Modell eines Tricks und setzt den Anfangsbestand der Verfügbarkeit erst einmal sehr hoch an. Nachdem ein Recycling alter Anlagen vorrangig diesen Bestand wieder auffüllt erfolgt der Abbau neuer Rohstoffe gesteuert über das Start- und Stopp-Kriterium immer so, dass genau der Anfangsbestand gehalten wird. Somit kann der Abbau direkt die Bindung der Stoffe im anthropogenen Lager aufsummieren.

Abbildung 5: Abbau von Rohstoffen

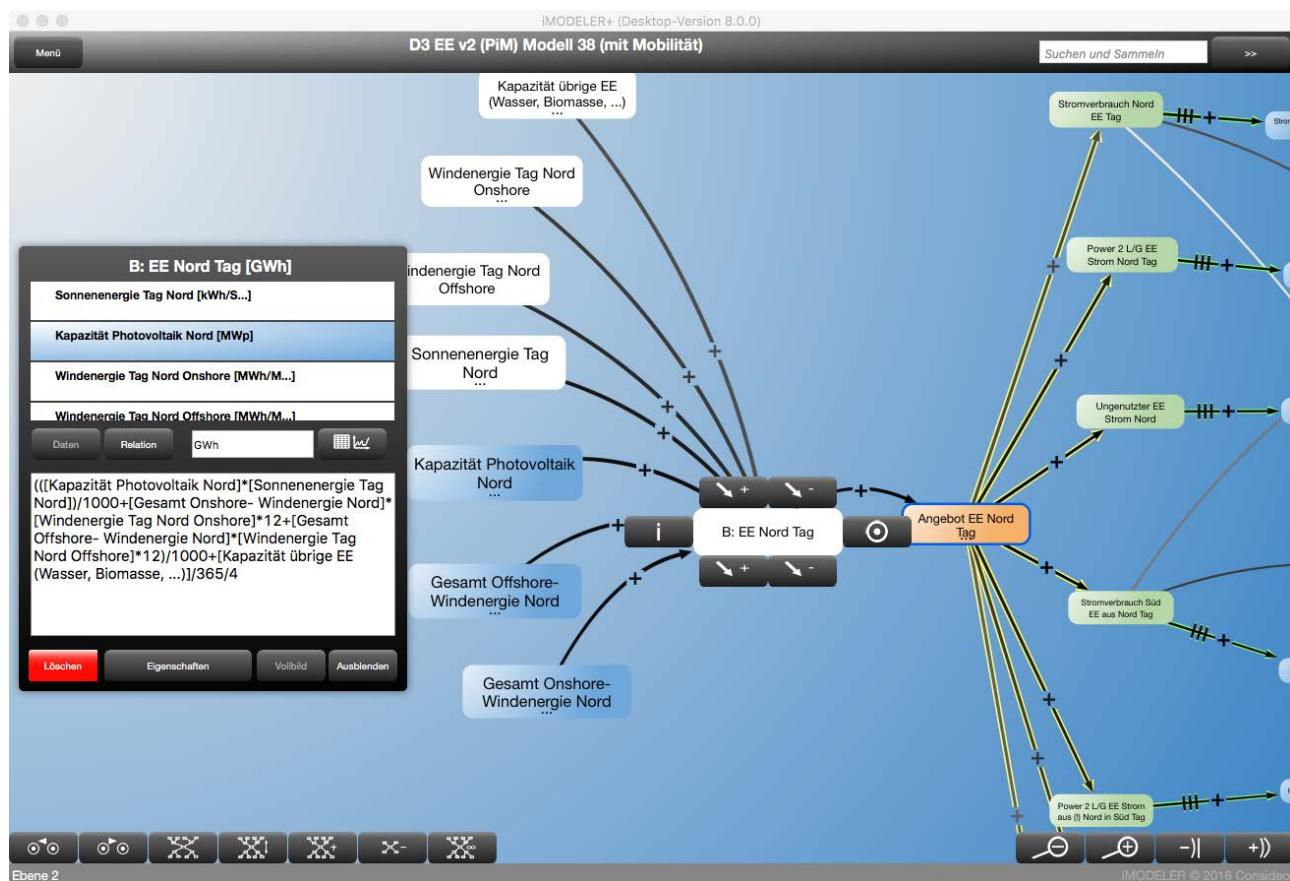


Der Abbau neuer Rohstoffe aufsummiert im anthropogenen Lager

3.5 Modellausschnitt: Verwendung der erneuerbaren Energien

Die Bereitstellung von erneuerbaren Energien in Abhängigkeit von den Anlagen-Kapazitäten und Wind und Sonne wird nach vorgegebener Priorität über Prozesse genutzt. Als erstes erfolgt der Verbrauch zur gleichen Zeit in der gleichen Region. Wenn etwas übrig bleibt - und Leitungskapazitäten zur Verfügung stehen - wird diese Menge in der anderen Region angeboten, zum Verbrauch oder zur Erzeugung von Gas (Power-To-Gas) dort. Wenn dann noch etwas übrig bleibt, wird dies in Abhängigkeit von Kapazitäten zur Erzeugung Gas (Power-To-Gas) in der eigenen Region verwendet.

Abbildung 6: Prozesse verwenden das Angebot erneuerbarer Stromerzeugung



Das Angebot an erneuerbaren Energien wird in vorgegebener Reihenfolge aufgebraucht oder bleibt am Ende ungenutzt.

Sollte auch danach noch etwas übrig bleiben, wird ein virtueller Prozess der ungenutzten Energie einen Bestand Ungenutzte EE Menge ... gesamt füllen, was gleichzusetzen ist mit einem Abschalten von Anlagenkapazitäten oder dem Verkauf ins Ausland (in diesem Modell Systemgrenze).

3.6 Modellausschnitt: Deckung des Energiebedarfs

Die Nachfrage nach elektrischer Energie ist wie weiter oben beschrieben nicht etwa ein Bestands-Ressourcen-Faktor, der zeitverzögert abgebaut wird, sondern ein Ressourcen-Faktor, welcher im gleichen Zeitschritt der Reihenfolge der festgelegten Prioritäten nach genutzt wird, zuletzt von dem Prozess der nicht-gedeckten Nachfrage. Die Bezeichnung 'Ressourcen-Faktor' ist hier als also genauso wenig wörtlich zu nehmen, wie die des Prozesses im Falle der nicht-gedeckten Nachfrage.

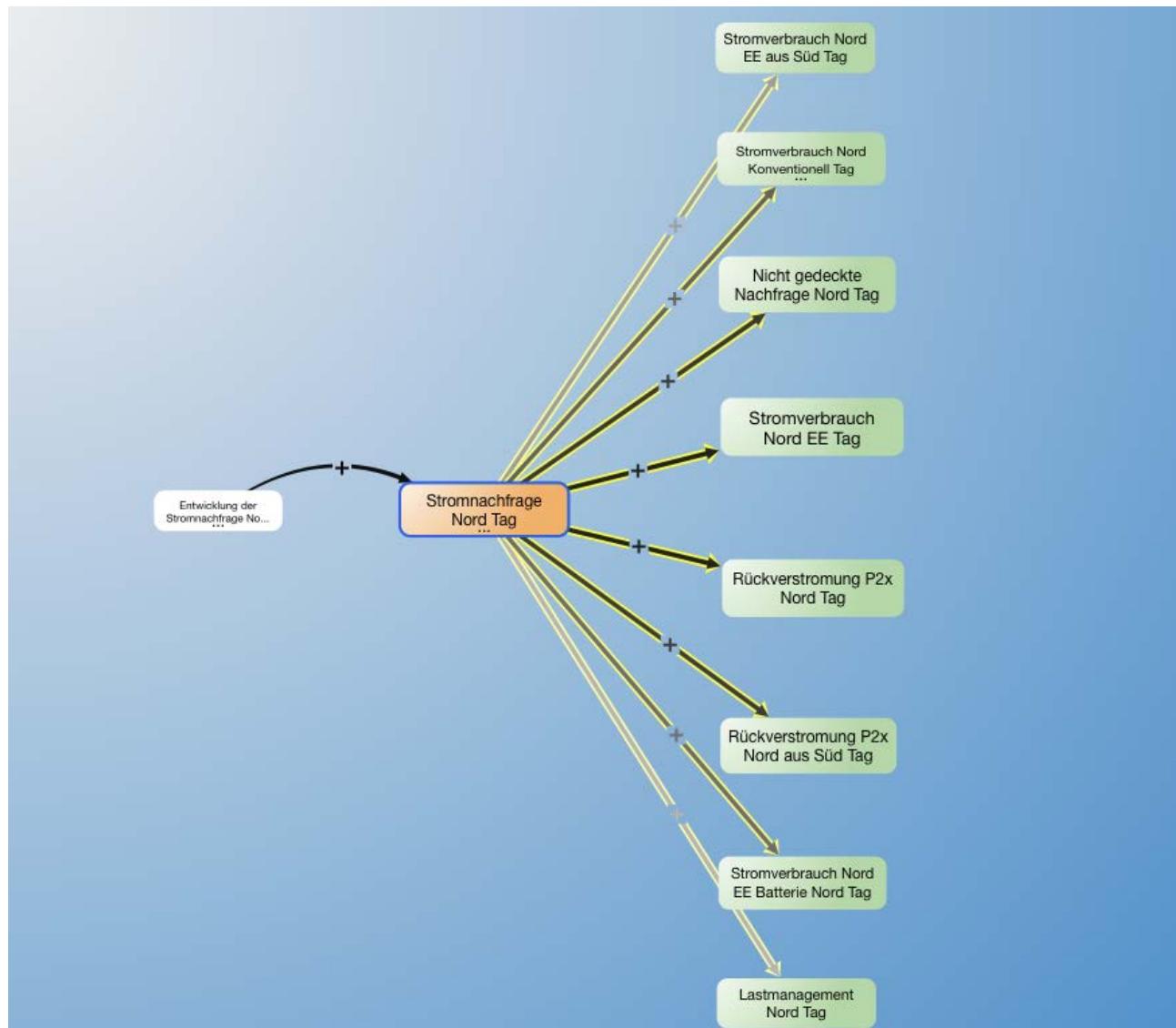
Zuerst wird die Nachfrage durch die erneuerbaren Energien vor Ort bedient. Danach - eingestellt über die Prioritäten (siehe Abbildung 1) folgen die übrig gebliebenen erneuerbaren Energien aus der anderen Region. Danach folgt ein Lastmanagement, werden die Batteriespeicher geleert und Power-to-Liquid/Gas rückverstromt. Schließlich kommen die konventionellen Energieträger zum Einsatz.

Hinweis: es gab auch auf Seiten des Umweltbundesamts eine Diskussion, ob überschüssiger Strom direkt in Wärme, Kälte etc. umgewandelt werden sollte, oder mit schlechterem Wirkungsgrad zu Power-to-Liquid/Gas, und ob dieses dann direkt wieder für Wärme und Motoren verwendet, oder rückverstromt werden sollte. Grundsätzlich ließe sich das Modell leicht um diese Fassetten erweitern. Da dieses Modell aber die Größenordnungen der Energiewende beleuchten soll und weniger die Realität mit auch der Integration in den Europäischen Strommarkt, scheint die Annahme der vollständigen Rückverstromung sinnvoll. Die nachrangige Rückverstromung ist dabei genauso zu

bewerten, wie eine Verwendung als Brennstoff anderswo. Die direkte Verwendung für Wärme und Kälte könnte in der Größenordnung über die Faktoren für ein Lastmanagement im Modell berücksichtigt werden.

Was jetzt noch nicht berücksichtigt wurde, da bisher in den Szenarien die Kapazitäten der konventionellen Energieträger ausreichten und auch eher die Leitungskapazitäten einen Engpass darstellen, ist die Möglichkeit, dass auch konventioneller Strom aus der jeweils anderen Region die Nachfrage zu decken ermöglicht. Sobald eine Simulation eine nicht-gedeckte Nachfrage ergibt, sollte das Modell dahingehend erweitert werden.

Abbildung 7: Prozesse bedienen die Nachfrage nach elektrischer Energie



Deckung der Nachfrage, zuerst durch erneuerbare Energien und zuletzt rein-theoretisch in nicht gedeckter Nachfrage mündend

Batteriespeicher und Rückverstromung funktionieren im Grunde gleich, haben nur unterschiedliche Wirkungsgrade, Rohstoffbedarfe und Kosten. Batteriespeicher werden vermutlich vor allem zwischen Tag- und Nacht an einem Tag ausgleichend wirken - wie das Modell es auch abbildet - und innerhalb eines Tages, wenn etwa erst nachmittags die Sonne scheint. Es kann daher gut sein, dass ein Teil der Batteriespeicher innerhalb der Tagesphase eines Tages gebraucht wird, und das Modell, da es nicht

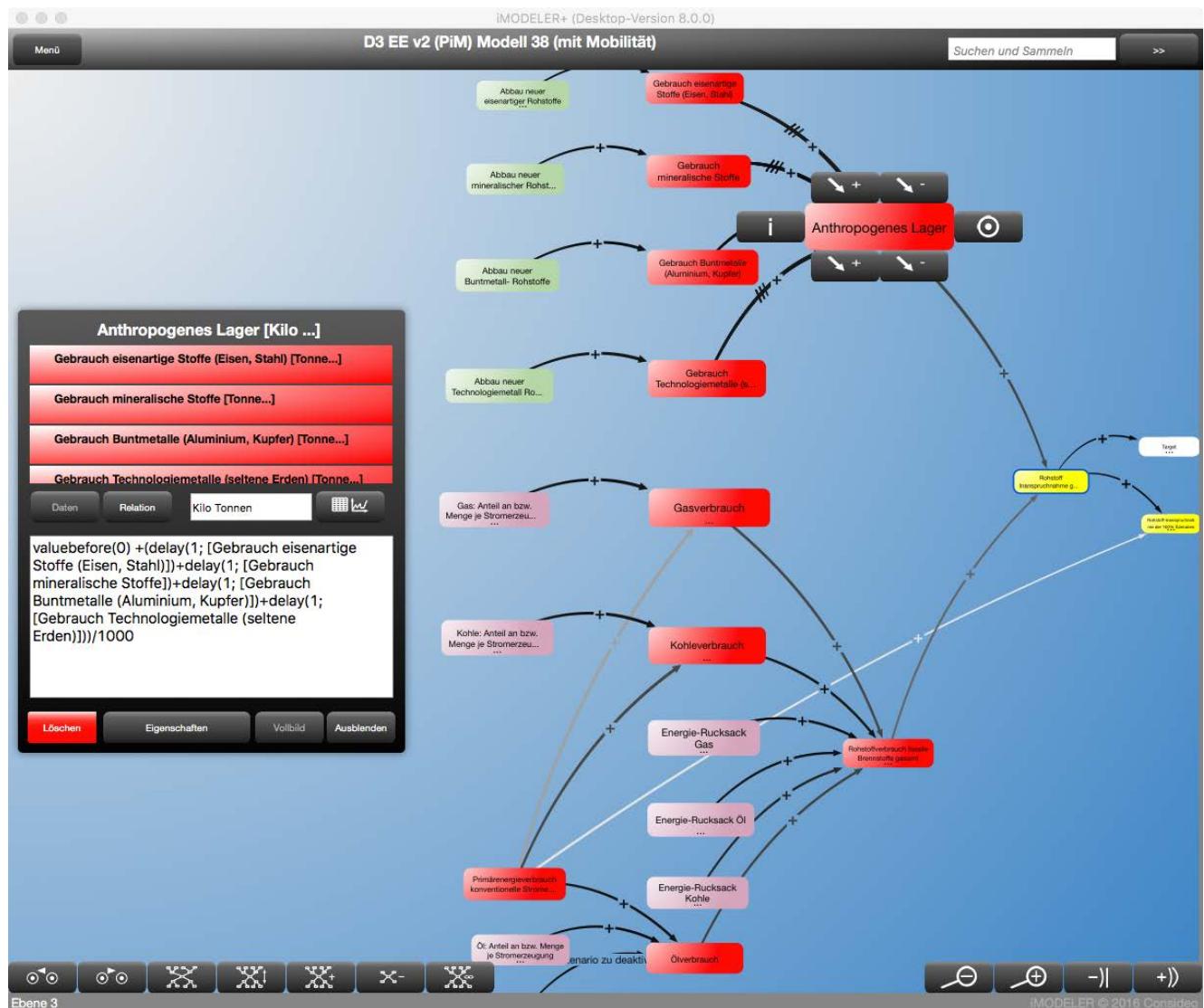
Stunden berechnet, diese Speicherinanspruchnahme nur vom Vortag simuliert. Die Größenordnungen sind aber die gleichen, weshalb diese Vereinfachung zulässig ist.

Lastmanagement ist in dem Modell vorerst nur angelegt durch Parameter für zum einen die absolute Menge Nord/Süd, Tag/Nacht, welche um einen oder zwei Tage verschoben werden kann, und zum anderen den Prozenten, wie viel davon um einen und wie viel um zwei Tage verschoben werden kann. Hierzu lagen während der Modellerstellung noch keine Daten vor, weshalb diese Parameter noch extrem klein gewählt wurden.

3.7 Modellausschnitt: Rohstoff Inanspruchnahme

Die Rohstoffe werden im Falle der fossilen Rohstoffe verbraucht und im Falle der übrigen Rohstoffe im so genannten anthropogenen Lager gebunden. Die Szenarien zu unterschiedlichen Ausbaustrategien für erneuerbare Energien erlauben über diese Faktoren die Rohstoff Inanspruchnahmen zu vergleichen.

Abbildung 8: Rohstoff Inanspruchnahme



Die Inanspruchnahme als Summe aus Verbrauch fossiler Rohstoffe und Bindung der übrigen Rohstoffe in Anlagen

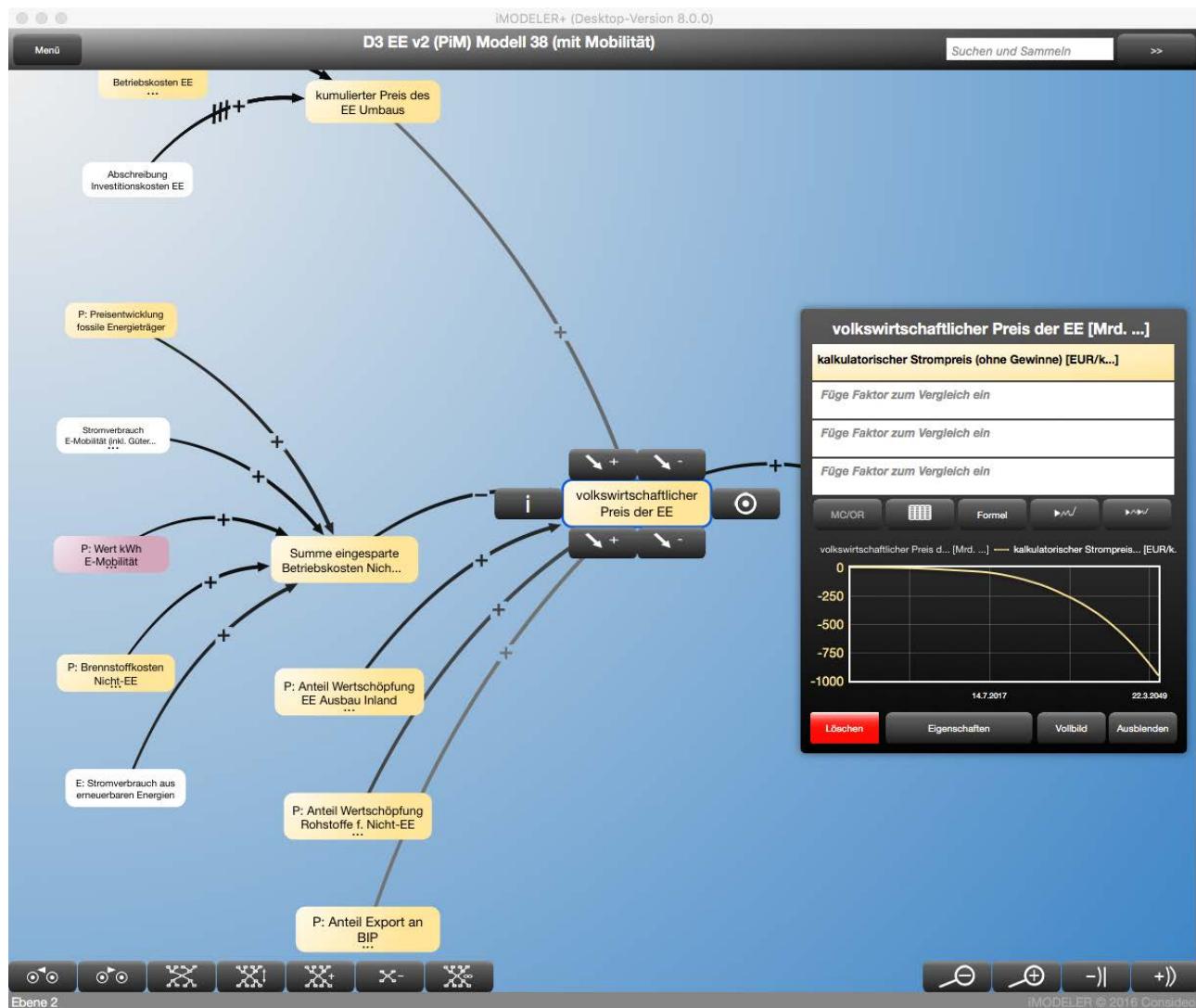
3.8 Modellausschnitt: Volkswirtschaftliche Bewertung

Nachdem eine frühere Version dieses Modell bereits ergeben hat, dass ein massiver und schneller Ausbau der Erneuerbaren Energien sowohl hinsichtlich des Erreichen des Ausbauziels notwendig, als auch hinsichtlich der Ressourcen-Inanspruchnahme sinnvoll ist, erscheint ein Blick auf das Haupt-Gegenargument gegen diesen massiven Ausbau entscheidend. In der öffentlichen Diskussion werden die immensen Kosten und die daraus resultierende Erhöhung der Energiepreise mit all ihren negativen Folgen für die Verbraucher und direkt und indirekt für die Wirtschaft angeführt.

Ohne mit diesem Modell die Marktpreise, den europäischen Strommarkt oder die Entwicklung der Preise von fossilen Brennstoffen in Abhängigkeit von globalen Entwicklungen zu modellieren, lässt sich doch die Größenordnung (!) der erforderlichen Investitionen und die der eingesparten Brennstoffkosten nicht-erneuerbarer Energien gegenüberstellen. Die Stellen, an denen es erst einmal nur Annahmen sein können, können in Szenarien variiert werden, beispielsweise die Preisentwicklung fossiler Brennstoffe.

Die Annahmen, die sich jetzt im Basis-Szenario finden, gehen von einer Verdopplung der Preise für fossile Brennstoffe aus. Die Kraftwerke selbst werden trotz Ausbau der Erneuerbaren Energien weitestgehend weiter unterhalten, allerdings werden die Fixkosten in dem Modell noch nicht berücksichtigt, wie auf der anderen Seite die Betriebskosten der Erneuerbaren Energien noch nicht berücksichtigt werden. Beides sind jeweils die kleineren Kostenblöcke, weshalb diese erst einmal vernachlässigt werden. Sie könnten aber kalkulatorisch - also unabhängig von dem tatsächlichen Alter der nicht-erneuerbaren Anlagen und deren Restabschreibung etc. - jederzeit ins Modell eingebaut werden. Faktoren hierfür sind bereits angelegt und auf Null gesetzt.

Abbildung 9: Volkswirtschaftliche Bewertung des Ausbaus



Die Investitionskosten vs. eingesparter Kosten bei den Nicht-EE bewertet durch die jeweilige Wertschöpfung im Inland

Beim kalkulatorischen Strompreis werden abgeleitet vom Merit-Order Grenzkosten der Nicht-Erneuerbaren Energien betrachtet. Bei der volkswirtschaftlichen Bewertung berücksichtigt das Modell zudem auch nicht die eingesparten Folgen der Schadstoff-Belastungen durch fossile Energien. Es werden aber Annahmen hinsichtlich der Wertschöpfung im Inland sowohl der fossilen Brennstoffe als auch des Ausbaus der Erneuerbaren Energien gemacht. Diese dahinter, dass der Ausbau im Sinne einer Investition einen hohen Wertschöpfungsgrad im Inland mit sich zieht, während die fossilen Brennstoffe weitestgehend einen Geldabfluss ins Ausland bedeuten. Um systemisch vollständig zu bleiben, gibt es einen Parameter, der einen Teil des abfließenden Geldes unserer Volkswirtschaft wieder gutschreibt, wenn das Ausland hierüber sich Importe aus Deutschland leisten kann.

4 Anwendungen des Modells

Das D3 EE Modell erlaubt in seiner jetzigen Form bereits etliche Fragestellungen zu untersuchen, und kann aufgrund seines grundsätzlich einfachen Aufbaus leicht für weitere Fragestellungen erweitert werden. Im Rahmen dieses Projektes und Berichts schauen wir nur vier Szenarien gemäß der Leistungsbeschreibung an.

Für Modelle im Allgemeinen und dieses im Besonderen gilt, dass es keine genaue Vorhersage ist, sondern ein Gefühl für die Größenordnungen von Entwicklungen vermitteln soll. Eine Erweiterung des Modells und die Hinzunahme genauerer Daten können zudem die Ergebnis-Qualität weiter verbessern.

Bei der Simulation gibt es drei Arten. Zum einen die einfache Simulation des Modell mit händisch variierten Parametern. Zum anderen ein gezieltes, automatisches Ausprobieren von Parameter-Kombinationen durch Verwendung der `range()`-Funktion. Und schließlich die Verwendung von Zufallsfaktoren zur Simulation einer Bandbreite möglicher Entwicklungen - etwa des Wetters oder der Nachfrage durch die Bevölkerung - durch so genannte Monte-Carlo-Simulationen. Wichtig ist der Hinweis, dass nicht gleichzeitig `range()`- und Monte-Carlo-Simulationen gefahren werden können. In der Praxis wird daher zumeist zuerst mit `range()` eine potentiell optimale Parameter-Kombination ermittelt, und dann mit Monte-Carlo-Simulationen geschaut, welche Bandbreite an Entwicklungen diese Kombination nehmen kann.

Hinweis: für größere Monte-Carlo-Simulationen oder die Verwendung der `range()` Funktion kann es erforderlich sein, die Desktop-Version des iMODELers zu wählen, da die webbasierte Version des iMODELers in der Berechnungsdauer eingeschränkt ist. Für live-Präsentationen empfiehlt es sich daher auch nur wenige Kombinationen oder wenige Zufallsläufe zu wählen und auf ausführlichere Simulationen zu verweisen bzw. die Simulationsläufe vorab im Präsentator (Menü ... Präsentator) abzulegen.

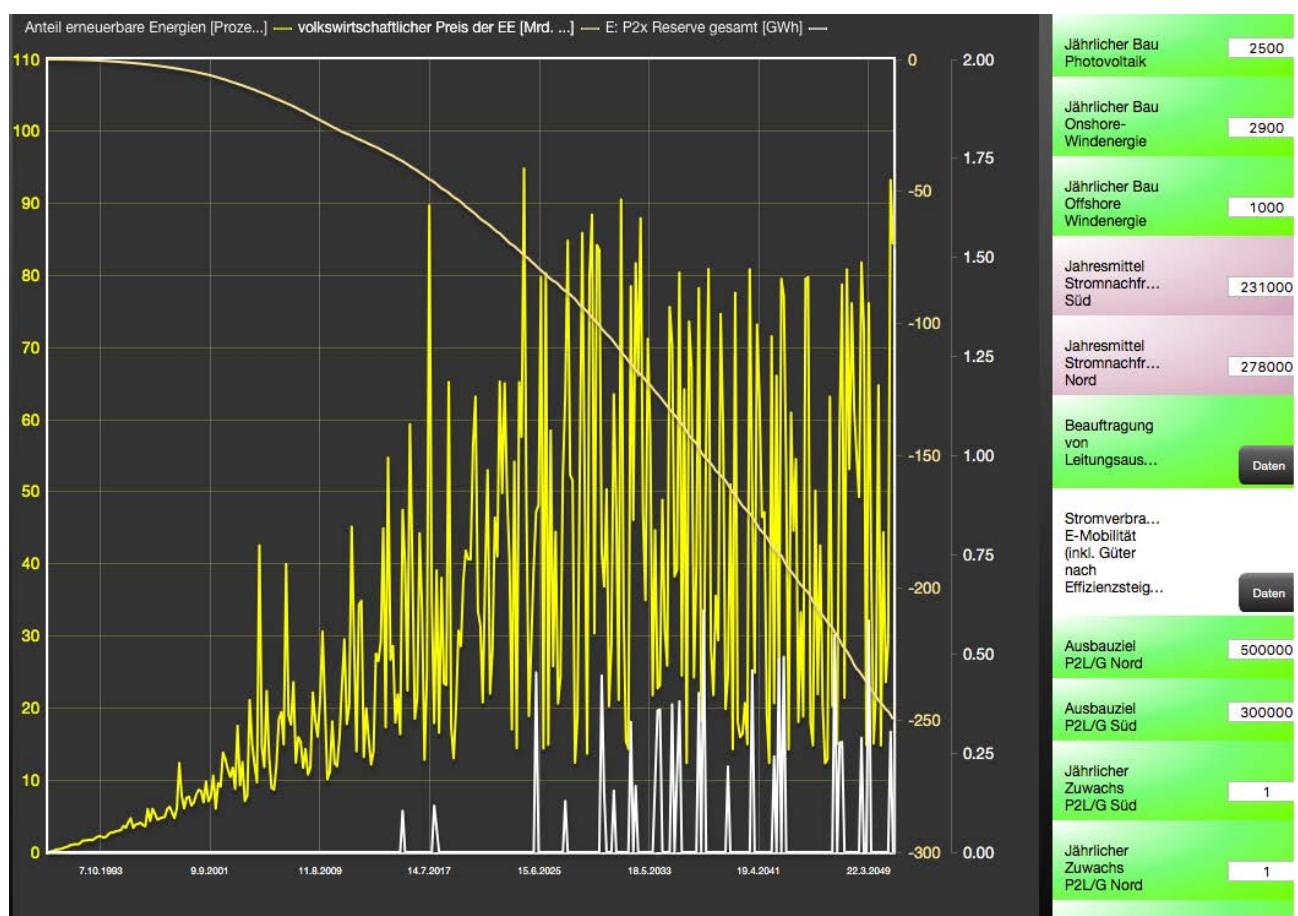
4.1 Analyse: Welchen Anteil können die erneuerbaren Energien beim derzeit vorgesehenen Ausbau erreichen (Szenario 1)

Den aktuellen Zahlen folgend ist ein Ausbau der Offshore-Windenergie im Modell mit 1000 MWp pro Jahr brutto im Basis-Szenario angelegt, der Ausbau Onshore-Windenergie (jeweils zur Hälfte Nord und Süd) mit 2800 MWp pro Jahr brutto und der jährliche Ausbau Photovoltaik ebenfalls zur Hälfte Nord und Süd mit 2500 MWp pro Jahr brutto. Die jeweiligen MWp sind der Wert, ab dem die Förderung gekürzt wird.

Der Ausbau Power-To-Gas/Liquid ist im Modell im Basis-Szenario mit 0 angesetzt, und beim Ausbau der Leitungskapazität werden die derzeitigen Trassenpläne mit in Summe ca. 10 GW Kapazität bis ca. 2022 angenommen.

Ziel der ersten Analyse ist zu schauen, wie der derzeitige Entwicklungspfad verlaufen würde unter der Annahme linearen Ausbaus der Windenergie und Photovoltaik und bei Annahme eines leichten Verbrauchsanstiegs, wie in der bereits erwähnten Energie-Prognose-Studie angegeben. Außerdem ist ein Kohleausstieg in den folgenden Szenarien angenommen worden. Über einen gleichnamigen Faktor kann dieser beliebig variiert werden.

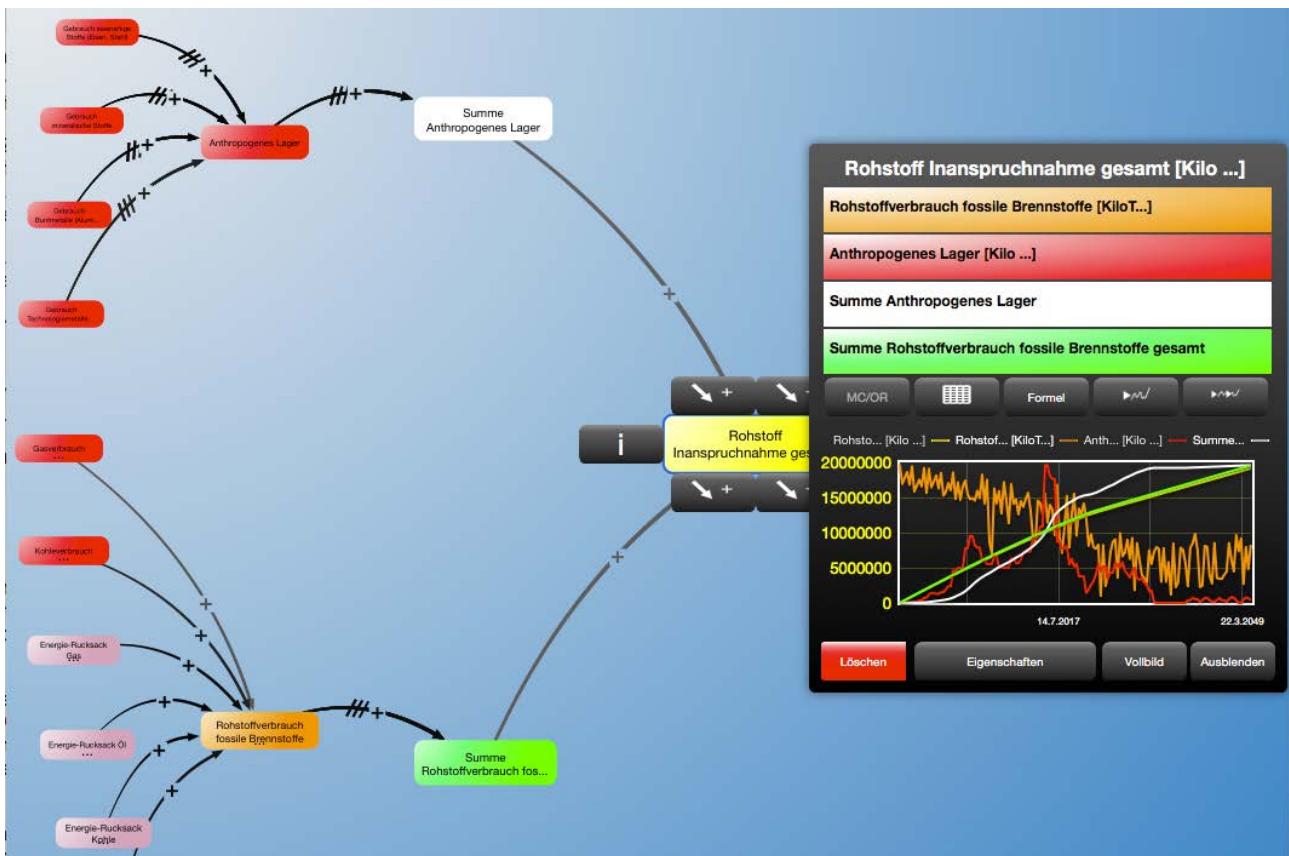
Abbildung 10: Anteil erneuerbarer Stromproduktion bei derzeitigem Ausbau



Der Anteil erneuerbarer Energien bei derzeit (gemäß EEG 2017) moderatem Ausbau. Die sichtbare Stagnation ist dem dann einsetzenden Rückbau alter Anlagen geschuldet.

Die Bandbreite bei den erneuerbaren Energien bedingt gleichzeitig die Bandbreite der benötigten konventionellen Energien und erklärt somit, dass ein 100 % erneuerbare Energien Ziel bei dem jetzigen Ausbaupfad nicht erreichbar ist.

Abbildung 11: Rohstoff-Inanspruchnahme bei derzeitigem Ausbau



Die Rohstoff Inanspruchnahme als Kombination von weiter bestehendem Verbrauch fossiler Brennstoffe einerseits und einem dank Recycling nachlassendem Abbau von Rohstoffen für den Ausbau bzw. das Repowering von Erneuerbaren Energien

4.2 Analyse: Welcher Ausbau von Photovoltaik und Windenergie könnte das 100% erneuerbare Energien Ziel erreichen (Szenario 2)

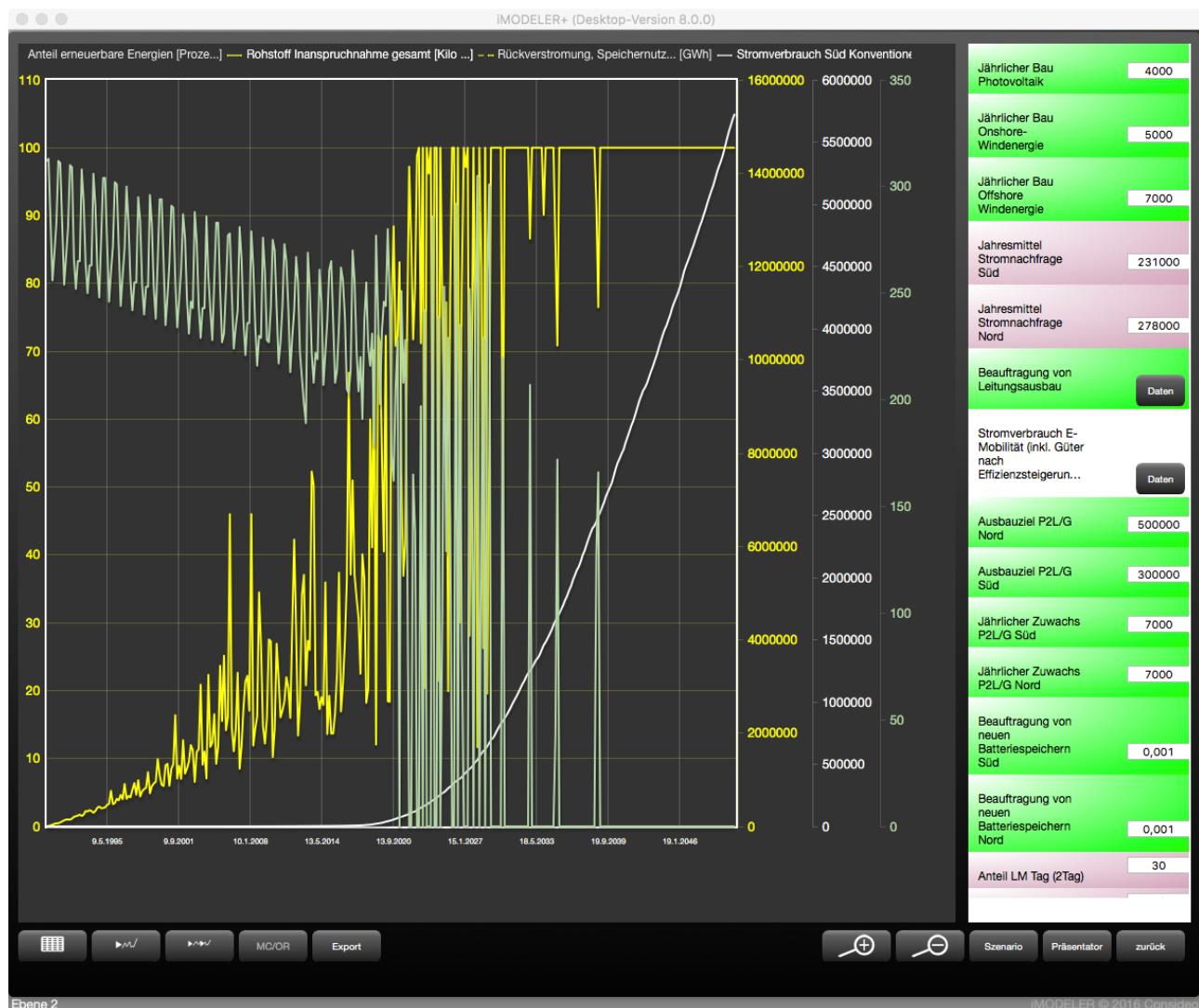
Mit dieser Analyse soll zum einen geschaut werden, welche Ausbaupfade das 100% erneuerbare Energien-Ziel erreichen, und zum anderen, welche Rohstoff-Inanspruchnahme damit jeweils verbunden ist. In den folgenden Szenarien ist weiterhin der Kohleausstieg vorgesehen und zudem aus einer Sektorkopplungsstudie eine lineare Elektrifizierung des Verkehrssektors bis 2050 mit dann jährlich 337 TWh zusätzlichem Bedarf an elektrischer Energie angenommen.

Durch Einbau von range()-Funktionen bei den Stellgrößen zum jährlichen Ausbau von Windkraft (Onshore, Offshore) und Photovoltaik sowie dem Ausbau der Kapazitäten für Power-To-Liquid/Gas können automatisch nacheinander Kombinationen simuliert werden, aus deren Ergebnis sich dann ablesen lässt, welche Kombinationen das Ziel der 100% erneuerbaren Energieversorgung erreichen und welche Rohstoff-Inanspruchnahme damit verbunden ist. Allerdings sollten dabei auch die Nicht-gedeckte Nachfrage im Zeitverlauf Null bleiben, und die nicht-genutzten Erneuerbaren Energien minimiert werden. Bei über 22 Tausend Zeitschritten und mehreren Tausend Kombinationsmöglichkeiten eine Herausforderung für die Hardware, so dass hier möglicherweise im Sinne von Soft-Operations Research händische Szenarien einfacher sind.

Bei der Simulation entsteht dann ein Schweif von Simulationskurven, welche einzeln ausgewählt das jeweilige Szenario zeigen, das hierzu geführt hat. Es kann dann geschaut werden, welche jährlichen Ausbauraten für die jeweiligen Technologien zu diesem Ziel geführt haben.

Interessant ist hier, dass die konstanten Ausbauraten nicht etwa zu einem späteren Erreichen des Ausbauziels von 100 Prozent führen, sondern jeweils nur zu einem Gleichgewicht zwischen Aus- und Rückbau erst durch massiven Ausbau nicht unter 100 Prozent!

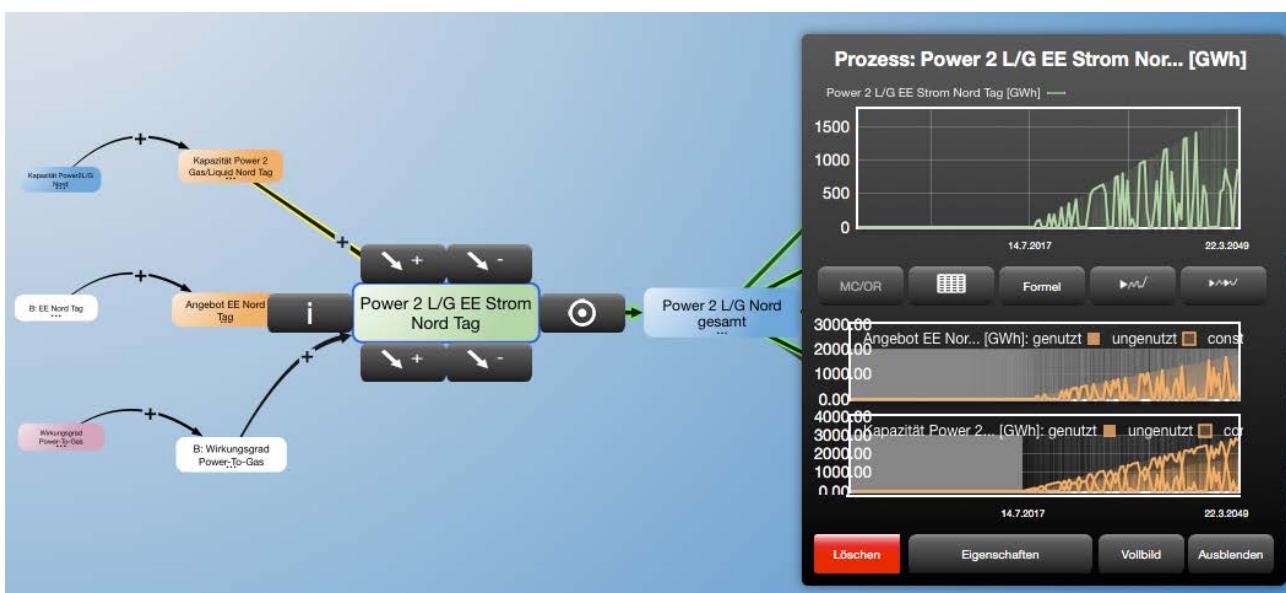
Abbildung 12: Parameter, die zum Erreichen des 100 Prozent Ziels führen



Ergebnis eines Szenarios zum Erreichen des Ausbauziels (inklusive Elektrifizierung des Verkehrssektors) im Vollbild mit der Möglichkeit, direkt am Rand die Parameter zu variieren. Durch Zoomen werden mehr Ausschläge der über 22000 Zeitschritte gezeigt.

Wie Abbildung 12 zeigt, können auch bei konstant hohem Ausbau und frühem Erreichen des 100 Prozent Ziels extreme Wetterlagen später immer noch mal zu einer Unterdeckung führen, weshalb der massive Ausbau von Power-to-Liquid/Gas zur Rückverstromung (alternativ oder ergänzend Batterien) erforderlich ist.

Abbildung 13: Notwendigkeit von Power-To-Liquid/Gas Kapazitäten

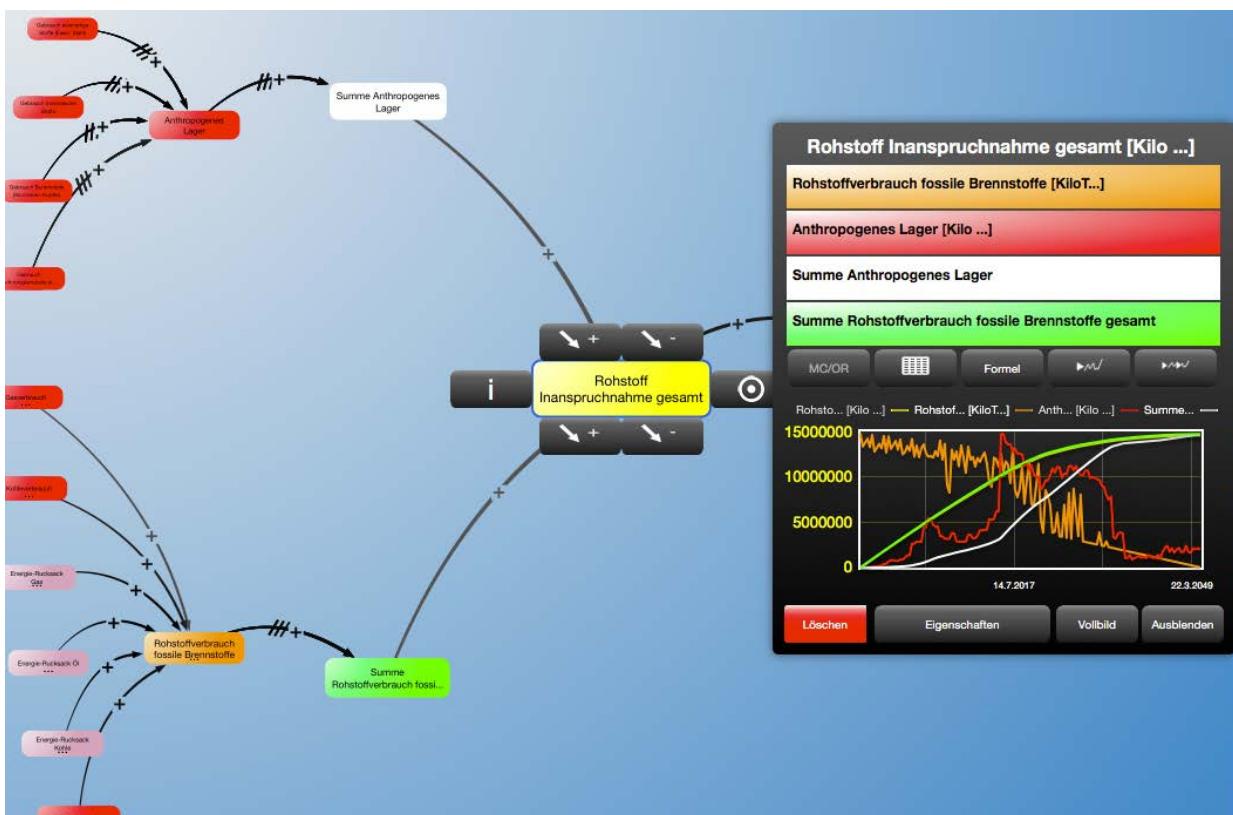


Bei einem linearen Ausbau von Power-To-Liquid Kapazitäten muss dieser massiv erfolgen, um das 100 Prozent Ziel zu erreichen. Die obere Kurve zeigt die zunehmende Nutzung (teilweise Haarlinien, die erst im Vollbild oder bei Zoom sichtbar werden). Die beiden unteren zeigen jeweils grau hinterlegt die Tage, an denen das Angebot an erneuerbaren Energien oder die Kapazität nicht ausreichen.

4.3 Analyse: Welche Rohstoff-Inanspruchnahme ist mit dem Ausbau verbunden (Szenario 3)

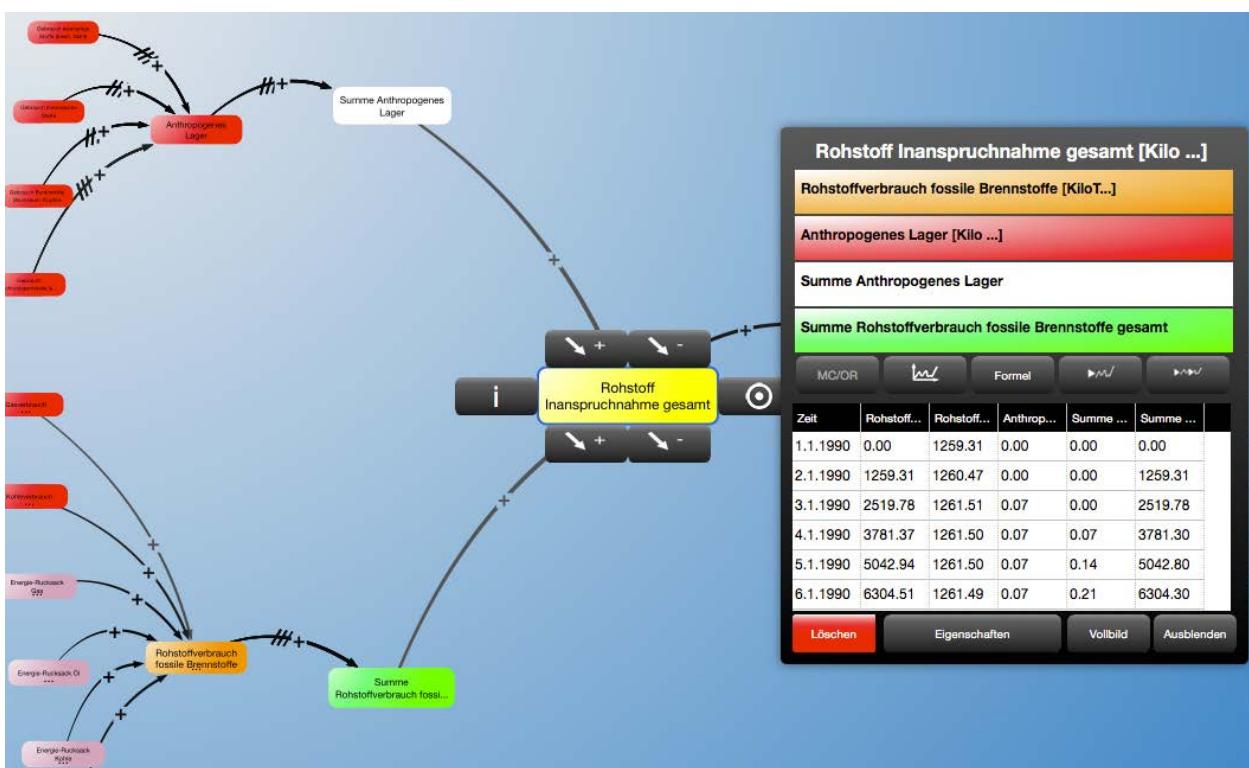
Derzeit ist der Zubau von allem linear bzw. konstant. Allerdings werden zeitverzögert alte Anlagen zurückgebaut, so dass der Zubau weiter hinten möglicherweise gesteigert bzw. nicht-linear erfolgen muss. Das wäre durch leichte Anpassungen der Formeln in einer weiteren Nutzung des Modells zu untersuchen. Auf der anderen Seite ist auch die Erkenntnis, dass langfristig ein Gleichgewicht aus kontinuierlichem Austausch alter Anlagen mit einem Recycling der Rohstoffe notwendig wird, eine interessante Erkenntnis, wenngleich selbst die minimale Gesamt Rohstoff-Inanspruchnahme bei Betrachtung nur des Ausbaus der drei Energieträger immer noch einen Abbau von Rohstoffen und einen Verbrauch von fossilen Energieträgern bedeutet, wie die folgenden Abbilden zeigen.

Abbildung 14: Rohstoff-Inanspruchnahme bei Erreichen des 100 Prozent Ausbauziels



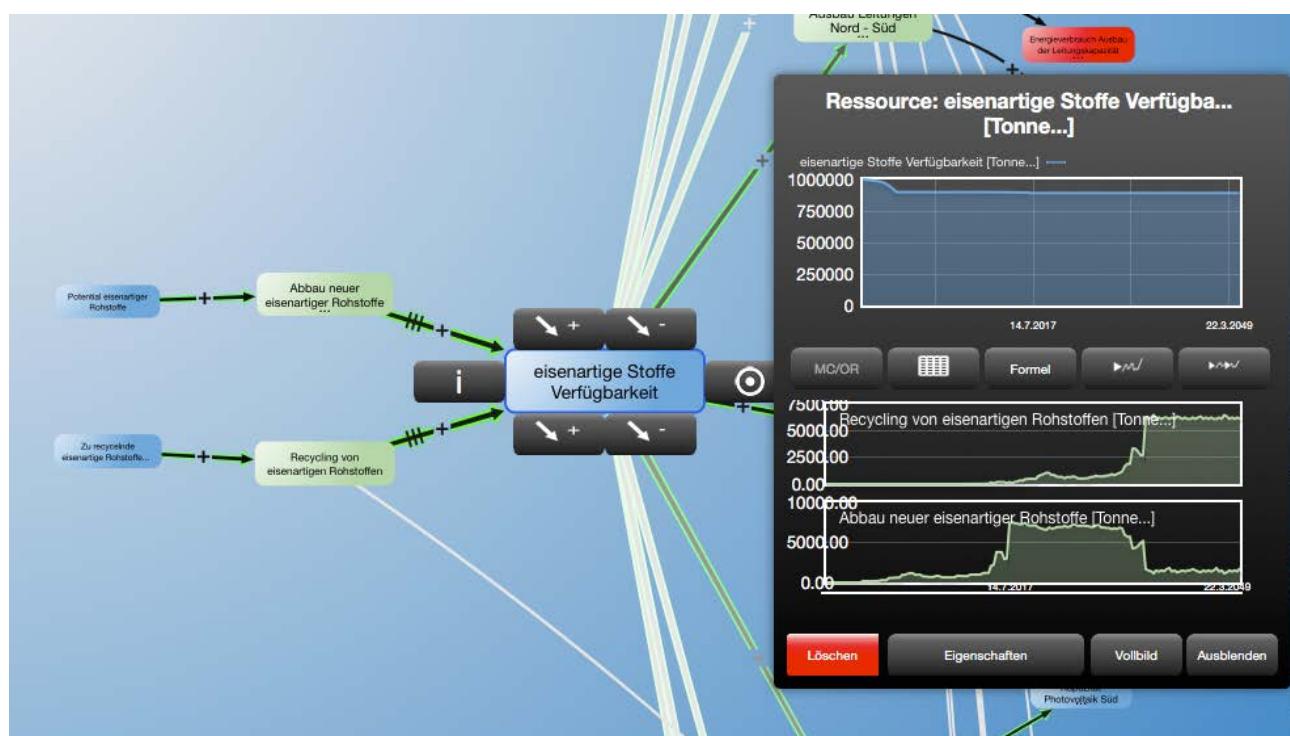
Bei massivem Ausbau flacht sich die Gesamt Rohstoff-Inanspruchnahme durch das Einsparen fossiler Brennstoffe und das Recycling von Rohstoffen durch Repowering deutlich ab.

Abbildung 15: Tabellarische Ansicht Rohstoff-Inanspruchnahme



Ein maximaler Ausbau der erneuerbaren Energien führt zu einer steten Abnahme des Zuwachses des anthropogenen Lagers, und zu fast einer Stagnation des Verbrauchs fossiler Energieträger, wie die Tabelle zeigt

Abbildung 16: Wirkung von Recycling



Rückbau der Anlagen sinkt die Notwendigkeit für den Abbau neuer Rohstoffe - allerdings nicht auf Null, da derzeit noch kein hundertprozentiges Recycling möglich ist. Die Abbildung zeigt im oberen Diagramm den extrem hoch gesetzten Gesamtbestand an eisenartigen Stoffen und darunter den zuerst massiven Abbau dieser Rohstoffe gefolgt von einem entsprechenden Recycling.

Um das anthropogene Lager zur Stagnation zu bringen bzw. keinen Neu-Abbau von Rohstoffen mehr zu benötigen, muss zum einen die Recycling-Quote erhöht werden und zum anderen der Bedarf an Rohstoffen kontinuierlich gesenkt werden - was irgendwann in der Zukunft nicht weiter möglich sein wird, weshalb die Recycling-Quote der wichtigere Hebel ist.

4.4 Analyse: Szenarien zu den Kapazitäten von Power-To-Liquid/Gas

Vorab der Hinweis, dass alternativ zur Rückverstromung die Mengen von Power-To-Liquid/Gas auch hätten von dem Verbrauch an fossilen Rohstoffen abgezogen werden können, so dass diese sogar negative Werte hätten einnehmen können, was dann einem Einsparen fossiler Brennstoffe bei der Heizenergie oder im Verkehr oder gar in der Kunststoffproduktion gleichgekommen wäre.

Auch die Nachrangigkeit von Power-To-Gas zu Power-To-Heat und Power-To-Vehicle ist in diesem Modell nicht notwendigerweise zu unterscheiden, da jeder Kubikmeter Erneuerbare-Energien-Gas, der erzeugt wird, anderswo gespart wird. In anderen Worten: dass Modell misst nicht die kWh EE-Gas, sondern die Kubikmeter bzw. die TOE.

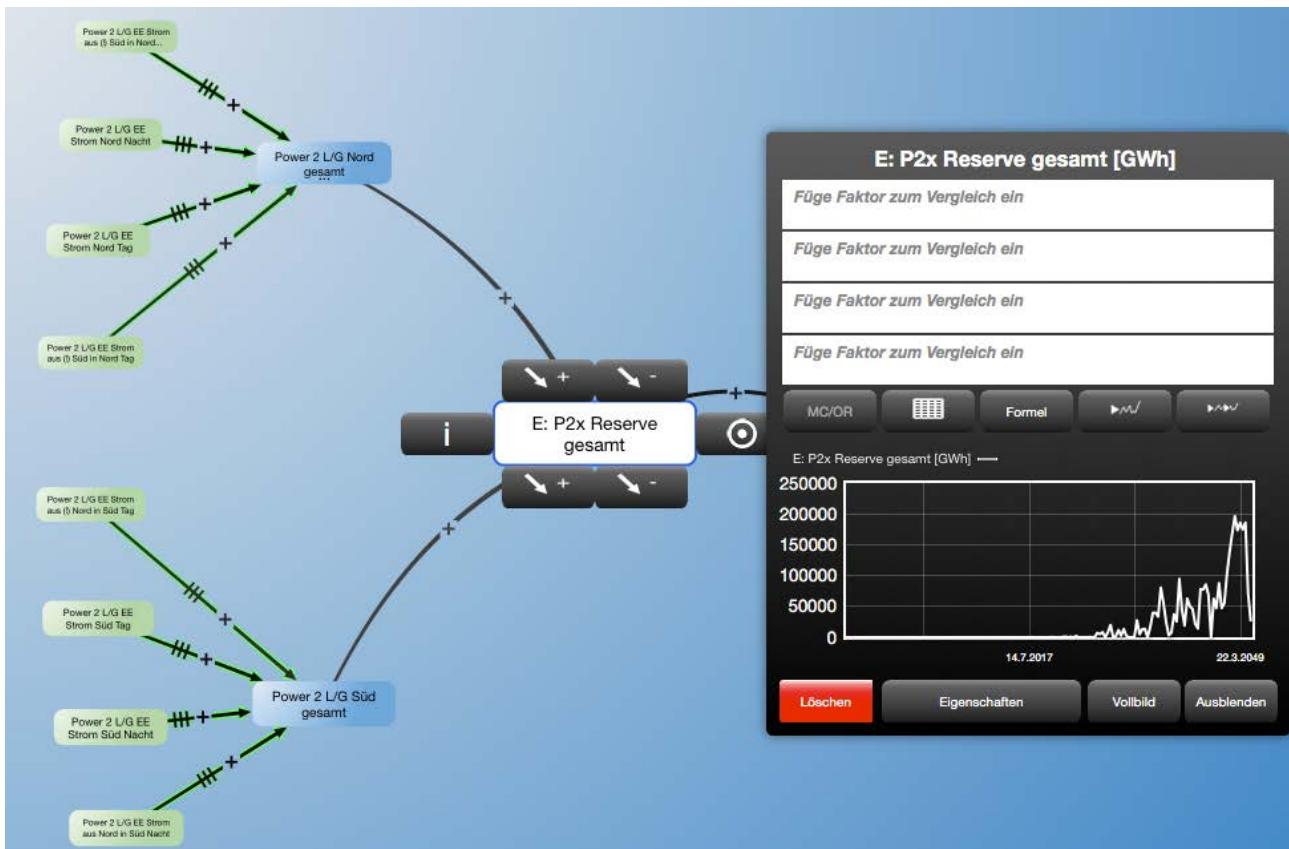
Schließlich der Hinweis, dass dieses Modell nicht einen internationalen Markt mit Import und Export von Energien, sondern eine theoretische Vollversorgung innerhalb Deutschlands betrachtet. Ein Import von P2G/L würde letztlich bedeuten, dass diese Menge erneuerbarer Energien dem Ausland weniger zur Verfügung steht, so dass aus theoretischer Sicht ein Import nur aus Ländern betrachtet werden könnte, welche bereits 100 Prozent erneuerbare Energien erreicht haben.

Der Ausbau von Power-To-Gas ist in diesem Modell ohne Rückbau älterer Anlagen abgebildet. Das bedeutet, dass anders als bei den übrigen Technologien sich bei konstantem Ausbau nicht automatisch ein Gleichgewicht einstellt, sondern ein Mittel zwischen rechtzeitig startendem und dann aber auch gedeckelten Ausbau erfolgen muss. Daher wurde in das Modell ein Faktor Ausbauziel eingebaut,

welcher als Stopp-Kriterium für den Prozess des Ausbaus dient. In einer Erweiterung des Modell könnte zudem ein Startpunkt variabel angelegt werden, was insbesondere dann sinnvoll ist, wenn genauere Daten zu den Baukapazitäten von Power-To-Gas Anlagen vorliegen.

Da Power-To-Gas/Liquid wie eben schon erwähnt auch für Verkehr, Wärmeenergie und Prozesse in Zukunft entscheidend sein wird, hat das Modell bereits einen Faktor eingebaut, der den Gesamtüberschuss in einem Bestand abbildet:

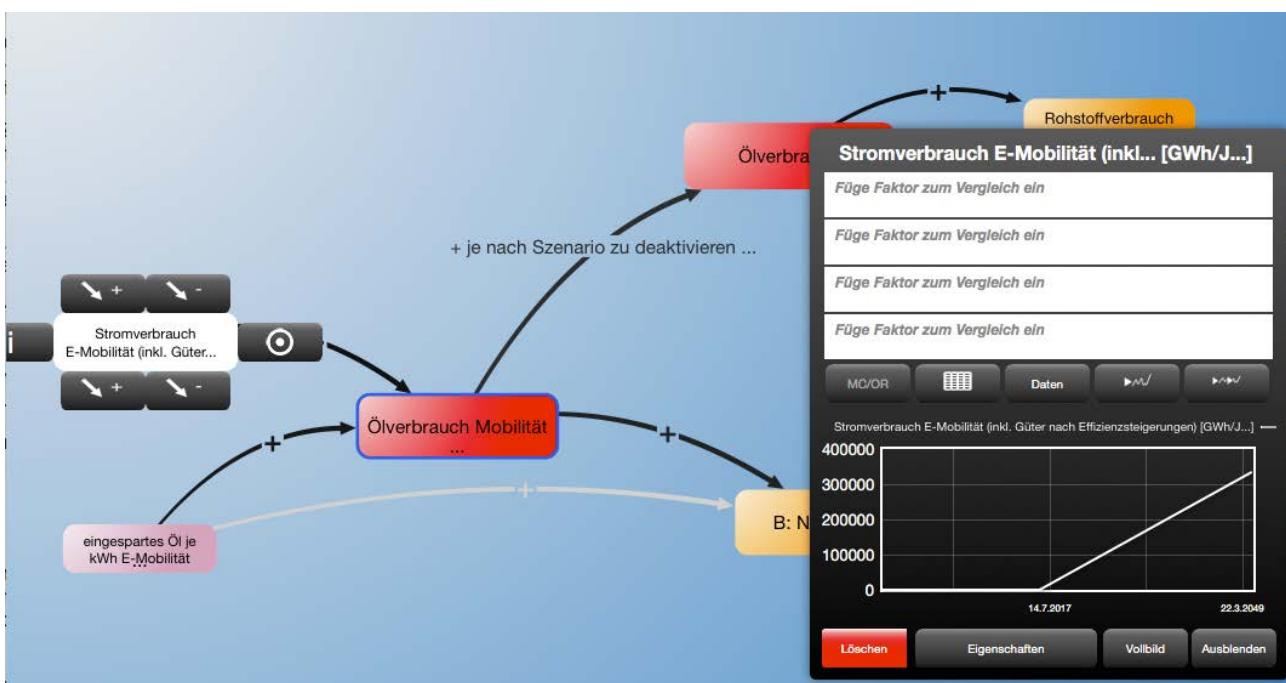
Abbildung 17: Notwendige Nicht-Auslastung von Power-To-Liquid Kapazitäten



Der Gesamtüberschuss an Power 2 L/G als Bestandsfaktor für eine Erweiterung des Modells

Wichtig bei einer Erweiterung, dann auch die Ressourcen-Inanspruchnahme durch den zusätzlichen Bereich (Wärme, Prozesse, etc.) mit in Betracht zu ziehen, wie in dem jetzigen Modell mit der Mobilität erfolgt:

Abbildung 18: Einsparung von Erdöl durch E-Mobilität



Wenn mehr Erneuerbare Energien für die Mobilität installiert werden, müssen auch die hierdurch eingesparten fossilen Rohstoffe berücksichtigt werden, wie hier der eingesparte Ölverbrauch

4.5 Analyse: Bewertung der Kosten der Energiewende

Wie in Kapitel 4.8 beschrieben erlaubt das Modell Annahmen hinsichtlich der Investitionen in Erneuerbare Energien und ihrem volkswirtschaftlichen Nutzen verglichen mit dem Einsparen von importierten fossilen Brennstoffen in Szenarien zu reflektieren.

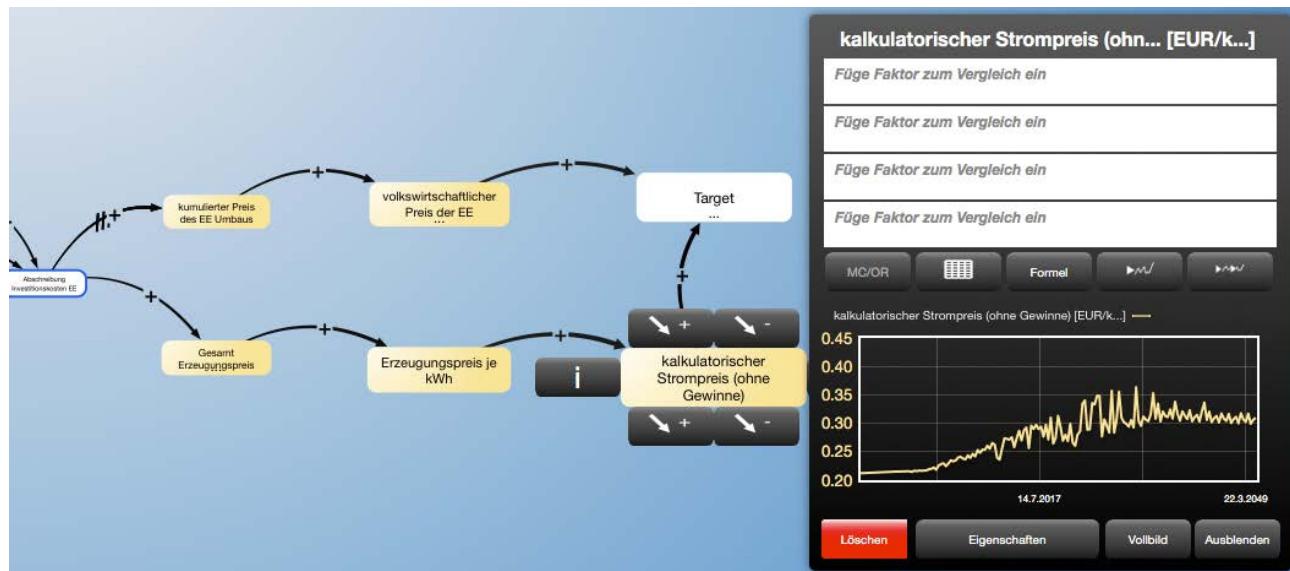
Folgende Interpretationen beziehen sich auf ein Szenario, bei dem auch der Verkehr bis 2050 elektrifiziert (337 TWh/a, siehe Kapitel 3.3) wird. Die Stromerzeugung ist bis dahin durch Offshore, Onshore, PV, Batterien und massivem Ausbau von Power To L/G aus dem Inland zu 100 Prozent erneuerbar.

Wenngleich der reine Strompreis offenbar kurzfristig stark (auch wegen der sofortigen Bewertung der Investitionen und nicht etwa ihrer Abschreibung) und mittelfristig immer noch höher als heute sein wird (Abb. 19), werden doch das Autofahren und entsprechend auch Teile des ÖPVs und des Güterverkehrs hierüber zumindest theoretisch günstiger. Das Modell betrachtet die Anteile der Kosten vor Steuern und Abgaben - eingespart werden also nur die Rohstoffkosten, nicht aber die Abgaben. Für eine Prognose der praktischen Preise müssten dennoch konkrete Markteffekte und vermutlich auch niedrigere Abgaben auf Strompreise gegenfinanziert durch höhere Steuereinnahmen aus höherer Wertschöpfung im Inland betrachtet werden.

Beispiel bezogen auf die Mobilität: ausgehend vom PKW-Verkehr betrachtet das Modell vereinfachend einen Verbrauch von 6 Litern auf 100km zu 50 Cent pro Liter und einem Äquivalent von 18kWh/100km. Darüber kann der Wert der gesparten Rohstoffkosten für den Gesamtbedarf an elektrischer Energie für die Mobilität hochgerechnet werden. Auf der anderen Seite kostet der Gesamtbedarf elektrischer Energie für die Mobilität nicht den Strompreis, sondern anteilig die Investitionskosten. Erst durch zusätzliche Abgaben die zum tatsächlichen Strompreis führen, wird beispielsweise die elektrifizierte Mobilität teuer. Aber da der Umbau hin zu erneuerbaren Energien eine höhere Wertschöpfung im Inland mit entsprechend der Möglichkeit von Steuereinnahmen bedeutet, könnten die Abgaben auf elektrische Energie gesenkt werden. Alternativ würden in diesem

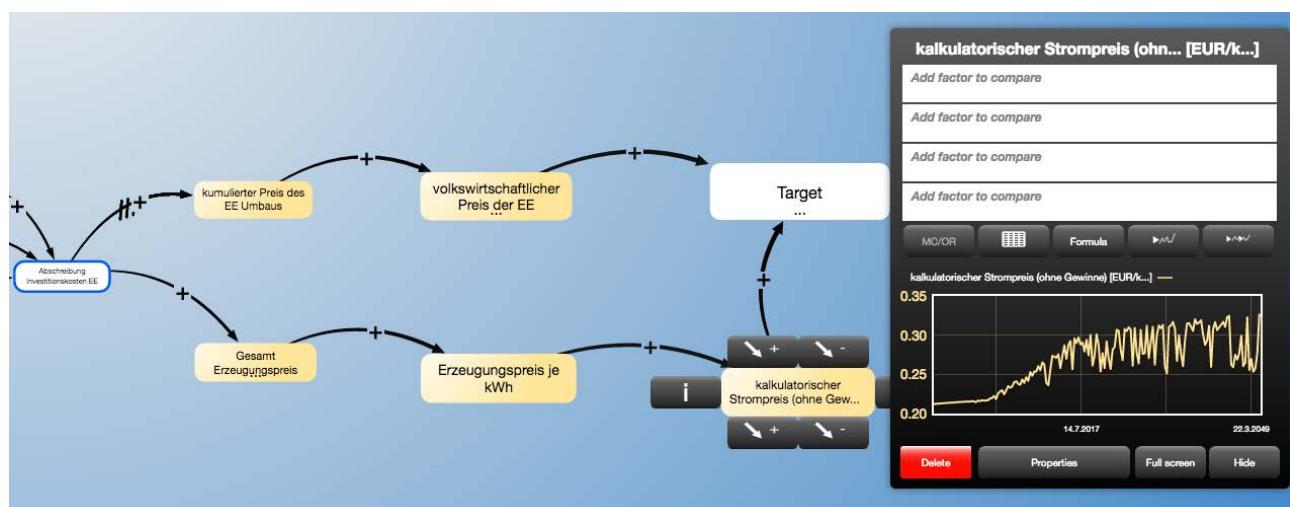
Beispiel 6 Liter auf 100 km beispielsweise 9 Euro kosten können, und 18kWh a 34 Cent/kWh ca. 6 Euro.

Abbildung 19: Entwicklung des kalkulatorischen Strompreises bei Erreichen des Ausbauziels



Tatsächlich zeigt ein Ausbau der Erneuerbaren Energien nur für den Bedarf der Stromerzeugung und nicht auch für den Verkehrssektor, dass sich die Preise auf dem heutigen Niveau einpendeln würden. Auch sollte gesehen werden, dass es unwahrscheinlich ist, dass die Preise für fossile Energieträger nicht auch im gleichen oder sogar höheren Maße, wie die Strompreise steigen werden. Ähnlich sieht es bei Fortführung der aktuellen Politik durch das EEG 2017 bei moderatem Ausbau aus:

Abbildung 20: Entwicklung des kalkulatorischen Strompreises bei jetzigem Pfad



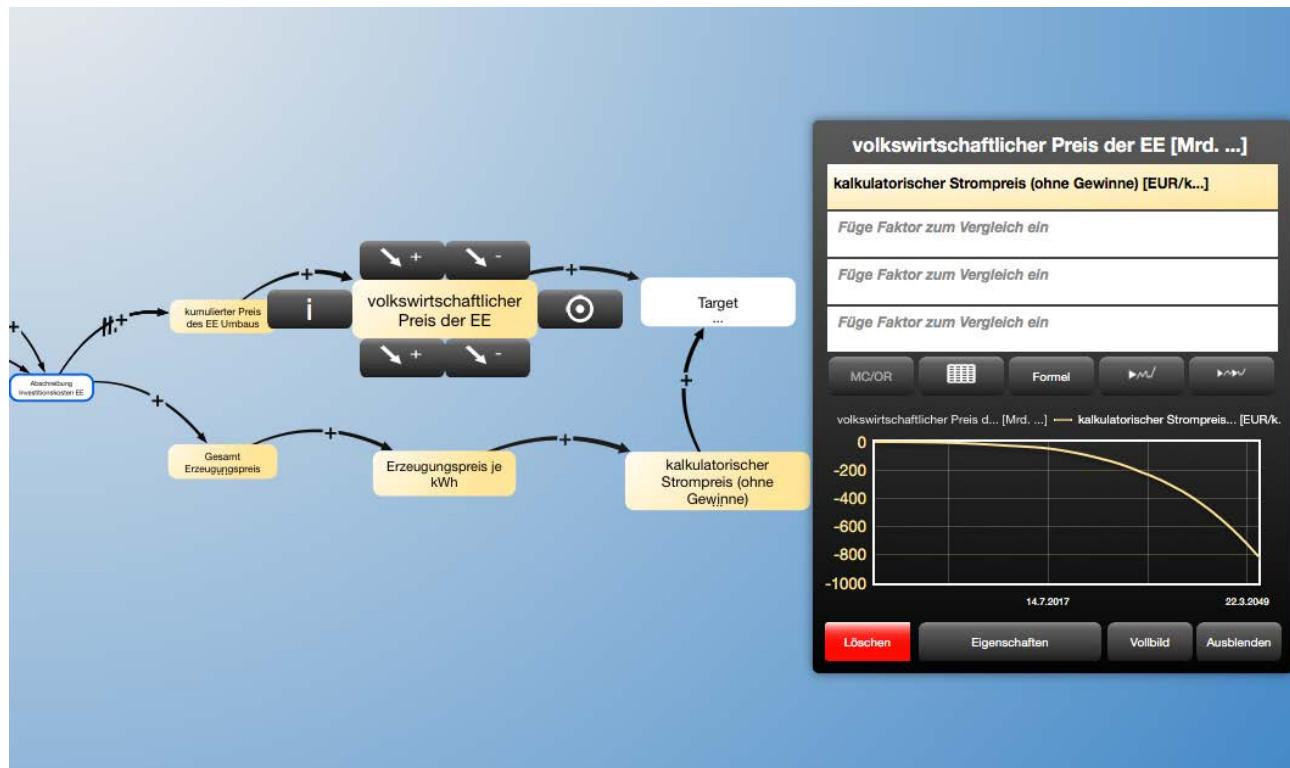
Kalkulatorische Entwicklung der Stromkosten bei Ausbau der Erneuerbaren Energien gemäß aktueller politischer Planung

Diese offensichtliche Erhöhung der Stromkosten sollte also zusammen mit der Senkung der Kosten im Verkehrsbereich, der zu erwartenden Steigerung der Preise fossiler Brennstoffe und der hier nicht weiter betrachteten Effizienzsteigerungen zu einer Nettoentlastung für die Verbraucher führen. Einzelne Industrien mit weniger Potential zur Effizienzsteigerung werden mit der Energiewende mit

möglicherweise höhere Preissteigerungen zu rechnen haben. Hier könnten aber für die Zeit, in der die internationale Konkurrenz durch weniger erneuerbare Energien im Ausland möglicherweise bevorteilt ist, Subventionen helfen, die wie folgt finanziert werden könnten.

Denn entscheidend scheint der langfristige volkswirtschaftliche Nutzen, welcher eine Subvention der Energiewende als absolut sinnvolle Investition darstellt. Wie in Abbildung 21 erkennbar, ist der volkswirtschaftliche Preis der Energiewende offenbar im Gegenteil ein großer Nutzen:

Abbildung 21: Die Gesamtkosten des Ausbaus aus volkswirtschaftlicher Sicht

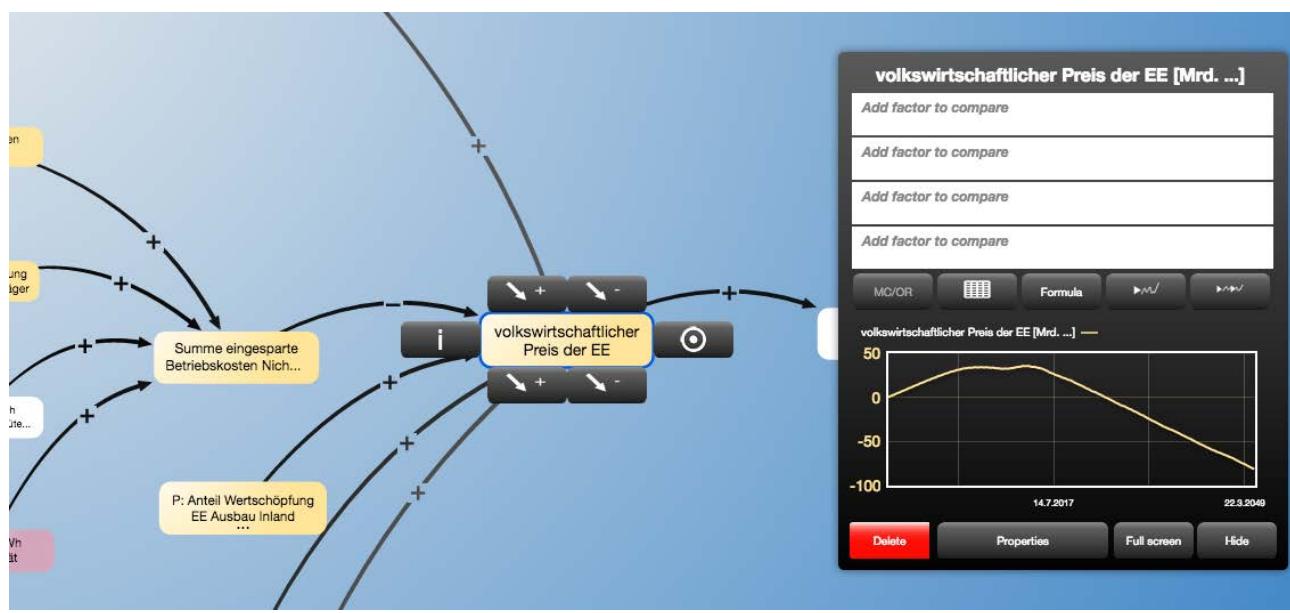


Volkswirtschaftlicher Preis der Energiewende bei massivem Ausbau (erst gezoomt werden die anfänglichen hohen Kosten sichtbar, die aber in keinem Vergleich zu dem langfristigen Nutzen stehen)

Trotz der zweifelsohne hohen Investitionen, die durch ein regelmäßiges Repowering auch langfristig auf relativ hohem Niveau bleiben werden, scheinen die Einsparungen auf Seite der fossilen Brennstoffe doch zu überwiegen. Je nachdem, welche Annahmen hinsichtlich der Wertschöpfung des Ausbaus der Erneuerbaren Energien und hinsichtlich der Preisentwicklung der fossilen Brennstoffe gemacht werden, ist der akkumulierte Nutzen so oder so sehr hoch. Ein Großteil der Gelder, die vormals für fossile Brennstoffe ausgegeben wurde, wird nun zum großen Teil der in Teilen sogar recht arbeitsintensiven Wirtschaft im Inland zu Gute kommen. Das bedeutet mehr Arbeitsplätze, mehr Steuereinnahmen, und letztlich auch eine höhere Resilienz, wenn ein anthropogenes Lager zu recycelnder Rohstoffe aufgebaut wird.

Ein halbherziger Ausbau der erneuerbaren Energien zeigt folglich einen deutlich geringeren volkswirtschaftlichen Nutzen, wie Abbildung 22 zeigt:

Abbildung 22: Volkswirtschaftliche Bewertung des jetzigen Ausbaupfades



Volkswirtschaftlicher Preis der Energiewende bei moderatem Ausbau (gemäß EEG 2016)

4.6 Mögliche, weitere Fragestellungen

Es gibt mehrere Szenarien zum Ausbau von Power-To-Gas zur Verwendung auch in anderen Sektoren, oder z.B. auch eines mit weniger ungleichem Ausbau der Kapazitäten in Nord und Süd und dafür größeren Leitungskapazitäten. Ebenso sind Varianten zwischen dem Ausbau der Offshore- und der Onshore-Windkraft denkbar, je nach Verfügbarkeit von Flächen und natürlich der Kosten. In weiteren Szenarien könnten dabei auch die Ressourcen-Verbräuche von diesen Varianten mit genaueren Daten untersucht werden.

Mit genaueren Daten könnten die benötigten Bau-Ressourcen oder im Falle knapper Flächen auch die Zeitpunkte für einen vorzeitigen Austausch von alten Anlagen untersucht werden. Auch die erwarteten technologischen Entwicklungen der Anlagen sind in diesem ersten Modell noch nicht berücksichtigt, aber dadurch, dass die Faktoren hierfür bereits angelegt sind, möglich.

5 Fazit und Ausblick

Das Modell zeigt bereits die benötigten Ausbaugeschwindigkeiten für erneuerbare Energien und dass das heutige Tempo aufgrund des Rückbaus alter Anlagen zu einem Gleichgewicht fernab der gesetzten Ausbauziele führt. Szenarien erlauben zudem die Größenordnungen für die benötigten Speicherkapazitäten für Power-To-Gas und ähnliches sowie die Leitungskapazitäten zwischen Nord und Süd abzuschätzen. Hier ist mehr als ein Szenario gangbar und auch das Verhältnis zwischen Ausbau On- und Offshore sowie Photovoltaik kann abhängig von noch einzupflegenden Restriktionen bei Fläche und Baukapazitäten variiert werden.

Wenn gleich die Anfangsbestände der Rohstoffe ausreichend hoch angesetzt sind und eine Entnahme durch den Rest der Welt, welche zu einer Verknappung und Preisentwicklung führen könnte, noch nicht berücksichtigt ist, zeigt dieses Modell bereits die insgesamt benötigte Rohstoffmenge und die dadurch einzusparende Menge fossiler Energie-Rohstoffe. Die Größenordnungen zeigen, dass der massive Ausbau und das frühe annähernde Gleichgewicht durch die Rohstoffe im anthropogenen Lager und deren Recycling in Summe der längeren Nutzung von fossilen Rohstoffen auch ohne eine Bewertung etwa von Klimawirkungen vorzuziehen ist.

Eine erste wirtschaftliche Betrachtung zeigt bereits auf, dass die Wertschöpfung im Inland durch die Investition in Erneuerbare Energien verglichen mit den Kosten für den Import fossiler Brennstoffe zu einem enormen volkswirtschaftlichen Nutzen führen kann. Hier vereinfacht das Modell noch sehr und betrachtet nicht die realen Marktmechanismen eines europäischen Energiemarktes, sondern rein theoretische Größen auf Deutschland beschränkt.

Während der Aufbau und damit die Erweiterung eines solchen Prozess-Modells grundsätzlich einfach sind, ist die Datenbeschaffung an einigen Stellen sehr aufwändig. Die Verwendung von Prozess-Faktoren hat die Modellierung deutlich vereinfacht. Die ersten Analysen zeigen, dass mit dem Modell recht einfach Annahmen erprobt werden können.

Die Grenzen der Modellierung liegen wie weiter oben begründet in der Vereinfachung sowohl der Detailtiefe als auch der Zeiteinheiten. Hier hängt es von der Fragestellung ab, ob nicht ein detaillierteres Modell für einen kürzeren Zeitraum noch ganz andere Fragen zu beantworten helfen könnte.

Die Idee dieser kleinen Modelle wäre es, sie zu veröffentlichen und zur Verfügung zu stellen, so dass hierüber auch andere dynamische Analysen in verglichen mit anderen Ansätzen einfacher Weise in quantitativen Modellen durch Simulation möglich werden. Auch eine Verknüpfung mit anderen Modellen ist denkbar, etwa zur Versorgung des Heizsektors mit Erneuerbare Energien Gas aus Power to Gas, oder von Power To Liquid für Treibstoff für Flugzeuge.

6 Quellen

Die Vielzahl der Quellen findet sich im Modell direkt an den jeweiligen Faktoren bzw. auch im Modell-Report. Hier vor allem die nur für den Bericht genutzten Quellen:

Goldratt, E.M.: "Critical Chain", 1997

Neumann, K.: "Qualitative und quantitative Ursache-Wirkungsmodellierung: Komplexitätsmanagement mit dem iMODELER (Version 7.0) und der systemischen KNOW-WHY-Methode", 2015

Sterman , J.D.: "Business Dynamics", 2010

Wuppertal Institut: "KRESSE: Kritische mineralische Ressourcen und Stoffströme bei der Transformation des deutschen Energieversorgungssystems (Förderkennzeichen 0325324)", 2014

2050: 100% - Energieziel 2050: 100% Strom aus erneuerbaren Energiequellen
(<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/energieziel-2050>)

<http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Energiedaten-und-analysen/energieprognosen.html>