



Ferroni vs. Novotny

Glauben oder Wissen

Streit um
energietechnische
Daten und Fakten

Dipl. Ing. ETH Ferruccio Ferroni vs. El.-Ing. HTL Radomir Novotny

Teil 1: Einführung ➔

Teil 2: Falsche EROEI-Berechnungsmethode der Solarlobby ➔

Teil 3: Lastfolgefähigkeit der Kernkraftwerke - warum muss man 25% der PV-Sommer-Stromproduktion speichern? ➔

Teil 4: Keine erkennbare Wirkungsgradverbesserung kommerzieller PV-Module

Einführung

R. Novotny, Chefredaktor des bulletin.ch (herausgegeben von Electrosuisse und dem Verband der Schweizerischen Elektrizitätsunternehmen VSE) hat in seinem Artikel "Energiebilanz von Solarstrom – Von Facts zu Fake News" behauptet: "Bei den technischen Aspekten wie Wirkungsgrad und Primärenergieverbrauch bei der Herstellung sind die Fortschritte zwar nicht so ausgeprägt, aber auch hier trifft man auf Optimierungen." Hierzu präsentiert er eine Graphik in englischer Sprache mit folgender Legende: "2 Entwicklung des Modulwirkungsgrades von monokristallinen Siliziumzellen im Zeitraum von 2000 bis 2012." Im seinem Artikel gibt er an, sich auf die marktbeherrschende "Silizium-PV" zu konzentrieren wobei er nicht genau zwischen Zellen und Modulen differenziert. Letztere weisen als Verbund von Zellen stets einen tieferen Wirkungsgrad auf (siehe u.a. Dongaonkar und Alam, 2014).

Die präsentierte Graphik stammt gemäss angegebener Referenz aus einem Bericht der Internationalen Energieagentur (IEA) von 2015, welcher von einer Gruppe Autoren um Rolf Frischknecht und seinen damaligen Mitarbeitern verfasst wurde. Der erwähnte Hauptautor, welcher im bulletin.ch-Artikel gleich mehrfach zu Wort kommen darf und auch Co-Autor der Replik von Marco Raugei et al. (2017) war, arbeitet mit seiner privaten Beratungsfirma treeze Ltd. (Uster ZH) im mutmasslich lukrativen Bereich der Lebenszyklusanalysen und Ökobilanzen, wie den Angaben auf der Homepage seiner Firma (www.treeze.ch) entnommen werden kann. Die genannte Graphik zeigt, dass der Wirkungsgrad von Modulen aus monokristallinen Silizium-Zellen (Mono-Si Cells) zwischen 2000 und 2012 angeblich von etwa 11% auf über 15% angestiegen sei. Die Graphik zeigt zudem eine hypothetische lineare Fortsetzung bis 2050 zu einem Wert von über 27%.

Im dazugehörigen Bericht der IEA, welche die Graphik auf S.12 veröffentlichte und auf S.9 von 16.5% Wirkungsgrad für Mono-Si Cells (nicht für Module) spricht, findet sich dazu jedoch keine exakte Quellenangabe zu den genannten Werten von 2000 bis 2012, geschweige denn zur methodischen Berechnung der linearen Fortsetzung, die lapidar als "linear extrapolation" bezeichnet wird. Es werden zwei Angaben geliefert. Die referenzierte Schrift Photon International aus dem Jahr 2013 ist aufgrund fehlender Veröffentlichungsangaben nicht auffindbar und kann folglich nicht überprüft werden. Die zweite Referenz, die Publikation von Mariska de Wild Scholten (2013), die genau wie R. Frischknecht als Beraterin arbeitet, Co-Autorin der Replik von Marco Raugei et al. (2017) war und ihre eigene Firma Smart Green Scans führt (www.smartgreenscans.nl), nennt einen Wirkungsgrad von 14.8% für Mono-Si Modules (nicht für Zellen). Laut der Autorin stammen die Daten von einem Hersteller aus dem Jahr 2011 sowie von weiteren Beratungsfirmen und aus einem anderen Artikel von 2011, den sie selbst editiert hat.

Sämtliche von R. Novotny referenzierten Angaben zum Wirkungsgrad und die daraus abgeleiteten Behauptungen beruhen folglich ausschliesslich auf den nicht verifizierten und nicht validierten Angaben eines einzelnen Herstellers. Die federführenden Autoren, auf deren Publikationen sich der Artikel im bulletin.ch direkt oder indirekt bezieht und die teils direkt zu Wort kommen, sind alle private Interessenvertreter.

In unserer Duplik (Ferroni et al., 2017) hatten wir uns – unter Verweis auf den ursprünglichen Artikel (Ferroni & Hopkirk, 2016, peer-reviewed article) – in dreierlei Hinsicht zum Wirkungsgrad von Solarzellen und Modulen in der Photovoltaik geäussert.

1. Der Unterschied zwischen Labor und Realität: "Wirkungsgrad" ist nicht gleich "Wirkungsgrad"

Erstens gingen wir der Aussage von Raugei et al. in deren Replik (2017, advisory-reviewed article) wonach, der Wirkungsgrad von kommerziellen Siliziummodulen zwischen 2005 und 2015 von 12% auf 17% angestiegen sei nach. Die Überprüfung der hierzu genannten Referenz, des Photovoltaics Reports vom 20.10.2016 des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme (ISE), zeigte, dass es sich dabei um eine Behauptung ohne Quellenangaben handelt.

Hingegen wurde auf S.25 des gleichen Berichts graphisch dargestellt, dass der Wirkungsgrad von im Forschungslabor entwickelten Mono-Si Cells im Zeitraum von 1993 bis 2015 lediglich von ungefähr 23% auf rund 26% angestiegen sei. Dabei handelt es sich um bei optimalen Bedingungen entwickelte und getestete Laborzellen und nicht um in kommerziellen Modulen eingesetzte Zellen, deren Wirkungsgrad stets um einiges tiefer liegt.

Im aktuellen Nachfolgebericht vom 27.8.2018 erwähnt das ISE die Veränderung des Wirkungsgrads kommerziell verfügbarer Module nicht mehr, präsentiert jedoch auf S.27 die bis zu 2017 fortgesetzte Graphik für Mono-Si Cells im Labor und gibt dazu einen Wert von 26.7% an. Die Bildlegende im ISE-Bericht ist irreführend, weil sie die Quellen der aktuellsten Zahlen (2018, recte 2017) nicht angibt. Denn gemäss Referenz auf S.4 liegt den präsentierten Laborrekordwerten (2017) eine Publikation von Green et al. (2017) zugrunde, in der die durch unabhängige Testzentren verifizierten Resultate in Tabellenform ausgewiesen werden.

Raugei et al. (2017) unterschlagen den bedeutsamen Unterschied zwischen Laborzellen und kommerziellen Zellen, welcher auch in den beiden Publikationen des ISE (2016 und

2018) nicht klar zum Ausdruck kommt. Unaufmerksame und wenig kundige Leser werden so in die Irre geführt.

Abbildung 1: Entwicklung 1976 bis 2018 des Wirkungsgrads unter den jeweils besten Laborzellen

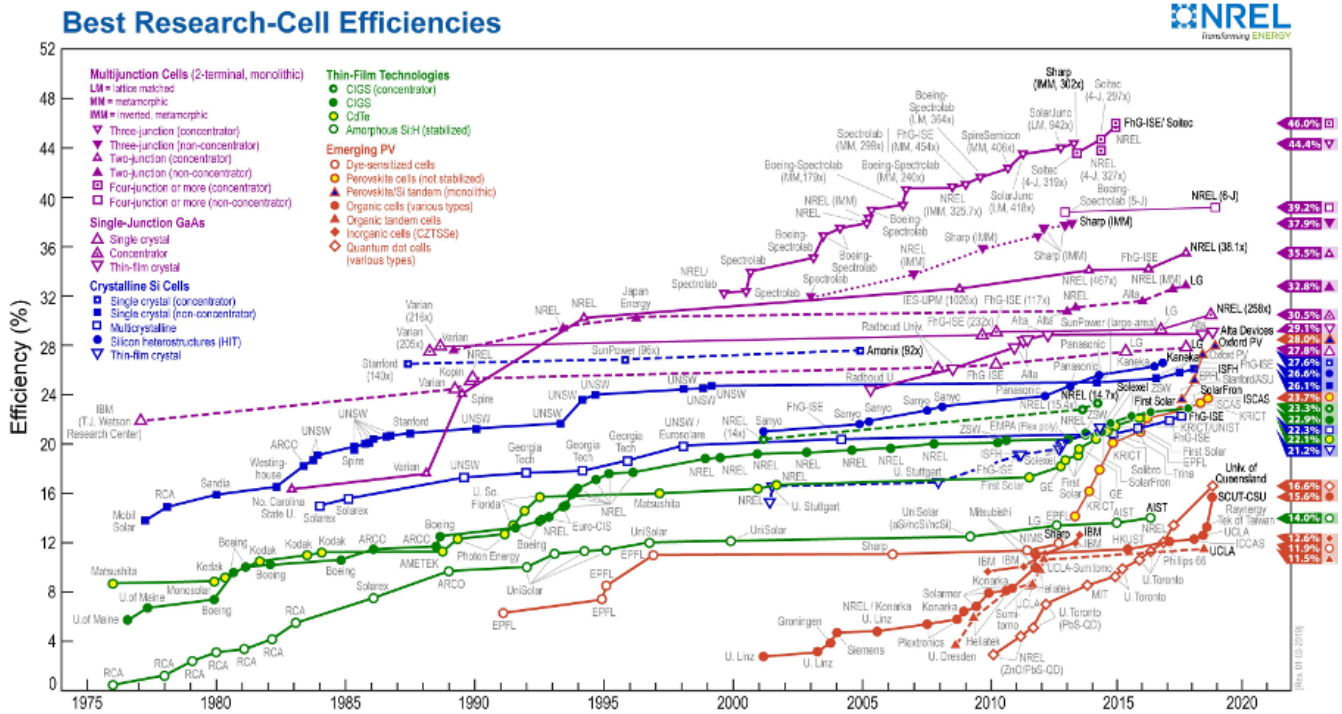


Abbildung 1 zeigt als Vergleich, die aktuelle (Stand 3.1.2019) Übersichtsgraphik des staatlich finanzierten National Renewable Energy Laboratory (NREL) in den USA, mit der zeitlichen Entwicklung der Best Research-Cell Efficiencies für Mono-Si Cells seit 1976. Diese nennt einen Wirkungsgrad von 26.1% als momentan besten Wert, welcher in einer referenzierten Publikation (Holleman et al., 2018) gemeldet worden war. Für Mono-Si Cells im Labor dürfen wir von einem aktuell verifizierten Höchstwert von rund 26% ausgehen.

Es ist interessant anzumerken, dass das NREL für Labormodule, welche auf der gleichen Technologie (interdigitated back contacted [IBC] solar cells) beruhen wie jene Mono-Si Rekordlaborzellen, einen Wirkungsgrad von 22.8% in seiner aktuellen (25.1.2019) Übersichtsgraphik der Champion Module Efficiencies (Hersteller SunPower) angibt. Dies entspräche 87% des Zell-Wirkungsgrades.

Zu den Wirkungsgraden kommerziell in Modulen eingesetzter Mono-Si Cells gibt es dagegen keine überprüfbar resp. von unabhängiger Seite verifizierten Daten. Solche fehlen auch für kommerzielle Module. Es existieren lediglich Herstellerangaben, die allerdings mit grosser Vorsicht zu betrachten sind, denn Hersteller sind generell daran interessiert, als Verkaufsargument möglichst hohe Wirkungsgrade anzugeben, ohne diese zu garantieren. Den nachvollziehbaren Kundenwunsch nach einer solchen Garantie kann er unter Verweis auf nicht optimale Bedingungen (Einbau, Ausrichtung, Umwelt,...) stets zurückweisen.

Es ist uns nicht bekannt, dass wissenschaftlich publizierte Feldstudien existieren, in denen tatsächliche Wirkungsgrade von kommerziell eingesetzten Zellen oder Modulen von unabhängiger Seite validiert wurden. Entsprechende Referenzen liefern die von Novotny zitierten sowie teils kontaktierten Personen (Frischknecht, Baumgartner,...), Firmen (treeze Ltd., Smart Green Scans,...) oder Interessengruppen (IEA, ISE,...) nicht. Weder der von Raugai et al. genannte Wert von 17% (2017) bzw. 16% (von Raugai et al. nicht weiter begründeter, gewichteter Wert) für Zellen noch derjenige von de Wild Scholten von 14.8% für Module ist nachgewiesen.

2. Die PV- Ausbeute der letzten Jahre lässt nicht auf eine Wirkungsgradverbesserung schliessen

Wir haben die gesamte für die in der Schweiz zwischen 2005 und 2015 ausgewiesene PV-Ausbeute analysiert. Dabei handelt es sich um die gemessene elektrische Energie pro installierter Nennleistung (kWh_{el}/kW_{peak}). Ein angeblicher Anstieg des Wirkungsgrads der Module von 12% auf 16%, wie er von Raugai et al. (2017) postuliert wurde, der einem Anstieg um 33% entsprechen würde, müsste sich im selben Zeitraum in einer deutlich erhöhten Ausbeute niederschlagen. Dies müsste – unabhängig von Schwankungen der Anzahl Sonnenstunden von Jahr zu Jahr – der Fall sein. Der Einfluss älterer Module mit allenfalls deutlich tieferen Wirkungsgraden (im Vergleich zu den neuen) ist insofern unproblematisch und vernachlässigbar, da fast 70% der installierten Kapazität erst in den letzten drei betroffenen Jahren ans Netz ging. Gemäss den veröffentlichten Zahlen des Bundesamts für Energie (BfE, Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2015, Tabellen 24 und 32), deren Zahlen in der Replik von Raugai et al. (2017, Tabelle 1, erste zwei Zeilen) aufgeführt werden, war dies jedoch gerade nicht der Fall. Die PV-Ausbeute schwankt von Jahr zu Jahr. Die höchsten Ausbeuten wurden in den Jahren 2006 (791 kWh_{el}/kW_{peak}), 2014 (794) und 2015 (802), die tiefsten in den Jahren 2009 (686), 2012 (686) und 2013 (662) erreicht. Ein ansteigender Trend ist im 10 Jahresvergleich (2005-2015) überhaupt nicht zu erkennen (siehe Tabelle 1 mit dem tiefstem Wert im Jahr 2013 und dem höchstem im Jahr 2003).

Tabelle 1: Jährliche Ausbeute der Photovoltaik in der Schweiz

Jahreswerte zur Photovoltaik	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Elektrische Energie[GWh] *	11.2	13.0	14.7	17.6	18.1	20.7	23.8	28.6	36.7	54.4	93.6	168.1	299.5	500.5	841.6	1118.6	1333.4
Installierte Nennleistung [MW _{peak}] *	15.9	18.3	20.2	21.9	24.3	28.3	30.1	37.4	49.4	79.5	125.4	222.9	436.5	755.6	1060.6	1394.0	1663.9
Ausbeute[kWh_{el}/kW_{peak}]	704	710	728	804	745	731	791	765	743	686	746	754	686	662	794	802	801

* Quelle: Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2016, Tabelle 32, Bundesamt für Energie, 11.7.2017

Es zeigt sich, dass die angeblich starke Verbesserung um 33% (gemäss Raugai et al. [2017]) des Wirkungsgrads von den vorhandenen Messdaten nicht gestützt wird. Auch die verfügbaren Jahresdaten von 2016 zeigen lediglich eine PV-Ausbeute 802 kWh_{el}/kW_{peak} (siehe "Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2016", Tabelle 32), und dies obwohl gleichzeitig eine Erhöhung der Kapazität um 20% im Vergleich zum Vorjahr stattfand. Nebenbei sei darauf hingewiesen, dass laut derselben Quelle bereits 2003 eine Ausbeute von rund 804 kWh_{el}/kW_{peak} erreicht worden war, als die installierte Nennleistung im Vergleich zu 2016 etwa 76 mal kleiner war und ausschliesslich Module älterer Technologie verwendet wurden. Die von Raugai et al. (2017) vorgelegten Zahlen des BfE können also

nicht als Beleg für eine angebliche Wirkungsgradverbesserung und höhere Ausbeute erhalten.

Peinlicherweise wurde gerade dies von den 21 Autoren mit Hilfe der nicht nachgewiesenen Wirkungsgrade (siehe oben) und einer nicht näher begründeten "Gewichtung" sowie einer ohne nachvollziehbare Erklärung plötzlich auftauchende "Formel" zur Berechnung der Modulflächen versucht zu zeigen. Die daraus resultierende Graphik von Raugei et al. (2017, Fig. 1), welche zusätzlich zu den seltsamen Parametern auch noch eine falsche Legende aufweist, entspricht lediglich Wunschdenken. Die Messdaten des BfE sprechen eine andere Sprache.

3. Die Leistungsverminderung infolge Alterung der Zellen muss berücksichtigt werden

Drittens muss die jährliche Leistungsverminderung von PV-Anlagen berücksichtigt werden. In unserem ursprünglichen Artikel (Ferroni und Hopkirk, 2016) wurde dieser mit 1% pro Jahr angegeben. Raugei et al. (2017) erachteten hingegen 0.5% als angemessen. Dem ist nicht zuzustimmen. In der von uns referenzierten Quelle (Jordan et al., 2016) wird die durchschnittliche Verminderung für PV-Module mit 0.91% pro Jahr (Silizium) angegeben. Lediglich einige wenige (< 15%) qualitativ hochwertige Module wiesen eine Verminderung von lediglich 0.51% pro Jahr auf. Diese können aber nicht als repräsentativ betrachtet werden. Die durchschnittlich 0.91% Leistungsverminderung pro Jahr beziehen sich auf die Moduleinheit, welche Gleichstrom liefert. Aufgrund des Wechselrichters muss eine zusätzliche Verminderung einkalkuliert werden. Weitere Aspekte, die bei der gesamten Anlage berücksichtigt werden sollten, sind beispielsweise Kabelendverschlusswiderstände und Anpassungsfehler zwischen Modulen. Daher erhöhten wir die jährliche Leistungsverminderung für eine PV-Anlage auf den zurückhaltenden Wert von total 1%.

Raugei et al. (2017) gingen in ihrer Argumentation sogar so weit zu behaupten, dass das erste Schweizer PV-Werk in Canobbio (Laboratorio di Energia Ecologia Economia - Ticino Solare), welches 1982 den Betrieb aufnahm, während 20 Jahren lediglich eine Leistungsverminderung von 0.2% pro Jahr aufgewiesen hätte. Unabhängig davon, dass die damalige Technologie nicht mit der heutigen verglichen werden darf, lohnt es sich die angegebene Referenz (Chianese et al., 2003) anzuschauen. Es handelt sich um ein Conference Paper aus dem Jahr 2003 über eine von den Autoren angestrebte Langzeitanalyse der Leistungsverminderung, die jedoch aus verschiedenen Gründen nicht aussagekräftig war. Die Aussagekraft der Resultate ihrer Analyse wurde von den Autoren selbst gleich an mehreren Stellen stark relativiert. Zum einen wiesen sie daraufhin, dass ihr gemessenes Resultat (für 18 von damals 288 Modulen) von rund 3% in 21 Jahren nicht zur Langzeitanalyse der Module (mit crystalline Si cells) verwendet werden könne, da die Messanlagen und Systeme im betrachteten Zeitraum (mehrfach) verändert worden seien (Kommentar zur Figur 10 und Einleitung zu Abschnitt 4.1). Zum anderen "lebten" etwa 13% aller Module zum Zeitpunkt der Analyse nicht mehr und wurden in der Auswertung schlicht nicht berücksichtigt (siehe Tabelle III). Da die defekten Module nicht mitgezählt wurden resultierte ein viel zu hohes Resultat. Zudem vermerkten die Autoren, dass ihnen Angaben zu den einzelnen Messwerten der Module bei Inbetriebnahme fehlen würden (Abschnitt 4.3.2). Der eindrucksvolle Schweizer Wert, den Raugei et al. (2017) einer Feldstudie zur Langzeitleistungsverminderung von PV-Modulen entnommen zu haben behaupten, hat nichts mit der Realität zu tun, was jedem Leser der genannten Referenz (Chianese et al., 2003) sofort aufgefallen wäre. Anscheinend hatten weder Raugei und

seine 20 Co-Autoren (u.a. Frischknecht und de Wild Scholten) noch Novotny sich die Mühe gemacht die eigene Referenz sorgfältig zu lesen.

Allgemein beschlich uns beim detaillierten Studium der Replik von Rauegi et al. (2017) der Eindruck, dass die zahlreichen echten Referenzen (d.h. ohne das Gros der Selbstreferenzen auf eigene Veröffentlichungen) zum grössten Teil nicht angemessen analysiert worden waren. Denn deren Inhalt (siehe u.a. BfE oder Chianese et al.) widersprach zum Teil diametral der Darstellung der 21 Autoren der Replik.

Fazit

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass der von Ferroni und Hopkirk 2016 berechnete Startwert von 106 kWh/m² Energy Return für Mono-Si Cells nicht durch angebliche Wirkungsgradverbesserungen in Frage, geschweige denn in Abrede gestellt werden kann, wie es Rauegi et al. 2017 mit ihrem unbelegten Wert von 120 kWh/m² versucht haben. Allgemein ist die Zuhilfenahme von Werten aus Lebenszyklusanalysen (Life Cycle Assessments), womit zahlreiche Beratungsfirmen wie treeze Ltd. (R. Frischknecht, Uster) ihren Umsatz (häufig auf Kosten der jeweiligen Steuerzahler) generieren und die in unkritisch, oberflächlich verfasste Berichte von staatlichen und nichtstaatlichen Organisationen einfließen, äusserst kritisch zu sehen. Denn solche Werte beruhen zum grössten Teil auf Herstellerangaben und darauf aufbauendem Data-Mining. Eine unabhängige Überprüfung, insbesondere ein Vergleich mit echten Felddaten aus dem kommerziellen Einsatz tatsächlich verbauter Komponenten ist zwingend geboten.

Letztendlich mag es auf den ersten Blick erstaunen, dass der Unterschied im jährlichen Schweizer PV-Energieertrag zum Startzeitpunkt zwischen 106 kWh/m² (Ferroni & Hopkirk, 2016) und 120 kWh/m² (Rauegi et al. 2017) verhältnismässig klein ausfällt. Doch die Konsequenzen einer unseriösen Wertebestimmung ohne Felddaten, wie sie von Rauegi et al. (2017) betrieben und von Novotny völlig unkritisch übernommen wurde, sind verheerend. Dies zeigt sich beispielsweise noch viel eindrücklicher in den Zahlen zum energetischen Herstellungsaufwand der Module (Energieaufwand sprich Cumulative Energy Demand, CED), welcher sich fast um den Faktor 5 unterscheidet: 1300 kWh/m² (Ferroni & Hopkirk, 2016) zu 290 kWh/m² (Rauegi et al, 2017).

Es ist die Aufgabe seriöser Journalisten (speziell eines Chefredaktors), sich mit einer Thematik gründlich und unvoreingenommen auseinanderzusetzen. Ohne vertiefte Recherchen, kritische Analysen, detaillierter Behandlungen aller relevanten Aspekte und kontinuierliches, hartnäckiges Nachbohren ist eine Auseinandersetzung von vornherein qualitativ unbrauchbar und nicht ernst zu nehmen. Im vorliegenden Fall hat Radomir Novotny als Chefredaktor des bulletin.ch in seinem Dossierbeitrag "Erneuerbare Energien" komplett versagt.

Er war beim Verfassen ganz offensichtlich voreingenommen oder liess sich gerne vereinnahmen. Alle Bemerkungen zu unseren Resultaten (Ferroni & Hopkirk 2016, Ferroni et al. 2017) waren bewusst abwertend, beleidigend und voll tendenziöser Unterstellungen ("Fake News", "im Hintergrund andere Motivationen") formuliert. Im Vorfeld des Artikels wurde keiner der angegriffenen Autoren je von Novotny kontaktiert. Eine Anfrage zur Stellungnahme ist üblicherweise das Mindestmass journalistischen Anstands. Hingegen sprach der Chefredaktor beispielsweise direkt mit Rolf Frischknecht, ohne offenzulegen, dass letzterer ein Co-Autor der Replik (Rauegi et al. 2017) war (er identifizierte ihn nur als Co-Autor einer anderen Studie mit Rauegi) und mit seiner Beratungsfirma treeze Ltd.

persönlich interessengebunden, somit überhaupt nicht neutral ist. Ausgewogener Journalismus scheint beim bulletin.ch keine Priorität zu geniessen. Verräterisch ist hierbei, dass Novotny von "wissenschaftlichem Konsens" faselt, was in sich schon ein Paradoxon darstellt. Wer je auch nur einen indirekten Kontakt zur Wissenschaft hatte weiss, dass es in der Forschung um reproduzierbare, überprüfbare Fakten und nie um "Konsens" geht. Diese Vokabel gehört in die Politik.

Zusammenfassend kann man sagen, dass R. Novotny einen reinen Meinungsartikel geschrieben hat, ohne ihn als solchen zu kennzeichnen. Es handelt sich nicht um einen neutralen faktenorientierten Informationsartikel sondern plumpe Stimmungsmache mit der die Leser bewusst getäuscht werden.

Referenzen:

- BfE Bundesamt für Energie, Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2015, 12.7.2016
- BfE Bundesamt für Energie, Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2016, 11.7.2017
- Chianese D. et al, Analysis of weathered c-Si PV modules, Conference Paper at IEEE Xplore Proceedings of 3rd World Congress on Photovoltaic Energy Conversion, 11.-18.5.2003, Osaka.
- de Wild Scholten M., Energy payback time and carbon footprint of commercial photovoltaic systems, Solar Energy Materials & Solar Cells 119 (2013) 296–305
- Dongaonkar S. und M. A. Alam, In-Line Post-Process Scribing for Reducing Cell to Module Efficiency Gap in Monolithic Thin-Film Photovoltaics, IEEE Journal of Photovoltaics No.1, January 2014
- Ferroni F., Guekos. A., Hopkirk R., Further considerations to Energy Return on Energy Invested (ERoEI) for photovoltaic solar systems in regions of moderate insolation, Energy Policy 107 (2017) 498–505
- Ferroni F., Hopkirk R., Energy Return on Energy Invested (ERoEI) for photovoltaic solar systems in regions of moderate insolation, Energy Policy 94 (2016) 336–344
- Frischknecht R., Itten R., Wyss F. für IEA International Energy Agency, Life Cycle Assessment of Future Photovoltaic Electricity Produktion from Residential-scale Systems Operated in Europe, Report IEA-PVPS T12-05: 2015
- Green M. A. et al., Solar cell efficiency tables (version 50), Prog Photovolt Res Appl. 2017; 25: 668–676
- Holleman C. et al., 26.1%-efficient POLO-IBC cells: Quantification of electrical and optical loss mechanisms, Prog Photovolt Res Appl. 2019;1–9
- ISE Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, Photovoltaics Reports, 20.10.2016
- ISE Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, Photovoltaics Reports, 27.8.2018
- Jordan D. C. et al., Compendium of photovoltaic degradation rates, Prog. Photovolt: Res. Appl. 2016; 24: 978–989
- Novotny R., Energiebilanz von Solarstrom. Von Facts zu Fake News, <https://www.bulletin.ch/de/news-detail/energiebilanz-von-solarstrom.html>, bulletin.ch 2018
- NREL National Renewable Energy Laboratory, Best Research-Cell Efficiencies, 3.1.2019, <https://www.nrel.gov/pv/assets/pdfs/pv-efficiency-chart.20190103.pdf>
- NREL, National Renewable Energy Laboratory, Champion Module Efficiencies, 25.1.2019, <https://www.nrel.gov/pv/assets/pdfs/research-module-efficiency-chart.20190128.pdf>
- Raugei M. et al., Further considerations to Energy Return on Energy Invested (ERoEI) for photovoltaic solar systems in regions of moderate insolation: A comprehensive response, Energy Policy 102 (2017) 377–384

