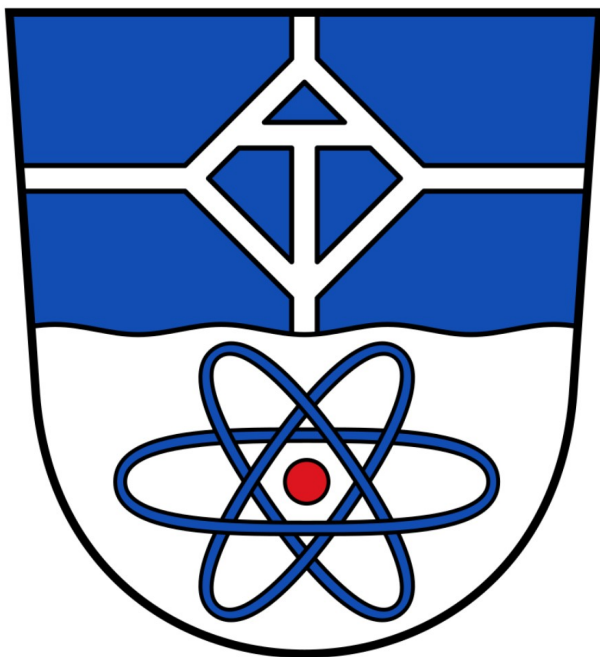


Tyskland utan kärnkraft – ett bokslut ur klimat- och hälsoperspektiv

Den 15:e april 2023 stängde Tyskland ned de tre sista av landets kärnkraftverk och avslutade därmed en drygt 60 år lång kärnkraftsepok. Här ges några resonemang om vad det tyska kärnkraftsprogrammet har bidragit med till Tysklands elproduktion, samt vilken påverkan det haft ur klimat- och hälsosynpunkt.



Stadsvapen för städerna Karlstein am Main (vänster) [1] och Gundremmingen (höger) [2]. Utanför Karlstein am Main låg Kahl, Tysklands första kärnkraftverk för elproduktion, som nådde första kriticitet 1960, samt experimentreaktorn Großwelzheim. I Gundremmingen har det funnits tre reaktorer i drift under åren 1966-2021.

Tysklands kärnkraftsprogram

Det västtyska kärnkraftsprogrammet byggdes upp med ett starkt stöd från den politiska ledningen, och satsningen skedde ofta i form av samarbeten mellan akademien och industrin. Oljekrisen på 1970-talet stärkte den nationella satsningen. Både AEG och Siemens hade kärnkraftsreaktorer som produkter och 1969 bildades KWU (KraftWerk Union) mellan de båda företagen. Samtidigt växte sig kärnkraftsmotståndet i Västtyskland väldigt starkt och haveriet i Tjornobyl 1986 innebar en omsvängning även hos de större politiska partierna. En mer utförlig historik kring det tyska kärnkraftsprogrammet ges exempelvis i World Nuclear Associations databas [3] eller en kortare sammanfattning hos World Nuclear News [4].

De tyska reaktorerna

Tyskland har sedan 1960 haft totalt 36 kärnreaktorer som i någon form har producerat el till samhället, varav 24 är lättvattenreaktorer av västerländsk kokvatten- eller tryckvattenreaktorteknik och där 14 av dem tillverkades av KWU. Östtyskland hade sex stycken reaktorer i form av ryska VVER, där den första togs i drift 1966, och fler var under konstruktion. Alla dessa reaktorer stängdes ned i samband med den tyska återföreningen 1991, och byggprojekten avbröts, eftersom ingen av reaktorerna uppfyllde de säkerhetskrav som gällde i Västtyskland, och deras bidrag till elsystemet räknas inte med här.

Tyskland har också haft reaktorer av andra slag som en del i den nationella satsningen. De flesta av dem har varit relativt små testanläggningar av olika tekniker, men de har alla levererat någon mängd elektricitet till nätet. Här listas de, med åren de varit i drift inom parentes.

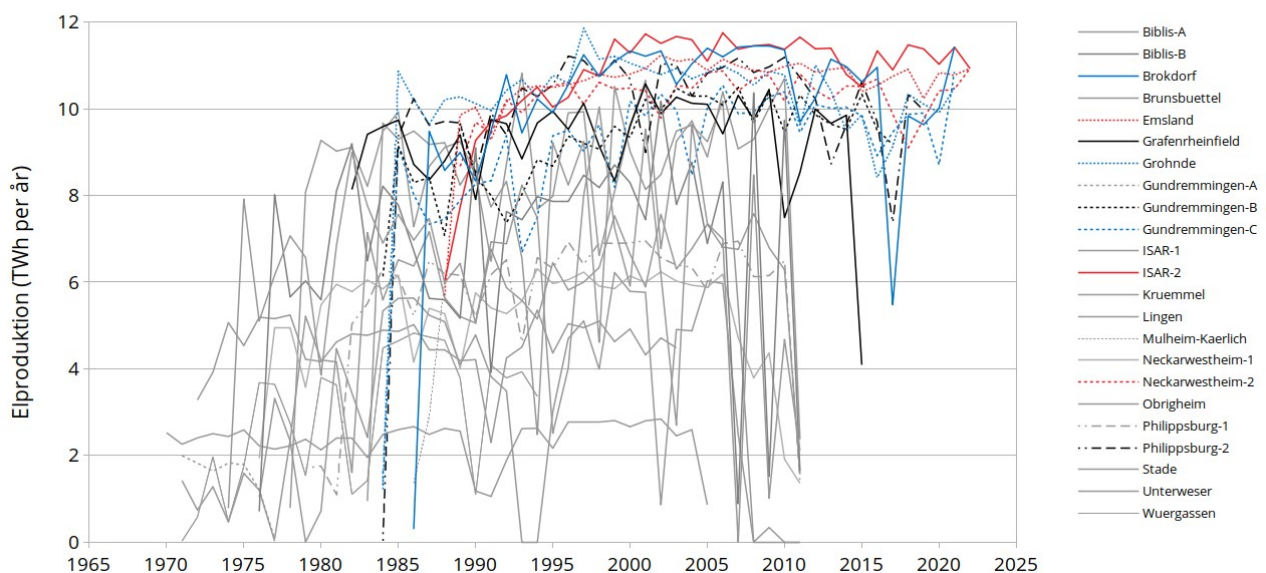
- **HDR Großweilheim:** En kokvattenreaktor med superöverhettad ånga på 25 MWe (1969-1971)
- **AVR Jülich:** En högttemperaturreaktor (pebble-bed) på 13 MWe (1969-1988)
- **THTR-300:** En högttemperaturreaktor (pebble-bed) med toriumbränsle på 296 MWe (1987-1988)
- **MZFR:** En tungvattenmodererad tryckvattenreaktor (PHWR) på 52 MWe (1966-1984)
- **Niederaichbach:** En tungvattenmodererad gaskyld reaktor på 100 MWe (1973-1974)
- **KNK II:** En snabbreaktor på 17 MWe (1979-1991)

Till detta har det funnits totalt 46 forskningsreaktorer av olika slag, varav sex stycken är i drift i dag, men ingen av dem har levererat el till nätet. De första forskningsreaktorerna togs i drift 1957 och den senaste 2005. Forskningsreaktorerna har bland annat använts till grundforskning inom olika ämnesområden, neutronbestrålning av material, medicinska tillämpningar och utbildning [5]. De berörs inte av de politiska besluten om nedläggning av de kraftproducerande reaktorerna.

Kärnkraftens bidrag till den tyska elproduktionen

Totalt har den tyska kärnkraften levererat drygt 5100 TWh elektricitet sedan den första reaktorn, Kahl, kopplades upp till nätet 1961. De första reaktorerna var olika mindre reaktorer under 300 MW elektrisk effekt och det genomfördes initialt många tester, vilket innebar att inte så mycket el levererades under 1960-talet. Efter 1970 togs flera större reaktorer i drift och andelen elektricitet från kärnkraften ökade. Den maximala årsproduktion från kärnkraften var omkring 160 TWh några år kring millennieskiftet, vilket motsvarade upp till 30 procent av den totala elproduktionen. Den totala mängden el från kärnkraft under tidsperioden 1985-2023 uppgår till 22 procent av landets totala elproduktion.

I augusti 2011 stängdes åtta reaktorer permanent efter regeringsbeslut som en reaktion på kärnkraftsolyckan i Japan. En plan för att iverkliga kvarvarande nio reaktorer lades fram, där tre reaktorer stängdes åren 2015-2019, tre vid nyårsafton 2021 och de sista tre skulle stängas vid nyårsafton 2022. På grund av energikrisen i samband med Rysslands anfallskrig mot Ukraina beslöts att de tre sista reaktorerna skulle behållas i drift till 15 april 2023, och därmed underlätta elförsörjningen över vinterhalvåret. Figur 1 visar den årliga elproduktionen för alla reaktorer 1970-2022. Den totala elproduktionen för kärnkraften visas tillsammans med övriga kraftslag för tidsperioden 1985-2022 i figur 3.



Figur 1. Elproduktion för alla tyska kärnkraftverk åren 1970-2022. Linjerna är färgade efter när de lades ned; grå är alla reaktorer fram till augusti 2011, svart är de tre som lades ned 2015-2019, blå de tre som lades ned 2021 och röd de tre sista reaktorerna. Data från IAEA-PRIS [6].

De sista åren

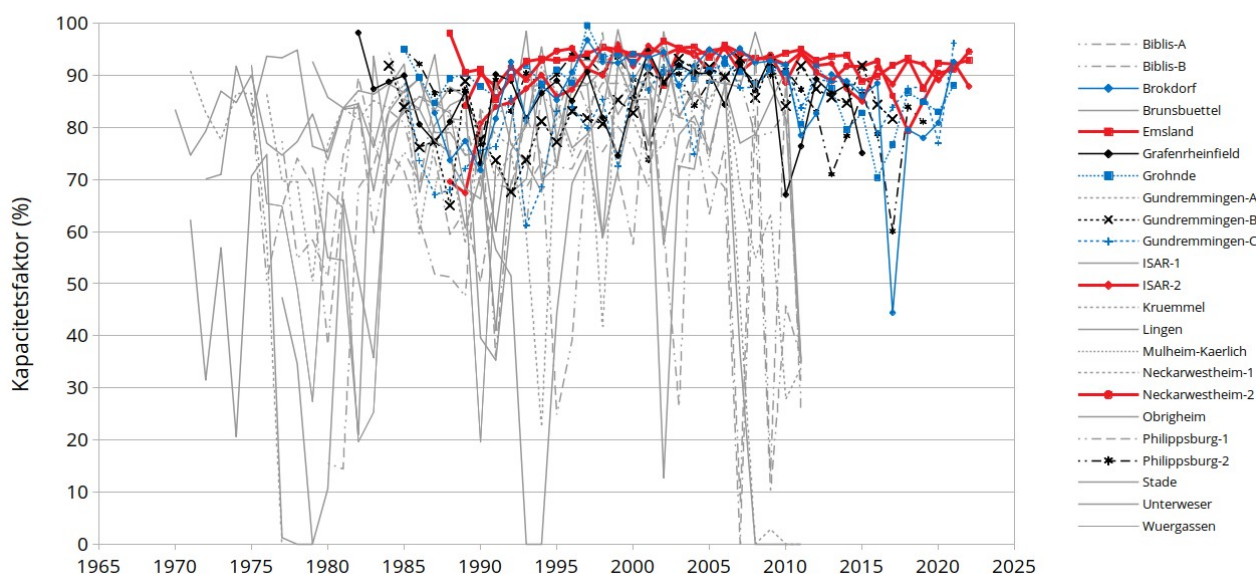
Turordningen för nedläggningarna följde en rationell logik där syftet från den tyska regeringen varit att inte i onödan äventyra elförsörjningen. De har därför valt att stänga reaktorerna i en viss ordning som beaktar två olika aspekter. Först har vi åldersaspekten. De åtta reaktorer som togs ur drift 2011 var de äldsta av de 17 reaktorer som då var i drift, de hade kopplats upp på nätet åren 1975-1980. De tre efterföljande togs ur drift i den turordning de hade startats upp, åren 1982-1985. De tre reaktorer som stoppades nyårsafton 2021 hade satts i kommersiell elproduktion åren 1985-86, och de tre sista hade kopplats upp mot nätet 1988-89.

Den andra aspekten är driftstillförlitligheten, vilken för de tyska reaktorerna överensstämmer mycket väl med deras ålder. Med andra ord, vid design och drift av de yngre reaktorerna har KWU varit duktiga på att ta tillvara driftserfarenheterna från de äldre reaktorerna. De 17 reaktorer som var i drift 2011 var dessutom alla designade av Siemens/KWU, vilket förenklar erfarenhetsåterföringen för drift.

Detta märks inte minst för de tre sista reaktorerna, Emsland, Isar-2 och Neckarwestheim-2, som alla tre är så kallade Konvoireaktorer. Konvoireaktorerna designades av Siemens/KWU baserat på drifterfarenheter från tidigare reaktorer, och introducerade samtidigt säkerhetsförbättringar. Ambitionen var att bygga ett större antal av dem, därav begreppet "konvoj", men på grund av minskad entusiasm för kärnkraft i Tyskland under 1980-talet blev endast tre stycken byggda.

De tre Konvoireaktorerna är av god säkerhetsstandard (jämförbara med de senaste svenska reaktorerna) och designades med beaktande av underhållsaspekter och ett MTO-perspektiv (dvs hur människa och teknik interagerar) [7]. De är dessutom (på samma sätt som svenska kokvattenreaktorer) utmärkta för lastföljning, och kan vid behov ändra effekt med upp till 170 MW per minut. Reaktorerna är moderna ur säkerhetssynpunkt på liknande sätt som Forsmark 3 och Oskarshamn 3 har varit tidiga med vissa säkerhetsfunktioner, och delar av utformningen har legat till grund för European Pressurized Water Reactor (EPR).

I figur 2 visas de tyska reaktorernas driftstillförlitlighet i form av kapacitetsfaktor, dvs den andel el som reaktorerna levererat per år jämfört med den mängd de skulle leverera om det gått vid full effekt alla årets timmar. Det är praktiskt omöjligt för en lättvattenreaktor att nå 100 procent kapacitetsfaktor eftersom de har planerade revisionavställningar för bränslebyten. Undantaget är reaktorer som har bränslebyten i 18- eller 24-månaderscykler och som därmed kan komma upp i 100 procent de år de inte har revision. I figuren syns ganska tydligt hur varje ny generation av de tyska reaktorerna haft en allt högre tillförlitlighet. De tre Konvoireaktorerna, markerade med röda linjer, har haft kapacitetsfaktorer på omkring 90 procent över nästan hela driftstiden, vilket internationellt sett är bra.



Figur 2. Kapacitetsfaktorer för alla tyska kärnkraftverk åren 1970-2022. Linjerna är färgade efter när de lades ned; grå är alla reaktorer fram till augusti 2011, svart är de som lades ned 2015-2019, blå de tre som lades ned 2021 och röd de tre sista reaktorerna. Data från IAEA-PRIS [6].

Positiva effekter av den tyska kärnkraften

Om nedläggningsplanerna följde en viss rationalitet så kan man inte säga samma sak om hänsyn till miljö- och hälsoeffekter av nedstängningarna. En etikkommission tillsattes av den tyska regeringen, i syfte att ge en helhetssyn på den etiska grunden för regeringens beslutsfattande och slutsatser [8]. Kommissionens medlemmar, som bestod av representanter från akademien, affärsvärlden och civilsamhället, tycks ha haft förutfattade meningar om kärnkraftens risker. I en passage av kommissionens rapport står det, utan källhänvisningar, att "nästan alla vetenskapliga studier kommer fram till att förnybar energi och förbättrad energieffektivisering innebär lägre hälso- och miljörisker än kärnenergi." Rapporten är också förlåtande kring de negativa aspekterna av fortsatt användning av fossil energi, med rekommendationen att de moderna kolkraftverk som var under konstruktion skulle färdigställas och användas. Hälsoeffekter på grund av luftföroreningar utvärderas inte alls i etikkommissionens rapport trots att den uttryckligen hävdar att sådana aspekter behöver tas hänsyn till.

Minskad klimatpåverkan

Som nämnts ovan har den tyska kärnkraften levererat drygt 5100 TWh elektricitet sedan den första reaktorn togs i drift. Under antagandet att all denna el har ersatt motsvarande mängd el från kolkraft innebär det att den tyska kärnkraften har bidragit till att undvika utsläpp av omkring 5 Gton (en Gigaton är detsamma som tusen miljoner ton) med koldioxidekvivalenter [9]. Om istället all denna el hade kommit från fossilgas hade det inneburit ca 2,5 Gton med koldioxidekvivalenter. För jämförelse är Tysklands årliga klimatutsläpp ca 650 miljoner ton och Sveriges årliga utsläpp strax under 50 miljoner ton. De globala utsläppen är omkring 35 Gton per år. Den tyska kärnkraften har alltså medfört att man undvikit utsläpp av klimatgaser motsvarande 4-8 år av tyska utsläpp, eller motsvarande 50-100 år av Sveriges klimatutsläpp. Eftersom ungefär 80 procent av den fossila elförsörjningen under tidsperioden kommit från kolkraft är det rimligt att anta att de minskade utsläppen ligger i den övre halvan av de uppskattade intervallen.

Bättre hälsa och räddade liv

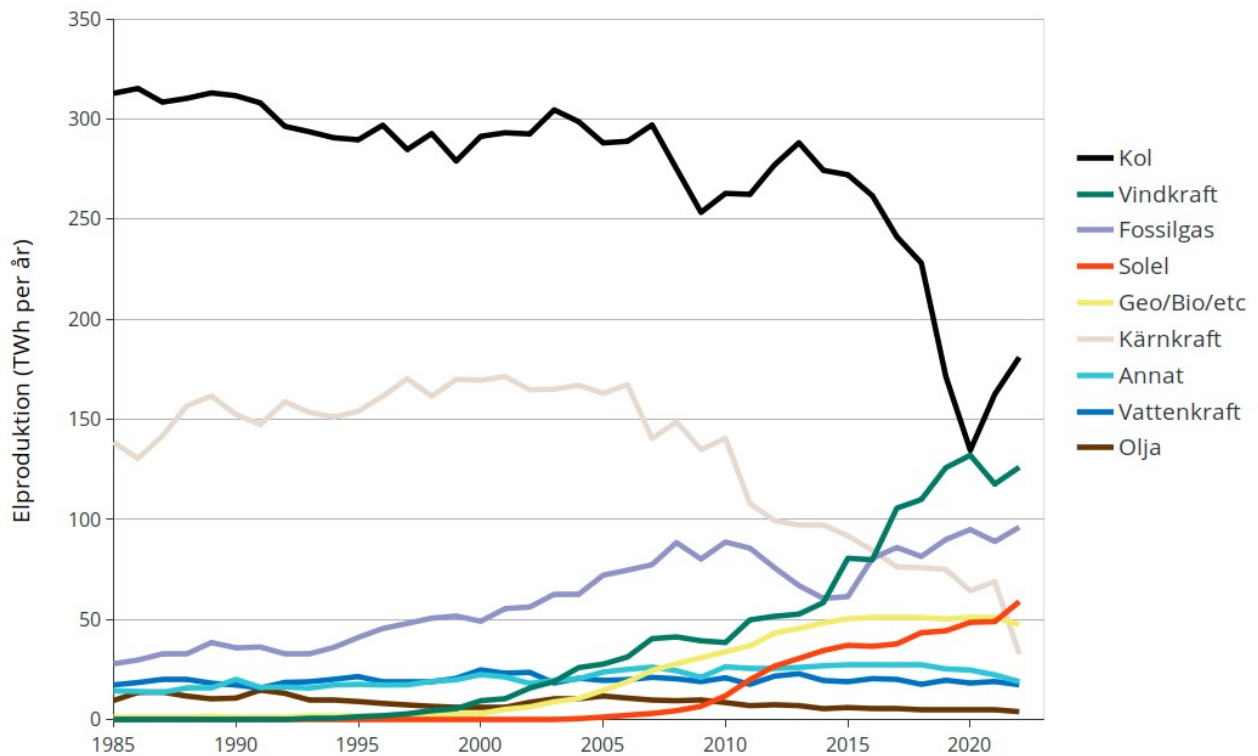
För hälsoeffekter på grund av minskade luftföroreningar har den tyska kärnkraften, lågt räknat, räddat över 100 000 liv, och det minskade antalet allvarliga skador i form av lungsjukdomar och andra hälsoeffekter kan räknas i över en miljon. Uppskattningen är baserad på samma antagande som ovan om fördelningen av de fossila kraftslagen under tidsperioden. Data för hälsoeffekter, räknat i antal dödsfall och skadade per TWh, kommer från en studie i The Lancet [10].

Det finns flera studier som tittar på hur många dödsfall som skulle undvikas om Tyskland behöll sin kärnkraft. Kharecha och Sato uppskattar att en fortsatt användning av kärnkraft på 2017 års nivå, dvs med sju reaktorer kvar i drift, skulle spara omkring 1000 liv per år på grund av minskade utsläpp från fossila bränslen fram till 2035 [11]. Samma studie kommer fram till minskade klimatutsläpp på i genomsnitt 60 miljoner ton per år fram till 2035. Studien har tagit hänsyn till att mängden el från sol och vindkraft ökar. Jarvis och medförfattare uppskattar att utfasningen av kärnkraft i medeltal lett till 800 extra dödsfall per år under tidsperioden 2012-2017, och ökade klimatutsläpp motsvarande drygt 25 miljoner ton koldioxidekvivalenter per år [12]. Den lägre besparingen av klimatutsläpp jämfört med studien av Kharecha och Sato beror bland annat på att utbyggnaden av förnybart i studien antagits vara lägre om kärnkraften hade varit kvar.

Det är viktigt att påpeka att hälsoeffekter i Tyskland på grund av luftföroreningar inte enbart har att göra med fossilanvändning för elproduktion, flera tusen dödsfall per år uppskattas från övrig fossilanvändning inom industri, transporter och annan energianvändning [13]. På samma sätt hade Tysklands beroende av fossilgas varit fortsatt problematiskt även om kärnkraften hade funnits kvar då den stora majoriteten av gasen används till annat än elproduktion.

De tyska planerna ligger fast

I diskussionen om utfasningen av kärnkraften hävdas ibland att Tysklands stora satsning på sol och vind ger mer el än den som förlorats från kärnkraften. Detta är helt korrekt, men det förenklar inte utfasningen av de fossila bränslena ur elförsörjningen då man även måste beakta behovet av elförsörjning vid de tillfällen då sol eller vind inte kan bidra. Det finns dock ambitiösa planer på att klimatutsläppen från elförsörjningen ska minska. 2020 beslutades om en gradvis utfasning av kolkraft från det tyska energiförsörjningen fram till år 2038. Beslutet följdes av ett uttalande om en "säker, billig, effektiv och klimatvänlig elförsörjning till allmänheten" som det överordnade villkoret för utfasningen. Huruvida detta verkligen går att uppnå är oklart, och data fram till 2022 är lite svåra att tolka eftersom pandemin gav en rejäl minskning av kolkraften som sedan åter ökade 2021, se figur 3.



Figur 3. Tysklands elförsörjning uppdelad på olika kraftslag för tidsperioden 1985-2022. Data från BP Statistical Review of World Energy [14] och Our World in Data [15].

Konsekvenserna för energiförsörjningen som följt av det ryska kriget mot Ukraina har försvårat situationen. Under hösten 2022 har energikrisen lett till en omprövning där ett antal kolkraftverk, både för fjärrvärme och elproduktion, åter har tagits i bruk i syfte att minska gasbehovet. Totalt är det omkring 7 GW installerad effekt som har aktiverats [16]. Samtidigt lägger Tyskland och flera andra europeiska länder mycket resurser på att ersätta den ryska gasen med leveranser från andra länder. En nära förestående utfasning av de fossila bränslena tycks alltså inte vara aktuell, och huruvida Tyskland kommer att klara sina klimatåtaganden återstår att se. En fortsatt användning av kärnkraft hade inte löst problemet på egen hand, men hade reducerat omfattningen av energikrisen, sparat människoliv, och påverkat elpriserna både i Tyskland och i grannländerna.

Det är i dag väldigt svårt att se en tysk omsvängning i kärnkraftsfrågan, men opinionsundersökningar i Tyskland visar på att de tillfrågade på senare tid har motsatt sig att de sista reaktorerna skulle stängas. De är också tveksamma till att det tyska energibehovet kommer kunna täckas av enbart förnyelsebara kraftslag [17]. Tiden får utvisa om ett farväl till den tyska kärnkraften istället bör tolkas som ett "Auf Wiedersehen".

Författare: Mattias Lantz – Uppsala universitet

Granskning: Tomas Öhlin – Westinghouse

Källor och kommentarer

1. Wikipedia, "[Karlstein am Main](#)", besökt 30 april 2023.
2. Wikipedia, "[Gundremmingen](#)", besökt 30 april 2023.
3. "[Nuclear Power in Germany](#)", World Nuclear Association, besökt 30 april 2023.
4. "[A guide: The end of Germany's nuclear power](#)", World Nuclear News, 14 april 2023.
5. "[Research reactors](#)", Federal Office for the Safety of Nuclear Waste Management, besökt 30 april 2023.
6. IAEA, "[Power Reactor Information System](#)", besökt 30 april 2023.

7. J. Czech et al., "[Technical information on design features of Siemens Konvoi PWR](#)", sid 145-170 i "Review of design approaches of advanced pressurized LWRs", IAEA-TECDOC-861, IAEA, 1996.
8. "[Deutschlands Energiewende – Ein Gemeinschaftswerk für die Zukunft](#)", Ethik-Kommission Sichere Energieversorgung, Bundesregierung, maj 2011.
9. Uppskattningarna baseras på de data som IPCC använder sig av, se följande skrift för resonemang och data. M. Lantz och C. Hellesen, "[Klimatkalkyl för fyra stängda reaktorer](#)", Analysgruppen, 2016.
10. A. Markandya och P. Wilkinson, "[Electricity generation and health](#)", The Lancet 370 (2007) 979-990.
11. K. Pushker och M. Sato, "[Implications of energy and CO₂ emission changes in Japan and Germany after the Fukushima accident](#)", Energy Policy 132 (2019) 647-653.
12. S. Jarvis, et al., "The Private and External Costs of Germany's Nuclear Phase-Out", Journal of the European Economic Association 20, Issue 3 (2022) 1311–1346. Preprint tillgängligt [här](#).
13. Världsnaturfonden m.fl., "[Europe's dark cloud: How coal-burning countries make their neighbours sick](#)", WWF European Policy Office, Sandbag, CAN Europe and HEAL in Brussels, Belgium, Juni 2016.
14. BP, "[Statistical Review of World Energy](#)", 2022.
15. Our World in Data, "[Electricity production by source, Germany](#)", besökt 30 april 2023.
16. "[Coal power stations return to electricity market](#)", SMARD – Electricity market data for Germany, Bundesnetzagentur, 21 november 2022.
17. NTV, "[Bundesbürger hängen an Erdgas und Atomenergie](#)", 28 mars 2023.