

ÖSMR

„Ökonomie der Small Modular Reactors“

Mit finanzieller Unterstützung durch



Autoren

DI (FH) René Bolz, wissenschaftlicher Mitarbeiter
DI Rupert Christian, wissenschaftlicher Mitarbeiter

Projektleiter

Prof. Dr. Reinhold Christian, Präsident des Forum Wissenschaft & Umwelt

Impressum

Forum Wissenschaft und Umwelt
Palmgasse 3/2
1150 Wien

Tel.: 01/216 41 20
Fax: 01/216 41 20-20
E-Mail: office@fwu.at

Erstellt im Jahr 2021

Vorwort

Mit dem – unzutreffenden – Vorwand der Treibhausgas-Neutralität wird von der Atomwirtschaft versucht, eine Art Renaissance für diese gefährliche und teure Technik zu erzielen. Neue Konzepte sollen dazu beitragen.

So konnte Bill Gates mit TerraPower für den „Traveling Wave Reactor“ größtes Medienecho erzielen. Das von der US Regierung großzügig geförderte Konzept ist allerdings weit von einer Realisierung entfernt.

Eine andere Idee stellen die „Small Modular Reactors“ (SMR) dar: Kleine Reaktoren, die den Kostennachteil im Vergleich zu großen KKW („economy of scale“) durch Serienproduktion, Standardisierung und Vereinfachung, Modularisierung und kürzere Bauzeit kompensieren sollen.

In der vorliegenden Arbeit wurden daher ökonomische Aspekte der SMR anhand von Konzepten und Angaben der Betreiber analysiert. Es zeigt sich, dass selbst unter günstigen Annahmen eine sehr große Anzahl solcher SMR nach einem Konzept gebaut werden müsste, um wirtschaftlich mit herkömmlichen Reaktoren konkurrenzfähig zu sein. Schon angesichts der großen Zahl unterschiedlicher Konzepte ist das nicht zu erwarten. Eine Relevanz für eine Reduktion von Treibhausgasen ist auch aus anderen Gründen nicht gegeben (Entwicklungs- und Bauzeit versus Treibhausgasneutralität 2040 bzw. 2050, verfügbarer Brennstoff).

Selbst wenn es gelänge, die von den Interessenten propagierten Vorteile der SMR derart zu nutzen, dass eine theoretische Kostengleichheit hergestellt werden kann, zeigen die jüngsten Entwicklungen, dass die Atomkraft mit explodierenden Baukosten und Bauzeiten zu kämpfen hat. Insgesamt spricht nichts dafür, dass SMR-Konzepte wirtschaftlich konkurrenzfähig werden. Auch bezüglich der Emissionen zeigen sich keine Vorteile. Trotz des geringeren Unfallpotenzials im Einzelfall stiege das Gefahrenpotenzial insgesamt aufgrund der benötigten großen Zahl der SMR und ihres geringen Abstandes zu den Verbrauchern beträchtlich.

Will man den Klimawandel begegnen, so geht das mit Energieeffizienz und erneuerbaren Energien sicherer, schneller, naturverträglich – und vor Allem billiger.



Prof. Dr. Reinhold Christian

Geschäftsführender Präsident



em.o.Univ-Prof.ⁱⁿ Dr.ⁱⁿ phil. Helga

Kromp-Kolb

Präsidentin



Univ.-Doz. Dr. Peter Weish

Präsident

Inhaltsverzeichnis

1	Begriffsbestimmung.....	5
2	Reaktoren und Konzepte.....	7
2.1	IAEA.....	7
2.2	Staaten.....	9
3	Ökonomie.....	13
3.1	Historische Entwicklung	13
3.2	Overnight Construction Costs.....	14
3.3	Levelized Costs of Energy	14
3.4	Ökonomie der SMRs	15
3.4.1	Baukosten von Kernkraftwerken.....	18
3.4.2	LCOE – Vergleich mit erneuerbaren Energien.....	21
4	Zusammenfassung.....	24
	Abbildungsverzeichnis.....	26
	Abkürzungsverzeichnis.....	26
	Literaturverzeichnis	27

1 Begriffsbestimmung

Die Darstellung in diesem Kapitel orientiert sich an jener in „Sicherheitstechnische Analyse und Risikobewertung einer Anwendung von SMR-Konzepten (Small Modular Reactors)“ [1].

Derzeit existiert keine einheitliche Definition für Small Modular Reactors (SMRs). Tatsächlich wird sogar die Abkürzung SMR erst seit 2005 für Small Modular Reactor verwendet, während sie davor für „small and medium sized reactors“ gebräuchlich war.

Definitionen für SMR gibt es u.a. von der Internationalen Atomenergieorganisation (IAEA), der World Nuclear Association (WNA), der Nuclear Energy Agency (OECD-NEA) der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD), dem US-amerikanischen Nuclear Energy Institute, der US-amerikanischen Aufsichtsbehörde (U.S. NRC), der Canadian Nuclear Safety Commission (CNSC) und der britischen Regierung.

Da im Rahmen dieser Studie vor Allem technische Daten zu SMR, teilweise aber auch ökonomische aus IAEA-Quellen stammen, wird auch eine Definition der IAEA, und zwar jene des im Jahr 2015 gegründeten „SMR Regulators' Forum“, herangezogen [2]:

“For the purposes of this forum, Small Modular Reactors are Nuclear Power Plants that typically have several of these features:

- *Nuclear reactors typically <300 MW_{el} or <1000 MW_{th} per reactor;*
- *Designed for commercial use, i.e., electricity, production, desalination, process heat (as opposed to research and test reactors);*
- *Designed to allow addition of multiple reactors in close proximity to the same infrastructure (modular reactors);*
- *May be light or non-light water cooled;*
- *Use novel designs that have not been widely analysed or licensed by regulators.”*

Nach dieser Definition sind SMR also Kernkraftwerke (KKW) mit einer elektrischen Leistung von bis zu 300 MW_{el} (bzw. einer thermischen Leistung von bis zu 1.000 MW_{th}), die für eine kommerzielle Nutzung konzipiert sind, den Einsatz mehrerer Reaktoren „gemeinsam“ erlauben, die (leicht- oder schwer-) wassergekühlt sein können oder ein neuartiges Design aufweisen. Das einzige „harte Kriterium“ dabei ist die Leistung – wie das folgende Kapitel zeigt, führt die IAEA ausschließlich Reaktoren, die eine Leistung von maximal 300 MW_{el} aufweisen, als SMR.

Erwähnenswert ist noch, dass die NEA eine untere Grenze für die elektrische Leistung von 10 MW_{el} kennt. Die IAEA gibt diese Grenze nicht explizit an, führt aber Reaktoren unter dieser Leistung – unabhängig vom Reaktor-Design – als „MICRO-SIZED SMALL MODULAR REACTORS“.

Wesentlich, wenn auch nicht in der obigen Definition enthalten, ist der Ansatz, die Reaktoren in Serie zu fertigen und zu den Standorten zu transportieren. Dadurch soll u.a. eine deutliche Reduktion der „Stückkosten“ erreicht werden.

2 Reaktoren und Konzepte

2.1 IAEA

Die IAEA führt in „Advances in Small Modular Reactor Technology Developments. A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS) 2020 Edition“

- 25 „WATER COOLED SMALL MODULAR REACTORS“ (30 bis 300 MW_{el}),
- 14 „HIGH TEMPERATURE GAS COOLED SMALL MODULAR REACTORS“ (82,5 bis 300 MW_{el}),
- 11 „FAST NEUTRON SPECTRUM SMALL MODULAR REACTORS“ (10 bis 300 MW_{el}),
- 10 „MOLTEN SALT SMALL MODULAR REACTORS“ (50 bis 300 MW_{el}) und
- 6 „MICRO-SIZED SMALL MODULAR REACTORS“ (1,5 bis 8 MW_{el}),

insgesamt also 66 Reaktoren, als SMR an [3]. Da „micro-sized SMR“ nicht aussagekräftig ist, folgt eine kurze Beschreibung der Reaktoren anhand der seitens der IAEA verfügbaren Daten [3].

Der „**Energy Well**“ (Tschechien) soll 8 MW_{el} Leistung bieten. Die Herstellung ist für den Zeitraum 2030 – 2040 geplant. Der Reaktor vom Typ „Fluoride High Temperature reactor, pool type“ soll sechs Meter hoch sein und einen Durchmesser von drei Metern aufweisen. Die benötigte Fläche soll kleiner 4.000 m² sein.

Der „**MoveluX**“ (Japan) soll drei bis vier MW_{el} liefern. Der Bau des „first of a kind“ (FOAK) soll in den 2030er Jahren erfolgen. Der Reaktor vom Typ „Heat-Pipe cooled and calcium-hydride moderated reactor“ wird bei einer Höhe von zwei Metern einen Durchmesser von sechs Metern aufweisen. Die benötigte Grundfläche wird mit 100 m² angegeben.

Der „**U-Battery**“ (Großbritannien) wird mit einer elektrischen Leistung von 4 MW_{el} geplant. Im Jahr 2028 soll der FOAK mit einem Reaktor vom Typ „High-temperature gas-cooled micro nuclear reactor“ realisiert sein. Die Reaktorhöhe wird ca. 5,5 m, der Durchmesser 2,2 m betragen.

Für den „**AURORA**“ (USA) mit 1,5 MW_{el} wurde am 11.03.2020 ein Lizenzantrag gestellt. Es handelt sich um einen Reaktor vom Typ „Fast Reactor“, der eine Grundfläche von 4.180 m² beanspruchen soll.

Der etwas größere „**Westinghouse eVinci™ Micro Reactor**“ (USA) wird laut Konzept 2 – 3,5 MW_{el} bieten. Der „heat pipe cooled reactor“ wird eine Grundfläche kleiner 4.000 m² beanspruchen.

Für den „**MMR**“ (USA) mit einer elektrischen Leistung von mindestens fünf MW_{el} sollen im Zeitraum von 2021 bis 2027 die Standortvorbereitung und der Bau sowie anschließend bis 2052 der Anlagenbetrieb erfolgen. Der Reaktortyp ist „High Temperature Gas-cooled Reactor / micro-reactor / nuclear battery“. Der Reaktor selbst soll bei einem Durchmesser von 3,1 m 8,1 m hoch sein. Die gesamte Anlage wird eine Fläche von 12.480 m^2 beanspruchen.

Wesentlich ist, dass von den insgesamt 66 SMR-Konzepten nur ein kleiner Teil in Betrieb oder zumindest in Bau ist. Laut „Advances in Small Modular Reactor Technology Developments. A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS) 2020 Edition“ sind in Russland im Jahr 2020 zwei SMR-Reaktoren des Typs KLT-40S (ein Konzept) in Betrieb gegangen. In China und in Argentinien ist jeweils ein Prototyp in Bau, in den USA befindet sich das „NuScale“-Projekt der NuScale Power Inc. in Umsetzung [3]. Laut Homepage der IAEA ist in Indien der SMR „IPHWR-220“ in Betrieb (der allerdings in „Advances in Small Modular Reactor Technology Developments. A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS) 2020 Edition“ nicht angeführt wird – also nicht Teil der 66 SMR-Konzepte ist) [11]. Der Rest der 66 SMR existiert jedenfalls nur auf dem Papier.

Ebenfalls interessant ist, dass sechs der 25 „water cooled small modular reactors“ nicht an Land sondern auf Schiffen geplant sind. Ein Konzept davon ist in Russland bereits umgesetzt, allerdings liegt das Schiff, auf dem zwei Reaktoren vom Typ KLT-40S untergebracht sind, im Hafen von Pevek [3].

Praktisch keine Daten gibt es zu den Reaktoren auf Atom-U-Booten. Auf der Homepage der World Nuclear Association [12] finden sich immerhin Angaben zu den thermischen Leistungen einiger solcher Reaktoren.

Zu den größten Atom-U-Booten zählt die russische „Typhoon“-Klasse mit Zwillinge-Reaktoren mit in Summe 190 MW_{th} . Die russische „Akula II-Klasse“ hat einen Reaktor von 190 MW_{th} [12].

Indien baute 2009 sein erstes Atom-U-Boot mit einem Reaktor, der eine Leistung von 85 MW_{th} hat. Die britische Vanguard-Klasse verfügt über einen Reaktor mit 145 MW_{th} . Die Atom-U-Boote mit den leistungsmäßig kleinsten Reaktoren baut Frankreich – diese verfügen über eine Leistung von 48 MW_{th} [12].

Im Zusammenhang mit SMRs sind Atom-U-Boote vor allem deshalb von Interesse, da u.a. Frankreich, Russland und China im Rahmen der Entwicklung von SMRs auf Erfahrungen mit U-Boot-Reaktoren zurückgreifen [13].

2.2 Staaten

Zu den Staaten, die großes Interesse an der Entwicklung von SMRs zeigen und teilweise auch beträchtliche Summen für die Forschung zur Verfügung stellen, zählen

- Argentinien,
- China,
- Dänemark,
- Frankreich,
- Großbritannien,
- Indonesien,
- Japan,
- Kanada,
- Russland,
- Saudi Arabien,
- Süd Afrika,
- Süd Korea,
- Tschechien und
- die USA.

In „Advances in Small Modular Reactor Technology Developments. A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS) 2020 Edition“ werden im Anhang 35 Reaktor-Konzepte anhand ihrer technischen Charakteristika gegenübergestellt. Die meisten der Konzepte stammen aus den USA (11), gefolgt von Russland (6), Japan (5), Kanada (4), China und Großbritannien (jeweils 3), wobei vier Konzepte internationalen Kooperationen entspringen (USA & Japan, UK & Canada, USA & Kanada, Saudi Arabien & Süd Korea). Daten zu Bau- und Stromgestehungskosten (oder zumindest Schätzungen) sind in dieser Publikation nicht dargestellt [3].

Der argentinische CAREM-Reaktor ist seit 2014 in Bau [14], die Inbetriebnahme ist für 2023 geplant [15]. 2014 wurden die Baukosten auf 446 Millionen US\$ geschätzt, im April 2017 wurden die Baukosten auf 700 Millionen US\$ geschätzt. Allerdings wurde auch die elektrische Leistung von 29 MW_{el} auf 32 MW_{el} erhöht, die „spezifischen Baukosten“ sind also von 15.400 US\$/kW_{el} auf 21.900 US\$/kW_{el} gestiegen – eine Zunahme um 42% [15]! Zu erwähnen ist auch, dass es sich bei dem CAREM-Reaktor um einen Prototyp handelt – streng genommen ist er also kein SMR. Dieses Kriterium für SMRs ist allerdings mit Vorsicht anzuwenden, da – wie bereits dargestellt – die meisten SMRs nur auf dem Papier existieren.

In China wird seit 2012 am „HTR-PM“-Reaktor gebaut [16]. Die spezifischen Kosten sollen ursprünglich mit 6.000 US\$/kW_{el} angegeben worden sein, sollen sich aber u.a. aufgrund gestiegener Material- und Arbeitskosten bedingt durch Projektverzögerungen nahezu verdoppelt haben [15].

In Großbritannien sind derzeit keine SMRs in Bau [17]. Auf der Homepage des britischen Department for Business, Energy & Industrial Strategy findet sich neben einigen anderen Studien auch eine Veröffentlichung mit dem Titel „Small modular reactors. Can building nuclear power become more cost-effective?“ [18]. Darin heißt es wörtlich:

„By manufacturing 10 units per annum, SMRs could achieve levelised cost parity with large reactors at 5 gigawatts electrical (GW_{el}) of total deployment ...“

Die Produktion von 10 SMRs pro Jahr soll also ausreichen, um die LCOE auf das Niveau von großen Reaktoren zu reduzieren, sobald eine installierte Leistung von insgesamt 5 GW_{el} erreicht ist.

Auch in Kanada sind noch keine SMRs in Bau. Allerdings gibt es eine Roadmap und auch (Kosten-) Schätzungen für zwei Reaktor-Konzepte.

In der kanadischen „SMR ROADMAP“ wird (für SMR mit 3, 10 und 20 MW_{el}) angenommen, dass SMR-Technologien, sobald sie ausgereift sind (im Jahr 2030), ein Niveau der Energiekosten (LCOE) erreichen, auf dem sie gegenüber Alternativen zur Deckung des Energiebedarfs (von herkömmlicher Netzeinspeisung über Industrieanwendungen bis zur Versorgung entlegener Gemeinden und Minen) wettbewerbsfähig sind [4].

Für den Reaktor ARC-100 (100 MW_{el}) gibt es Kostenschätzungen. Für die Baukosten (occ – overnight construction costs) belaufen sie sich auf 500 Millionen US\$, die Stromgestehungskosten (LCOE – levelized costs of energy) sollen 50 – 60 US\$/MWh betragen [19].

Für den Integral MSR liegen Schätzungen für Bauzeit, occ und LCOE vor [110]. Der Bau soll vier Jahre dauern, die occ werden mit unter einer Milliarde US\$ und die LCOE mit 50 US\$/MWh angegeben.

Im ELSEVIER wurde im September 2020 eine Studie veröffentlicht („Too small to be viable? The potential market for small modular reactors in mining and remote communities in Canada“), die u.a. zum Ergebnis kommt, dass Stromgestehungskosten der SMRs höher sind als jene erneuerbarer Energie-Technologien – und dass das auch so bleiben wird [5].

In Russland sind bereits zwei Module vom Typ KLT-40S in Betrieb. 2016 gab die OECD-NEA den durchschnittlichen Strompreis mit 210 US\$/MWh an [6]. Ursprünglich wurden die

Baukosten mit 140 Millionen US\$ angenommen. Tatsächlich dürften sie weit höher liegen – zu lesen ist von 232 bis zu 740 Millionen US\$ [I11], [I12], [I13], [I14].

In den USA ist das NuScale-Projekt nahe an der Umsetzung („under regulatory review“). Von zwölf geplanten Modulen soll das erste 2029 in Betrieb gehen, die weiteren elf im Jahr 2030 [I15]. Die ooc wurden noch 2017 mit 3,6 Milliarden US\$ angegeben, aktuell geht man tatsächlichen Baukosten in Höhe von 6,1 Milliarden US\$ aus. Einen Teil der Finanzierungskosten soll das US-Department of Energy (DOE) tragen [I16]. Utah Associated Municipal Power Systems (UAMPS) hat die LCOE des NuScale-Projekts mit 55 US\$/MWh angegeben [I16], NuScale Power Inc. geht von 65 US\$/MWh aus [I5].

In den USA muss auch TerraPower erwähnt werden. Dieses Vorhaben erreichte vor Allem aufgrund des Engagements von Bill Gates sehr hohe Bekanntheit. Wie sich zeigt, kann TerraPower aber nicht dem Bereich „SMRs“ zugerechnet werden:

2007 begann die Entwicklung von Konzepten. Im Jahr 2016 erhielt TerraPower vom US-Energieministerium finanzielle Mittel in Höhe von 40 Millionen US\$ für die Erforschung, Konstruktion und die Erprobung des „Molten Chloride Fast Reactor“. Im Jahr 2017 unterzeichnete TerraPower ein Kooperationsabkommen mit der China National Nuclear Corporation zur Gründung eines Joint Ventures zur gemeinsamen Entwicklung der Technologie. Laut Homepage des U.S. Department of Energy, Office of Nuclear Energy soll der Reaktor eine Leistung von 1.200 MW_{el} haben. Ein Testreaktor soll Ende der 2020er Jahre in Betrieb gehen [I17]. Die Leistung liegt somit über den Definitionen von OECD und IAEA!

Im Jahr 2020 erhielten TerraPower, der Technologie-Co-Entwickler GE Hitachi Nuclear Energy und der Engineering- und Baupartner Bechtel vom US-Energieministerium eine Förderung in Höhe von 80 Millionen US\$ für einen Natrium-Demo-Reaktor [I18]. Dieser Reaktor hat eine Leistung von 345 MW_{el} [I19] und wäre somit ebenfalls kein SMR.

Zum „Travelling Wave Reactor“ von TerraPower liegen praktisch keine technischen Details vor. Laut den „world nuclear news“ der WNA ist ein Demonstrationsreaktor mit 600 MW_{el} geplant. Die kommerziellen Reaktoren sollen eine Leistung in Höhe von 1.150 MW_{el} aufweisen [I20]. Somit ist auch der „Travelling Wave Reactor“ kein SMR.

Die EU Kommission war im Jahr 2016 der Auffassung (Nuclear Illustrative Programme presented under Article 40 of the Euratom Treaty for the opinion of the European Economic and Social Committee), dass die Nuklearindustrie seit den 1950er Jahren den Einsatz kommerzieller SMRs in Betracht zieht, aber wenig daraus geworden ist und weltweit nur wenige SMR im Bau sind. Das Dokument hält fest, dass die Investitionskosten pro kW für SMR im Vergleich zu größeren Reaktoren wahrscheinlich höher sind. Es wird darauf hingewiesen, dass quantitative Aussagen betreffend die zukünftige Entwicklung der SMR-Ökonomie, bei denen Standardisierung, Lerneffekte, Kostenteilung und Modularisierung im

Vordergrund stehen, aufgrund des Fehlens vorhandener Beispiele schwer zu überprüfen sind. Weiter hieß es: Aufgrund des Verlustes von Skaleneffekten werden die spezifischen Kosten für Stilllegungs- und Abfallentsorgungseinheiten von SMR wahrscheinlich höher sein, als die eines großen Reaktors (einige Analysen geben an, dass diese zwei- bis dreimal höher sind) [I21].

Dennoch hat Estland im Sommer 2019 eine Machbarkeitsstudie zu SMRs in Auftrag gegeben und ist eine Zusammenarbeit betreffend das Reaktor-Konzept „Hitachi BWRX-300“ eingegangen [7].

Im EURATOM-Programm 2019 – 2020 aus dem Jahr 2018 findet sich [I22]: „Unterstützung der Sicherheitsforschung kleiner modularer Reaktoren“ samt Zuweisung finanzieller Mittel von bis zu 4 Mio. €.

Im Rahmen des Programms CORDIS wird über die Europäische Atomgemeinschaft (EURATOM) seit September 2019 ein Programm in Finnland zum Thema „Sicherstellen, dass Kleinreaktoren eine sicherere Form der Kernenergie sind“ (ESLMOR) mit einer Summe von rund 3,5 Mio. € gefördert [I23]. Weitere Förderungen gibt es über CORDIS und EURATOM unter den Titeln:

- „Sicherheit bei kleineren Kernreaktoren ganz groß schreiben“ (McSAFER) in Höhe von rund 4 Mio. € [I24].
- „Interkontinentale Zusammenarbeit bereitet den Weg für Kernenergie der Nachfolgeneration“ (ECC-SMART) in Höhe von rund 4 Mio. € [I25].
- „Forschung und Entwicklung zur Unterstützung der GEMINI-Initiative“ (GEMINI Plus) in Höhe von rund 4 Mio. € [I26].

Im EURATOM-Programm 2021 – 2025 werden SMR nicht direkt angesprochen [I27].

3 Ökonomie

3.1 Historische Entwicklung

Die folgenden Darstellungen zur Entwicklung der elektrischen Leistung von KKW sind direkt der PRIS-Datenbank entnommen [I28].

In den USA gingen in den 1960er Jahren insgesamt 20 Reaktoren mit einer durchschnittlichen Leistung von 207 MW_{el} ans Netz. In den 1970er Jahren waren es 59 Reaktoren mit einer durchschnittlichen Leistung von 914 MW_{el}, in den 1980er Jahren 47 Reaktoren mit einer durchschnittlichen Leistung von 1.205 MW_{el} und in den 1990er Jahren 4 Reaktoren mit einer durchschnittlichen Leistung von 1.254 MW_{el}. 2016 ging der bisher letzte Reaktor ans Netz. Die elektrische Leistung beträgt 1.218 MW_{el}. Seit den 1960er Jahren hat sich die durchschnittliche Leistung also versechsfacht, seit den 1990ern liegt sie relativ konstant bei rund 1.200 MW_{el}.

In Frankreich gingen in den 1960ern 7 Reaktoren mit einer durchschnittlichen Leistung von 247 MW_{el} ans Netz, in den 1970ern 9 Reaktoren mit einer durchschnittlichen Leistung von 755 MW_{el}, in den 1980ern 43 Reaktoren mit einer durchschnittlichen Leistung von 1.095 MW_{el} und schließlich in den 1990ern 10 Reaktoren mit einer durchschnittlichen Leistung von 1.446 MW_{el}. Auch in Frankreich hat sich die elektrische Leistung beinahe versechsfacht.

In Russland gingen in den 1960ern 4 Reaktoren mit einer durchschnittlichen Leistung von 211 MW_{el} ans Netz, in den 1970ern 13 Reaktoren mit einer durchschnittlichen Leistung von 520 MW_{el} und in den 1980ern 14 Reaktoren mit einer durchschnittlichen Leistung von 891 MW_{el}. In den 1990ern und 2000ern wurden insgesamt 4 Reaktoren mit einer Leistung von jeweils 1.000 MW_{el} errichtet. In den 2010er Jahren gingen 10 Reaktoren ans Netz, die eine durchschnittliche Leistung von 853 MW_{el} aufweisen. Der Eindruck eines Rückgangs der Leistung täuscht allerdings etwas. Der Grund dafür sind die beiden SMRs in Pevek mit einer Leistung von jeweils 35 MW_{el}. So verfügt auch der 2020 ans Netz gegangene Reaktor Leningrad 2-2 über eine Leistung von 1.188 MW_{el}. Damit hätte sich – bei Vernachlässigung der beiden SMRs – die durchschnittliche Leistung der Reaktoren auch in Russland verfünfbis versechsfacht.

Dieses Bild unterstreicht auch die Entwicklung der durchschnittlichen Leistung in Japan. von 179 MW_{el} (3 Reaktoren) in den 1960er Jahren nahm sie über 730 MW_{el} in den 1970ern (20 Reaktoren), 908 MW_{el} in den 1980ern (17 Reaktoren) und 999 MW_{el} in den 1990ern (15 Reaktoren) auf 1.085 MW_{el} in den 2000ern zu. Auch hier zeigt sich eine Versechsfachung der durchschnittlichen Leistung.

Insgesamt ist das Bild sehr eindeutig – waren die Reaktoren in den 1960er Jahren noch von einer Größe der SMRs, ging die Entwicklung in Richtung deutlich größerer Reaktoren. Ein Grund kann in Skaleneffekten gesehen werden.

Ein vergleichbares Bild könnte man – u.a. aufgrund gewonnener Erfahrungen in Vorprojekten – auch für Bauzeiten und -kosten erwarten, wobei hier die Skaleneffekte für Reduktionen sorgen sollten. Laut „Mythos Atomkraft – Warum der nukleare Pfad ein Irrweg ist“ [8] ist das aber keineswegs der Fall. Wie auch die beiden Beispiele Olkiluoto-3 (Finnland) und Flamanville-3 (Frankreich) zeigen, kommt es zu schwerwiegenden Verzögerungen im Bau und zu explosionsartigen Steigerungen der Errichtungskosten.

Anhand der Atomprogramme der USA und Frankreichs lässt sich zeigen, dass die spezifischen Baukosten ($\text{US}\$/\text{kW}_{\text{el}}$) seit den 1970er Jahren zugenommen haben [8]. Speziell in Frankreich ist es trotz mehrerer Versuche der Standardisierung nicht gelungen, die Baukosten vor Allem von Reaktoren neuerer Generationen (Gen III, Gen IV) zu reduzieren. Auch die Ausfallzeiten konnten nicht wesentlich reduziert werden [I29]. Im DIW Wochenbericht Nr. 8/2021 [I29] wird das wörtlich so formuliert:

„Die hohen Ausfallzeiten tragen somit erheblich zum kommerziellen Misserfolg der französischen Kernkraft bei. Diese durch Kostensteigerungen und nicht erreichte Größen- und Lerneffekte begründete Tatsache beschleunigte sich noch nach der Öffnung des europäischen Strombinnenmarktes, bei dem der Energieversorger EdF zunehmend von kostengünstigeren Wettbewerbern unter Druck gesetzt wurde.“

3.2 Overnight Construction Costs

Eine strenge Definition für Overnight Construction Costs gibt es nicht. In „Sicherheitstechnische Analyse und Risikobewertung einer Anwendung von SMR-Konzepten (Small Modular Reactors) werden die occ als Indikator zum Vergleich unterschiedlicher Erzeugungstechnologien beschrieben. Aufgrund der Annahme, dass das Kraftwerk „über Nacht“ errichtet wird, werden in den occ die Finanzierungskosten vernachlässigt. In den occ enthalten sind hingegen die Kosten für Bauvorbereitung, Technik, Beschaffung und Bau sowie (zumindest fallweise) Rückstellungen für unvorhergesehene Ausgaben [1].

Da die Finanzierungskosten stark von der Bauzeit abhängen und im Bereich von 30% – 60% der Gesamtbaukosten liegen können, sind die occ ganz besonders im Bereich der Atomkraft mit Vorsicht zu genießen. Dennoch gilt allgemein, dass die Gesamtbaukosten die Summe aus occ und Finanzierungskosten sind.

3.3 Levelized Costs of Energy

Die Methode der LCOE wurde entwickelt, um unterschiedliche Kraftwerke vergleichen zu können. Eine gute Einführung findet sich in „Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien“ [9] vom Fraunhofer-ISE, an der sich auch die folgende Kurzbeschreibung orientiert.

Die Stromgestehungskosten ergeben sich aus der Gegenüberstellung der über die Nutzungsdauer des Kraftwerks anfallenden Kosten und der in dieser Zeit erzeugten Strommenge. Üblicherweise erfolgt die Berechnung unter Anwendung der Kapitalwertmethode, die Ausgaben und auch die Strommenge werden also auf einen bestimmten Zeitpunkt diskontiert. Aus physikalischer Sicht ist diese Methode durchaus fragwürdig, aus finanzmathematischer Sicht entspricht die gewonnene Strommenge jedoch den Einnahmen, wodurch die Diskontierung gerechtfertigt ist.

Berechnet werden die LCOE nach der Formel [9]

$$LCOE = \frac{I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{A_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{M_{t,el}}{(1+i)^t}}$$

I_0 ... Investitionsausgaben

A_t ... Gesamtkosten im Jahr t

$M_{t,el}$... produzierte Strommenge im Jahr t

i ... Zinssatz

t ... Jahr der Nutzungsdauer

n ... Nutzungsdauer des Kraftwerks

Die jährlichen Gesamtkosten A_t setzen sich aus fixen und variablen Betriebskosten zusammen, wobei üblicherweise Kosten für Betrieb, Wartung, Instandhaltung, Reparaturen und Versicherungszahlungen berücksichtigt werden. Theoretisch können auch ein eventueller Restwert, Entsorgungskosten und CO₂-Preise abgebildet werden. Diesbezüglich ist die Vorgehensweise von Publikation zu Publikation unterschiedlich. In den meisten Fällen werden diese drei Positionen aber nicht berücksichtigt.

Wichtig ist jedenfalls stets zu bedenken, dass LCOE dem Vergleich unterschiedlicher Anlagen (mit unterschiedlichen Erzeugungs- und Kostenstrukturen) dienen, aber keinesfalls zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit eines konkreten Projekts herangezogen werden sollten. Es handelt sich um einen Vergleichs-Indikator, nicht um eine Kostenrechnung.

3.4 Ökonomie der SMRs

2015 machten OECD-NEA und IEA darauf aufmerksam, dass für SMRs auf Grund ihrer Größe die spezifischen Baukosten höher sein werden als bei großen Reaktoren der Generation III (typischerweise um 50% bis 100%). Diese „Größennachteile“ könnten (und

müssten) durch Serienproduktion von gleichen SMRs kompensiert werden. Geringere Investitionskosten und kürzere Bauzeiten könnten die Finanzierung im Vergleich zu größeren Reaktoren erleichtern [10].

Die variablen Kosten der SMRs werden höchstwahrscheinlich höher bleiben als jene großer KKW's. Die Stromgestehungskosten der SMRs werden nur dann das Niveau der großen KKW's erreichen, wenn alle Wettbewerbsvorteile von SMRs (Serienfertigung, optimierte Supply Chains, geringere Finanzierungskosten, ...) realisiert werden. Dabei gingen OECD-NEA und IEA davon aus, dass die Gestehungskosten der Generation IV jenen der Generation III entsprechen werden [10].

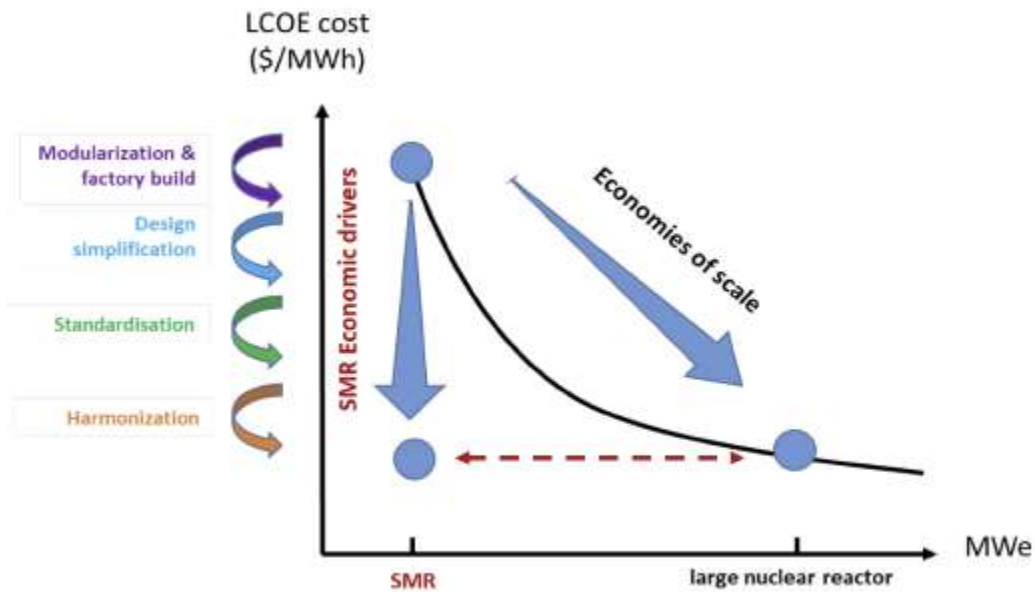
2021 hat sich die OECD-NEA erneut dieses Themas angenommen [11]. Klar ist, dass SMRs nicht von Effekten der economy of scale profitieren werden – wie bereits in Kapitel 3.1 kurz dargestellt trifft dies eigentlich auch auf „herkömmliche KKW“ zu.

Um die wirtschaftliche Herausforderung zu meistern, sind laut OECD-NEA Serienfertigung und ein großer Markt erforderlich. Damit stellen auch die konkurrierenden SMR-Designs ein Problem dar – für einzelne Hersteller wird es schwierig, einen großen Marktanteil zu erschließen. Die OECD-NEA ist der Meinung, dass SMRs daher beschleunigte Lernkurven aufweisen müssen [11].

Zu den beschleunigten Lernkurven sollen der höhere Grad an Modularisierung sowie Vereinfachung und Standardisierung im Vergleich zu größeren Kernreaktoren beitragen. Weitere Faktoren, die eine Reduktion der Kosten bewirken können, sind Fabrikfertigung, verbesserte Qualitätskontrolle, Reduzierung von Baurisiken, die Einführung von neuen Herstellungstechniken und schlussendlich auch Anpassungen von Vorgaben [11].

Die geringere Größe und kürzere Lieferzeiten sollen den Investitionsbedarf ebenfalls verringern – mit dem Ergebnis eines geringeren Risikos für Kunden bzw. Investoren. Auch die Flexibilität der SMRs soll einerseits zu Systemkostenvorteilen führen und andererseits neue Märkte erschließen [11].

Eine qualitative Darstellung dieser Überlegungen gibt die folgende Abbildung [11].



Source: NEA (2020).

Abbildung 1: Ausgleich von Skaleneffekten durch „SMR Economic drivers“ [11]

Zu einem anderen Schluss kommen die deutschen Scientists for Future. In „Kernenergie und Klima. Diskussionsbeiträge der Scientists for Future“ [12] legen die Autoren dar, dass signifikante Kostenersparnisse durch modulare Bauweise in der Vergangenheit nicht zu beobachten waren und somit auch in Zukunft nicht erwartet werden können.

Im Rahmen des Gutachtens „Sicherheitstechnische Analyse und Risikobewertung einer Anwendung von SMR-Konzepten (Small Modular Reactors)“ [1] wurde eine Produktionskostenrechnung angestellt, die Skalen-, Massen- und Lerneffekte aus der Atomindustrie berücksichtigt. Diese Rechnung zeigt, dass sich ein Einstieg in die SMR-Produktion erst ab rund 3.000 Stück lohnt. Wörtlich heißt es:

„Es ist somit nicht zu erwarten, dass der strukturelle Kostennachteil von Reaktoren mit kleiner Leistung durch Lern- bzw. Masseneffekte kompensiert werden kann.“

Dennoch geht OECD-NEA davon aus, dass SMRs Anfang der 2030er Jahre wirtschaftlich rentabel sein werden. Besonders aussichtsreich scheinen die Leichtwasser-SMRs zu sein, die seitens der OECD-NEA als näher an der Wirtschaftlichkeit eingestuft werden als SMR-Konzepte der Generation IV. Wichtigster Grund dafür sind noch fehlende Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen [11].

Die OECD-NEA hält auch fest, dass eine Reihe von Staaten die Einführung von SMRs unterstützt (Inlandprogramme, Bau von Demonstrationsanlagen oder „first-of-a-kind units“ FOAK). Das US-amerikanische Department of Energy unterstützt SMR-Unternehmen durch Kostenteilung über öffentlich-private Partnerschaften und Gewährung des Zugangs zu

Versuchsanlagen in nationalen Laboratorien. Das Vereinigte Königreich bietet finanzielle Unterstützung für SMR-Entwickler als Teil des Technologieportfolios, das als erforderlich betrachtet wird, um bis 2050 CO₂-Neutralität zu erreichen. Länder wie Kanada oder Finnland konzentrieren sich derzeit auch auf die Entwicklung von politischen Rahmenbedingungen, einschließlich Lizenzierungsregelungen, die die Bereitstellung von neuen Technologien unterstützen können [11].

Darüber hinaus beharrt die OECD-NEA darauf, dass SMRs für den Ausgleich von Schwankungen in Regionen mit großen Marktdurchdringungen von Wind und Photovoltaik eingesetzt werden können. Dabei dürfte sich die Betriebs-Charakteristik von SMRs nicht wesentlich von jener herkömmlicher KKWs unterscheiden. Das heißt, dass zugunsten einer höheren Lebensdauer auf schnelle Regelung verzichtet wird und somit SMRs Grundlast bereitstellen werden und keine Regelleistung. Auch der Einsatz von SMRs in hybriden Energiesystemen mit Wind und Photovoltaik zur Bereitstellung von Wasserstoff (sic!) und synthetischen Kraftstoffen sowie zur Meerwasserentsalzung wird ins Spiel gebracht [11].

3.4.1 Baukosten von Kernkraftwerken

In „Nuclear Development. Reduction of Capital Costs of Nuclear Power Plants“ stellte die OECD-NEA im Jahr 2000 die spezifischen Baukosten von unterschiedlich großen KKWs dar. Die spezifischen Baukosten – bezogen auf die Leistung der KKWs – waren für Reaktoren mit einer Leistung von 1.350 MW_{el} um rund 50% geringer als für kleinere Reaktoren mit 300 MW_{el} [13]. Abbildung 2 gibt die Ergebnisse der Studie wieder.

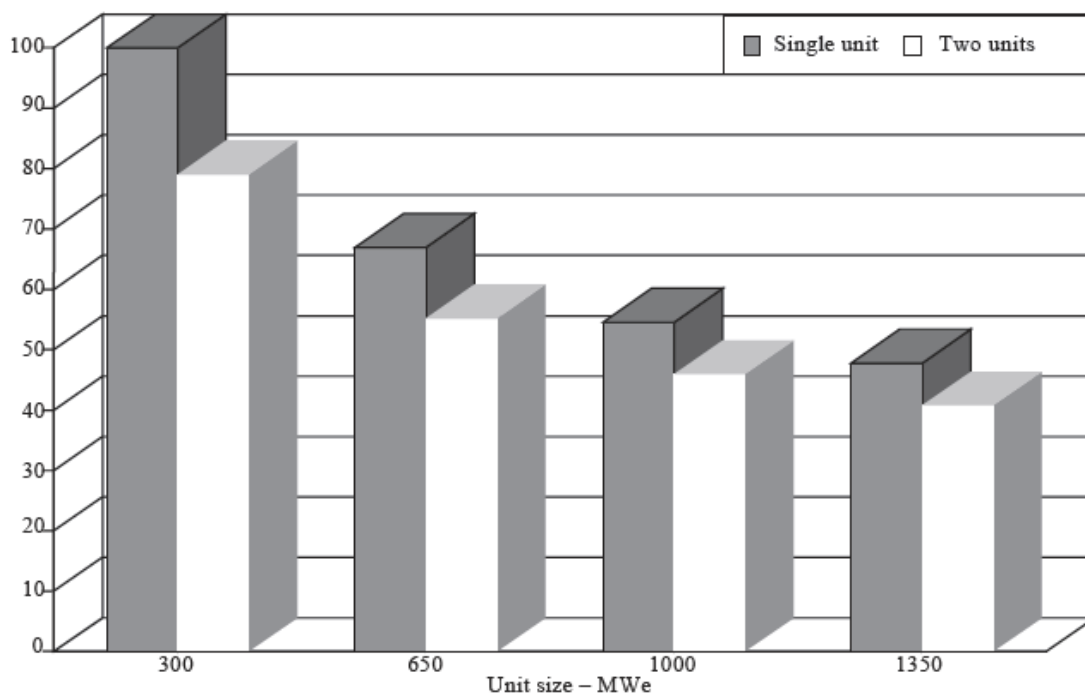


Abbildung 2: spezifische Baukosten für KKWs [13]

In der Veröffentlichung „Nuclear Technology Development and Economics 2020. Unlocking Reductions in the Construction Costs of Nuclear: A Practical Guide for Stakeholders“ der OECD-NEA findet sich die folgende, qualitative Abbildung zu den Treibern der Baukosten in Abhängigkeit von der errichteten Anzahl an Reaktoren (von FOAK-Reaktor über post-FOAK-Reaktoren bis zu nth-of-a-kind-Reaktoren (NOAK-Reaktoren)) [14].

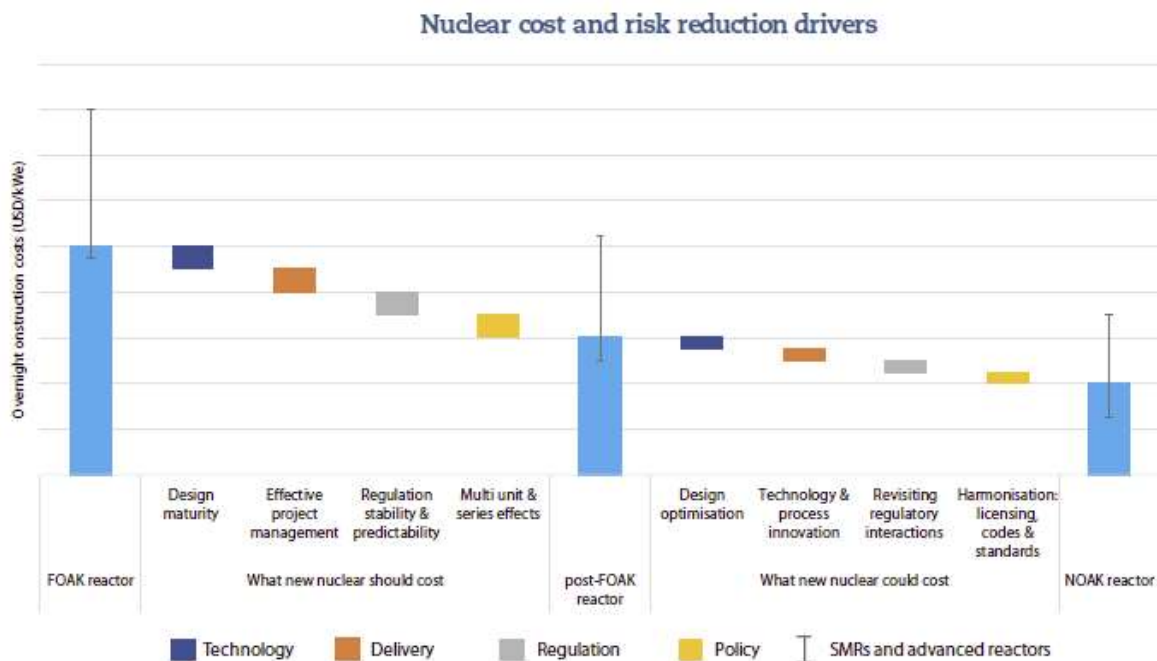


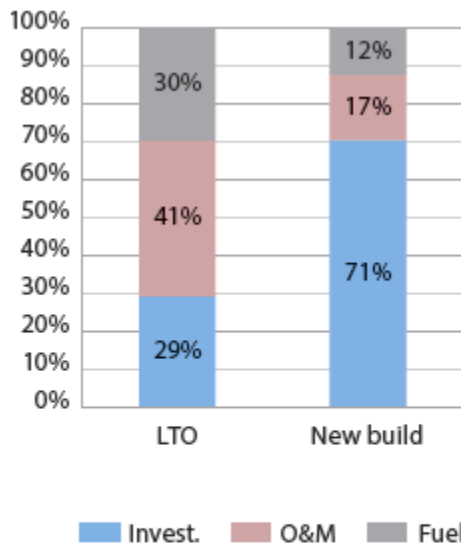
Abbildung 3: Treiber der Baukosten [14]

Technologie (Design-Optimierungen, ...), Bereitstellung (effektives Projektmanagement, Innovationen, ...), Regulierung (Stabilität, Rechtssicherheit, ...) und Politik (Serieneffekte, Harmonisierung, Lizenzierung, Standardisierung, ...) sollen also, auf unterschiedliche Art und in mehreren Durchläufen, zu Kostensenkungen beitragen. Ob die angedeuteten Kostenreduzierungen tatsächlich erreicht werden können, hängt natürlich auch stark von der Anzahl der errichteten Reaktoren ab.

Abbildung 4 aus „Projected Costs of Generating Electricity. 2020 Edition“ [15] kann entnommen werden, dass die Investitionskosten im Neubau die größte Herausforderung darstellen. Die spezifischen occ werden für den Neubau mit 4.500 US\$/kW_{el} angegeben – und liegen damit unter den wenigen Schätzungen, die in Kapitel 2.2 angeführt werden konnten:

- CAREM-Reaktor (Argentinien) mit 21.900 US\$/kW_{el}
- „HTR-PM“-Reaktor (China) mit 6.000 US\$/kW_{el}
- ARC-100 (Großbritannien) mit 5.000 US\$/kW_{el}
- Integral MSR (Kanada) mit rund 5.000 US\$/kW_{el}

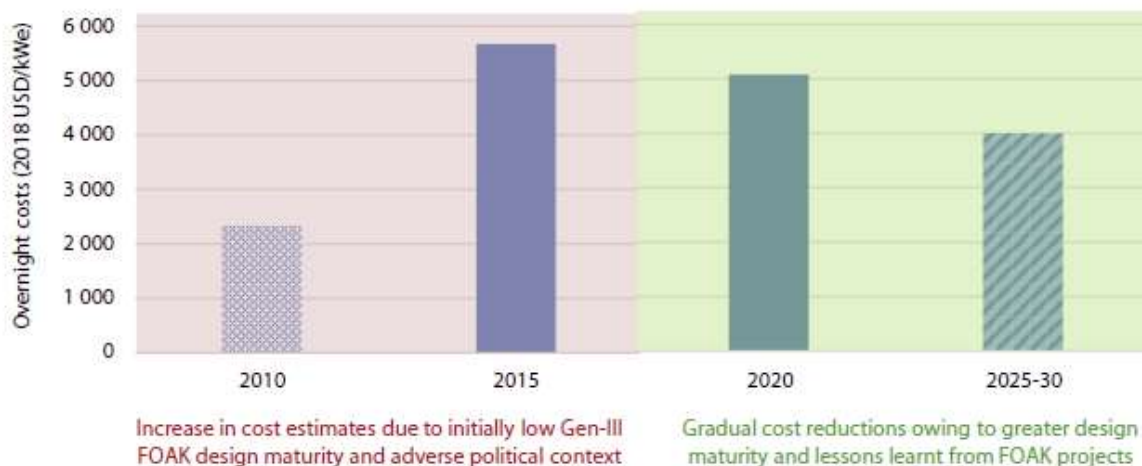
Im Bereich der „Lebensdauererlängerung“ (long term operation, LTO) spielen die Investitionskosten naturgemäß eine deutlich geringere Rolle. Klarerweise ist das Verhältnis der Betriebs- (operation & maintenance, O&M) zu den Brennstoffkosten (fuel) in beiden Fällen gleich.



Note: Overnight costs of USD 700 and USD 4 500 per kWe for LTO and new build, respectively. Real discount rate of 7% at a capacity factor of 85%. The operational expenditures assumptions are detailed in Table 8.1.

Abbildung 4: Kostenanteile für Lebensdauererlängerung (LTO) und Neubau (new build) im Vergleich [15]

Die folgende Abbildung [14] stellt occ-Schätzungen der OECD-NEA für Reaktoren der Generation III für 2010 und 2015 (FOAK-Reaktoren) sowie 2020 und den Zeitraum 2025 bis 2030 (post-FOAK-Reaktoren) dar.



Notes: 2010, 2015 and 2020 OECD average overnight construction cost data based on 2005, 2010 and 2015 NEA/IEA projected cost reports, adjusted for USD inflation using OECD statistics.

Source: IEA/NEA, (Forthcoming), *Projected Costs of Generating Electricity 2020*.

Abbildung 5: occ-Schätzungen für Reaktoren der Generation III [14]

Die angenommenen Reduktionen der Kosten widersprechen der historischen Entwicklung und ganz besonders den aktuellen Erfahrungen – sowohl mit „herkömmlichen“ Reaktoren als auch mit SMRs.

So „stiegen“ z.B. die Baukosten des Druckwasserreaktors in Flamanville, Frankreich (Flamanville 3, 1650 MW_{el}) von etwas mehr als 3 Milliarden € im Jahr 2005 auf 8,5 Milliarden € im Jahr 2012 [I30]. Ende des Vorjahres war von Baukosten in Höhe von 19,1 Milliarden € zu lesen [I31].

Eine ähnliche Entwicklung erleben die Baukosten des neuen Druckwasserreaktors in Finnland (Olkiluoto 3, 1.720 MW_{el}). 2002 wurde der Neubau zum Preis von 3 Milliarden € angeboten [I31]. 2012 wurden die Baukosten mit 8,5 Milliarden € beziffert, 2017 mit 10,5 Milliarden € [I32]. Die Firma Areva (Bauherr) musste vom französischen Staat gerettet werden [I33].

Im Jahr 2017 hat Westinghouse den Bau von zwei AP1000-Reaktoren in South Carolina aufgeben (2 x 1.250 MW_{el}) und 9 Milliarden US\$ verloren. Der Anbieter ging in Konkurs [I33]. 2018 wurden die Baukosten mit 27 bis 30 Milliarden US\$ beziffert [I34].

Die Baukosten für zwei Druckwasserreaktoren in England (Hinkley Point C, 2 x 1.630 MW, 1.720 MW_{el}) wurden ursprünglich mit 20 Mrd. € beziffert. Ende 2020 rechnete man mit Kosten in Höhe von 28,4 Mrd. € [I31].

Die Untersuchung „Risk, innovation, electricity infrastructure and construction cost overruns: Testing six hypotheses“, die im Mai 2014 im ELSEVIER veröffentlicht wurde, kommt bei 175 von 180 untersuchten KKW-Projekten zum Ergebnis, dass die Endkosten das ursprüngliche Budget um durchschnittlich 117 Prozent überstiegen und der Bau durchschnittlich 64% mehr Zeit in Anspruch nahm als erwartet [16].

3.4.2 LCOE – Vergleich mit erneuerbaren Energien

Die folgende Grafik stellt die Entwicklung der LCOE (in US\$/MWh) in den USA von 2009 bis 2020 dar („Levelized Cost of Energy 2020“ – LCOE – von Lazard, Auszug für Windenergie, Photovoltaik, und KKW) [I35]. Auf diese Werte wird u.a. in den World Nuclear Reports zurückgegriffen.

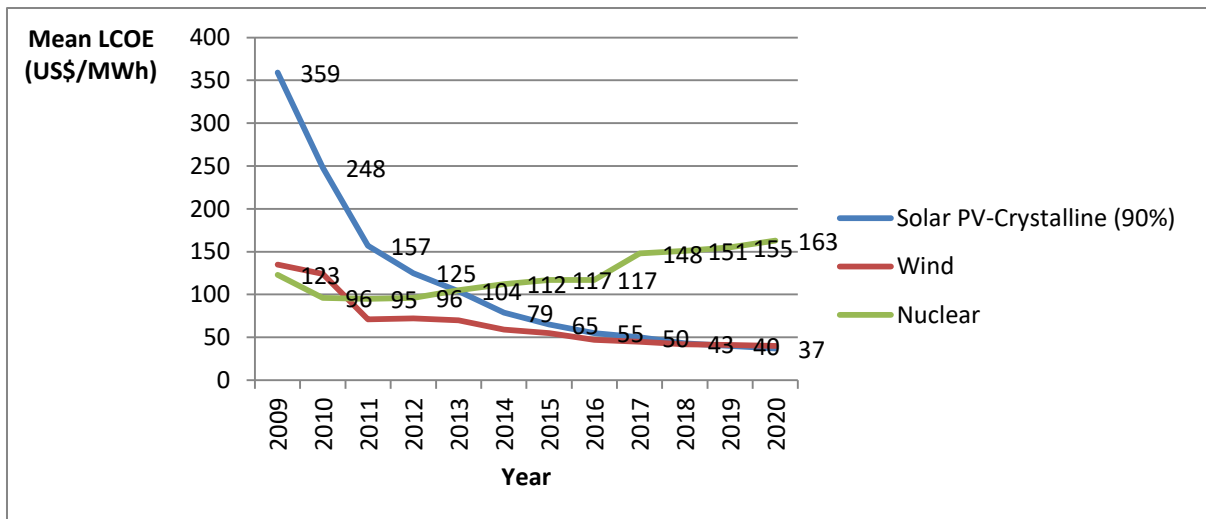


Abbildung 6: Entwicklung der LCOE in den USA [I35]

Abbildung 6 zeigt, dass die LCOE für Atomstrom von 123 US\$/MWh im Jahr 2009 auf 163 US\$/MWh im Jahr 2020 gestiegen sind – ein sattes Plus von 32%. Im Gegensatz dazu sind die LCOE für Photovoltaik von 359 US\$/MWh auf 37 US\$/MWh gesunken, was einem Minus von beinahe 90% entspricht. Auch die LCOE für Windenergie sind von 135 US\$/MWh auf 40 US\$/MWh gesunken [I35]. Die LCOE der beiden erneuerbaren Energietechnologien liegen damit aktuell einen Faktor 4 unter jenen der Atomkraft.

Ein Vergleich mit Kapitel 2.2 zeigt, dass für den US-amerikanischen SMR NuScale LCOE von 55 bis 65 US\$/MWh erwartet werden – das wäre etwa um den Faktor 3 geringer als die LCOE aktueller KKW in den USA (allerdings immer noch deutlich über jenen von Wind und Photovoltaik)!

Die Studie „ELECTRICITY GENERATION COSTS“ des britischen Department for Business, Energy & Industrial Strategy aus dem Jahr 2016 schätzt, dass LCOE für „Pressurized Light-Water Moderated and Cooled Reactor“ (FOAK) im Jahr 2025 bei 95 £/MWh, für große Photovoltaik-Anlagen bei 63 £/MWh und für onshore-Windenergieanlagen (größer 5 MW) bei 61 £/MWh liegen werden [I36].

Im Bericht „ELECTRICITY GENERATION COSTS 2020“ bleiben die LCOE für KKW unverändert gegenüber dem Jahr 2016. Bei großen Photovoltaik-Anlagen sollen die LCOE im Jahr 2025 im Mittel bei 44 £/MWh liegen, für onshore-Windenergieanlagen im Mittel bei 46 £/MWh [I37].

In „New Nuclear Power. BRIEFING PAPER Number CBP 8176, 26 February 2021“ für die House of Commons LIBRARY in Großbritannien finden sich Kosten von 92.50 £/MWh für Hinkley Point C. Für das KKW Sizewell C rechnet man mit spezifischen Gestehungskosten von 89,50 £/MWh [17]. Das wäre immerhin eine Verringerung der Kosten um rund 3%, aber natürlich nicht vergleichbar mit den Entwicklungen bei den erneuerbaren Energien.

Die Internationale Energie Agentur (IEA, World Energy Outlook 2020) geht beim Vergleich der Gestehungskosten über die LCOE hinaus. Die „Value-adjusted Levelized Costs of Energy“ (VALCOE) berücksichtigen zusätzlich zu den herkömmlichen LCOE noch die Faktoren Flexibilität, Betriebscharakteristika und Grundlastfähigkeit versus Volatilität (zusammengefasst unter „System-Dienlichkeit“) [I38].

Für die EU im Jahr 2019 werden die VALCOE mit 145 US\$/MWh für Atomstrom, mit 85 US\$/MWh für Photovoltaik, mit 80 US\$/MWh für onshore Windkraft und mit 115 US\$/MWh für offshore-Windkraft angegeben. Bis 2040 sollen die VALCOE für Atomkraft auf 115 US\$/MWh sinken. Allerdings sollen sie 2040 für PV und Wind onshore 80 US\$/MWh und für offshore Wind nur 60 US\$/MWh betragen [I38].

Ein ähnliches Bild zeigt sich für die USA. Hier werden die VALCOE im Jahr 2019 für Atomkraft mit 105 US\$/MWh, für PV mit 80 US\$/MWh, für onshore Wind mit 55 US\$/MWh und für offshore Wind mit 150 US\$/MWh angegeben. Die Schätzungen für 2040 betragen 100 US\$/MWh für Atomkraft, 55 US\$/MWh für PV und onshore Wind sowie 75 US\$/MWh für offshore Wind [I38].

Ein anderes Bild wird für China und Indien gezeichnet. In China weist 2019 PV die geringsten VALCOE auf (55 US\$/MWh), gefolgt von onshore Wind und Atomkraft (65 US\$/MWh), während offshore Wind mit 130 US\$/MWh die deutlich teuerste Form der Stromgewinnung darstellt. Bis 2040 ändert sich das Bild kaum. PV bleibt auf dem Wert von 55 US\$/MWh, onshore Wind und Atomkraft sinken leicht auf 60 US\$/MWh. Offshore Wind legt allerdings eine rasante Preisentwicklung hin und sinkt auf 55 US\$/MWh – also den Wert von PV [I38]!

Recht ähnlich sind die Verhältnisse in Indien. Atomkraft soll hier sowohl 2019 als auch 2040 VALCOE in Höhe von 70 US\$/MWh aufweisen, PV soll von 40 US\$/MWh im Jahr 2019 auf 50 US\$/MWh im Jahr 2040 steigen (in völligem Gegensatz zu den üblichen Entwicklungen, allerdings ausgehend von einem vergleichsweise geringen Startwert) und onshore Wind soll eine Reduktion der VALCOE von 60 US\$/MWh auf 55 US\$/MWh erleben. Eine deutliche Reduktion wird auch in Indien für offshore Wind erwartet – die VALCOE sollen von 135 US\$/MWh im Jahr 2019 auf 70 US\$/MWh im Jahr 2040 fallen [I38]. Insgesamt zeigen also auch die VALCOE, dass Atomkraft teurer ist als Erneuerbare.

Ganz allgemein zeigt sich, dass im Gegensatz zu den Erneuerbaren die Gestehungskosten von KKW steigen. Für SMRs liegen bisher beinahe ausschließlich Schätzungen der LCOE vor. Bedenkt man aber die „übliche“ Entwicklung solcher Schätzungen (siehe z.B. Abbildung 5), so spricht das nicht für die Wirtschaftlichkeit der SMRs.

4 Zusammenfassung

SMR sind derzeit ein zu beachtendes Thema und sollen der Atomkraft neues Leben einhauchen – dabei gibt es nicht einmal eine einheitliche Definition. So konnte zweifellos Bill Gates mit TerraPower das größte Medienecho erzeugen. Die – vom US-Energieministerium großzügig geförderten – Konzepte und Demo-Reaktoren fallen allerdings nicht unter die SMR-Definition des „SMR Regulators’ Forum“ der IAEA.

Diese SMR-Definition sieht allerdings auch das Kriterium „keine Demo-Reaktoren bzw. Prototypen“ vor, wonach streng genommen derzeit keine SMR existieren. Die meisten Konzepte existieren aktuell nur auf dem Papier, lediglich in Russland sind zwei Reaktoren des Typs KLT-40S in Betrieb.

Wie die Geschichte der „herkömmlichen“ Atomkraft zeigt, war eine deutliche Zunahme der Reaktorgröße seit den 60er Jahren des 20. Jahrhunderts die Regel – und ist es abgesehen von den russischen KLT-40S (und weiteren SMR-Konzepten) noch heute. Auch wenn KKWs streng genommen nicht von der „economy of scale“ profitiert haben, zeigt ein Vergleich der spezifischen Baukosten, dass große Reaktoren (1.350 MW_{el}) um rund einen Faktor zwei billiger sind als kleine Reaktoren (300 MW_{el}). Um diesen Nachteil auszugleichen und Strom zumindest zu den Kosten der „herkömmlichen“ Atomkraft bereitstellen zu können, müssen SMRs andere Wettbewerbsvorteile nutzen.

Zu diesen Wettbewerbsvorteilen zählen:

- Serienproduktion
- Modularisierung
- Vereinfachung und Standardisierung
- kürzere Bauzeiten
- geringere Investitionskosten
- optimierte Supply Chains

Sie betreffen also primär die Bauphase, während davon auszugehen ist, dass die laufenden Kosten für SMRs höher sind und bleiben werden als für KKWs. Diese Vorteile sind aktuell – sowohl einzeln als auch in Summe – kaum seriös zu quantifizieren. Um also den gewaltigen Startnachteil von doppelten Baukosten und höheren laufenden Kosten ausgleichen zu können, müsste wohl eine sehr große Anzahl an Reaktoren eines Konzepts gebaut und eingesetzt werden. Dem widerspricht die hohe Zahl unterschiedlicher Konzepte, die sich zumindest teilweise Märkte teilen müssten.

Selbst wenn es gelingt, die Vorteile der SMRs derart zu nutzen, dass eine theoretische Kostengleichheit hergestellt werden kann, zeigen die jüngsten Entwicklungen, dass die Atomkraft mit explodierenden Baukosten und -zeiten zu kämpfen hat. Das ist nicht nur an

europäischen Beispielen (Flamanville 3, Olkiluoto 3, Hinkley Point C) zu sehen, sondern auch an der Entwicklung der LCOE für Atomkraft in den USA. Besonders eindrucksvoll geht das auch aus der Untersuchung „Risk, innovation, electricity infrastructure and construction cost overruns: Testing six hypotheses“ hervor. Diese Publikation zeigt, dass bei 175 von 180 untersuchten KKW Baukosten und -zeiten überschritten wurden, und zwar um durchschnittlich 117% bzw. 64%.

Zwar sollten SMRs besonders hier Vorteile gegenüber der „herkömmlichen“ Atomkraft aufweisen, das einzig aktuelle Beispiel – der argentinische CAREM-Reaktor – weist auf das Gegenteil hin. Hier sind die geschätzten spezifischen Baukosten innerhalb von drei Jahren nach Baubeginn um 42% gestiegen. Dass ausgerechnet in einem Bereich, der den SMRs zum Durchbruch verhelfen soll, praktisch keine Vorteile gegenüber der „herkömmlichen“ Atomkraft generiert werden können, spricht nicht für die Möglichkeit eines wirtschaftlichen Betriebs von SMRs. Dass die spezifischen Baukosten bei anderen SMR-Konzepten deutlich geringer angesetzt werden als für den CAREM, lässt daher eher eine größere Überschreitung der Schätzungen als besonders günstigen Strom erwarten.

Insgesamt spricht nicht viel dafür, dass SMR-Konzepte wirtschaftlich konkurrenzfähig werden. Auch die geringen Emissionen sprechen nicht für SMRs. Will man dem Klimawandel begegnen, geht das schneller, sicherer und naturverträglicher mit Energieeffizienz und erneuerbaren Energien – und vor Allem billiger!

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ausgleich von Skaleneffekten durch „SMR Economic drivers“ [12]	17
Abbildung 2: spezifische Baukosten für KKWs [13]	18
Abbildung 3: Treiber der Baukosten [14]	19
Abbildung 4: Kostenanteile für Lebensdauererlängerung (LTO) und Neubau (new build) im Vergleich [15]	20
Abbildung 5: occ-Schätzungen für Reaktoren der Generation III [14]	20
Abbildung 6: Entwicklung der LCOE in den USA [132]	22

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
CNSC	Canadian Nuclear Safety Commission
DOE	US-Department of Energy
FOAK	first of a kind
GW _{el}	Gigawatt elektrisch
IAEA	Internationale Atomenergieorganisation
IEA	Internationale Energieagentur (international energy agency)
KKW	Kernkraftwerk
kW	Kilowatt
kW _{el}	Kilowatt elektrisch
LCOE	levelized costs of energy
LTO	long term operation (Lebensdauererlängerung)
MW	Megawatt
MW _{el}	Megawatt elektrisch
MW _{th}	Megawatt thermisch
MWh	Megawattstunde
NOAK	n th of a kind
occ	overnight construction costs
OECD	Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
OECD-NEA	Nuclear Energy Agency der OECD
O&M	operation & maintenance
SMR	small modular reactor
U.S. NRC	US Nuclear Regulatory Commission
VALCOE	value-adjusted levelized costs of energy
WNA	World Nuclear Association

Literaturverzeichnis

Literatur

- [1] Pistner, C. et al. (2021): Sicherheitstechnische Analyse und Risikobewertung einer Anwendung von SMR-Konzepten (Small Modular Reactors), BASE, Berlin, Kapitel 2.2
- [2] Small Modular Reactor (SMR) Regulators' Forum (2018): Terms of Reference; (<https://www.iaea.org/sites/default/files/18/06/smr-forum-tor-2018-05-21.pdf> 19.10.2021)
- [3] IAEA (2020c): Advances in Small Modular Reactor Technology Developments. A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS) 2020 Edition, Wien (https://aris.iaea.org/Publications/SMR_Book_2020.pdf 20.10.2021)
- [4] Butcher, N. (2018): ECONOMIC AND FINANCE WORKING GROUP SMR ROADMAP, Canadian Nuclear Association, Ottawa; (<https://smrroadmap.ca/wp-content/uploads/2018/12/Economics-Finance-WG.pdf?x64773> 19.10.2021)
- [5] Froese, S., Kunz, N. C., Ramana, M. V. (2020): Too small to be viable? The potential market for small modular reactors in mining and remote communities in Canada, ELSEVIER; (<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S030142152030327X> 19.10.2021)
- [6] OECD (NEA) (2016): Nuclear Development 2016. Small Modular Reactors: Nuclear Energy Market Potential for Near-term Deployment, Seite 63
- [7] European Commission, EURATOM SUPPLY AGENCY (2019): ESA. Euroatom Supply Agency. Annual Report 2019, Luxembourg; (<https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/28c7fa61-2a1b-11eb-9d7e-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF/source-198763160> 19.10.2021)
- [8] Mythos Atomkraft – Warum der nukleare Pfad ein Irrweg ist (Mit Beiträgen von Antony Froggatt, Mycle Schneider, Steve Thomas, Otfried Nassauer und Henry D. Sokolski), Schriften zur Ökologie (Band 12), Hrsg. von der Heinrich-Böll-Stiftung, Berlin, 2010
- [9] Kost, C. et al. (2018): Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien, Fraunhofer-ISE, (https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/DE2018_ISE_Studie_Stromgestehungskosten_Erneuerbare_Energien.pdf 20.10.2021)
- [10] OECD (NEA), IEA (2015): Projected Costs of Generating Electricity. 2015 Edition, Paris
- [11] OECD (NEA) (2021): Nuclear Technology Development and Economics 2021. Small Modular Reactors: Challenges and Opportunities, Paris
- [12] Wealer, B. et al. (2021): Kernenergie und Klima. Diskussionsbeiträge der Scientists for Future; doi: 10.5281/zenodo.5573719

- [13] OECD (NEA) (2000): Nuclear Development. Reduction of Capital Costs of Nuclear Power Plants, Paris
- [14] OECD (NEA) (2020): Nuclear Technology Development and Economics 2020. Unlocking Reductions in the Construction Costs of Nuclear: A Practical Guide for Stakeholders“, Paris
- [15] OECD (NEA), IAEA (2020): Projected Costs of Generating Electricity. 2020 Edition, Paris
- [16] Sovacool, B. K., Gilbert, A., Nugent, D. (2014): Risk, innovation, electricity infrastructure and construction cost overruns: Testing six hypotheses, ELSEVIER, (<https://www.qualenergia.it/sites/default/files/articolo-doc/Sovacool-et-al-ETIJ-Overruns.pdf>)
- [17] Hinson, S. (2021): New Nuclear Power. BRIEFING PAPER Number CBP 8176, 26 February 2021“, House of Commons LIBRARY, London, (<https://researchbriefings.files.parliament.uk/documents/CBP-8176/CBP-8176.pdf>)

Internet

- [I1] <https://aris.iaea.org/sites/overview.html> (06.04.2021)
- [I2] <https://world-nuclear.org/information-library/non-power-nuclear-applications/transport/nuclear-powered-ships.aspx> (21.04.2021)
- [I3] <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors.aspx> (06.04.2021)
- [I4] <https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/ReactorDetails.aspx?current=1055> (05.04.2021)
- [I5] <https://reneweconomy.com.au/small-modular-reactor-rhetoric-hits-a-hurdle-62196/> (05.04.2021)
- [I6] <https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/ReactorDetails.aspx?current=957> (05.04.2021)
- [I7] <https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/CountryDetails.aspx?current=GB> (06.04.2021)
- [I8] https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/665300/TEA_Projects_5-7_-_SMR_Cost_Reduction_Study.pdf (08.04.2021)
- [I9] <https://www.reutersevents.com/nuclear/ebr-ii-experience-aided-arc-100-smr-design-review> (06.04.2021)
- [I10] <https://www.terrestrialenergy.com/technology/competitive/> (08.04.2021)

- [I11] https://www.world-nuclear-news.org/NN-Russia_relocates_construction_of_floating_power_plant-1108084.html (05.04.2021)
- [I12] https://www.deutschlandfunk.de/neue-reaktortechnologie-in-sibirien-wird-ein-schwimmendes.676.de.html?dram:article_id=432759 (05.04.2021)
- [I13] <https://bellona.org/news/nuclear-issues/2015-05-new-documents-show-cost-russian-nuclear-power-plant-skyrockets> (05.04.2021)
- [I14] <https://bellona.org/news/nuclear-issues/2015-05-new-documents-show-cost-russian-nuclear-power-plant-skyrockets> (05.04.2021)
- [I15] <https://www.nuscalepower.com/projects/carbon-free-power-project> (05.04.2021)
- [I16] <https://www.powermag.com/nuscale-uamps-kick-off-idaho-smr-nuclear-plant-licensing/>
sowie
<https://www.powermag.com/commercial-nuscale-smr-in-sight-as-uamps-secures-1-4b-for-plant/> (05.04.2021)
- [I17] <https://www.energy.gov/ne/articles/southern-company-and-terrapower-prep-testing-molten-salt-reactor> (20.04.2021)
- [I18] <https://www.terrapower.com/about/> (06.04.2021)
- [I19] <https://www.terrapower.com/our-work/natriumpower/> (06.04.2021)
- [I20] <https://world-nuclear-news.org/Articles/TerraPower,-GEH-introduce-Natrium>
(20.04.2021)
- [I21] <https://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-26554-programme-indicatif-nucleaire-revise-europe.pdf> (05.04.2021)
- [I22] https://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/wp/2018-2020/euratom/h2020-wp1920-euratom_en.pdf (08.04.2021)
- [I23] <https://cordis.europa.eu/project/id/847553/de> (08.04.2021)
- [I24] <https://cordis.europa.eu/project/id/945063> (08.04.2021)
- [I25] <https://cordis.europa.eu/project/id/945234> (08.04.2021)
- [I26] <https://cordis.europa.eu/project/id/755478> (08.04.2021)
- [I27] https://ec.europa.eu/info/events/eu-us-high-level-forum-small-modular-reactors-smr-2019-oct-21_en (08.04.2021)
- [I28] <https://pris.iaea.org/PRIS/home.aspx> (20.10.2021)
- [I29] https://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.811433.de/21-8.pdf
(27.04.2021)
- [I30] <https://taz.de/Kostenexplosion-im-AKW-Flamanville/!5077895/> (05.04.2021)
- [I31] <https://www.energiestiftung.ch/fokus-frankreich-detail/epr-flamanville-vom-vorzeigeprodukt-zum-albtraum-frankreichs.html> (05.04.2021)

- [I32] <http://www.klimaretter.info/energie/hintergrund/24374-fiasko-reaktor-noch-teurer>
(05.04.2021)
- [I33] <https://spectrum.ieee.org/energywise/energy/nuclear/abandoned-nuclear-reactors-fit-a-global-pattern-of-new-build-troubles> (05.04.2021)
- [I34] <https://www.wiseinternational.org/nuclear-monitor/867/vogtles-relieve-snatching-defeat-jaws-defeat> (05.04.2021)
- [I35] <https://www.lazard.com/media/451419/lazards-levelized-cost-of-energy-version-140.pdf>
(05.04.2021)
- [I36] https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/566567/BEIS_Electricity_Generation_Cost_Report.pdf (08.04.2021)
- [I37] https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/911817/electricity-generation-cost-report-2020.pdf (09.04.2021)
- [I38] https://iea.blob.core.windows.net/assets/fa87681d-73bd-4719-b1e5-69670512b614/WEM_Documentation_WEO2020.pdf (05.04.2021)

<https://positionen.wienenergie.at/beitraege/atomkraft-kosten-ohne-ende/>