

Transformacja systemu energetycznego w Niemczech: *Energiewende* – faza druga

Energy system transition in Germany:
Energiewende – second phase

Michael Kranhold

50Hertz Transmission GmbH, Berlin, Niemcy

mail: Michael.Kranhold@50hertz.com

ORCID: 0000-0002-6780-1879

Zbigniew A. Styczyński

Otto-von-Guericke-University Magdeburg, Niemcy

mail: sty@ovgu.de

ORCID: 0000-0002-1052-9245

Abstract

The second phase of the *Energiewende* will fully integrate renewable energy sources and adapt the power generation base to fuel production and use of renewable fuels based on H₂, which will enable the sector coupling. The energy mix for the 2050s is clear: wind, solar, biomass and water will be the primary sources of energy, with hydrogen power plants serving as backup and supply – the latter in times of windless and cloudy skies. Will this admittedly rather futuristic vision become reality? The new government in Germany, in its coalition agreement, has fully committed itself to this goal and has made the *Energiewende* a priority task for the coming term and the following decades. These goals were reaffirmed in the so-called "Easter Package." This article refers to an earlier paper in 2016 and discusses some of the technical aspects of the second phase of the *Energiewende* from the perspective of the authors' experience.

Keywords – electric energy system, energy transition, renewable energy, energy mix, *Energiewende*

Artykuł ten bazuje na opublikowanym 28 marca 2022 roku na portalu BiznesArt opracowaniu autorów dotyczącym umowy koalicyjnej [17].

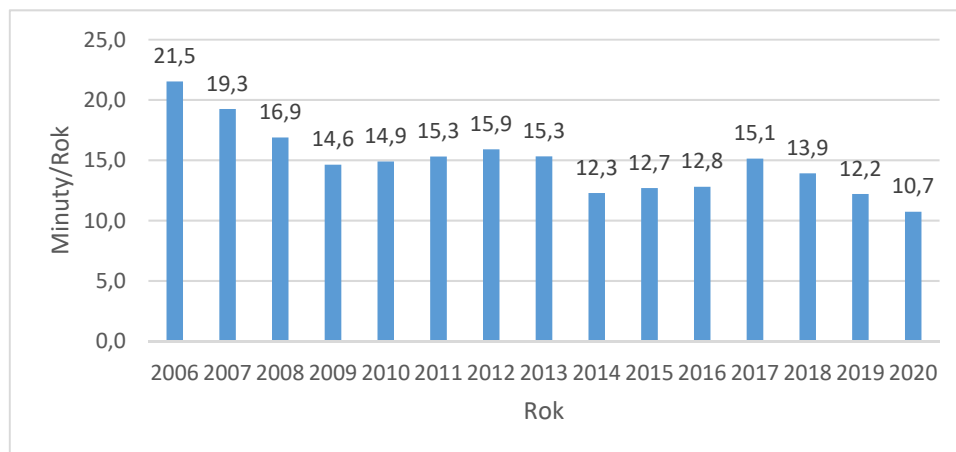
1. Transformacja energetyczna

1.1. Wprowadzenie

W roku 2016 ukazał się w tym czasopiśmie nasz pierwszy artykuł na temat transformacji energetycznej w Niemczech [1], podsumowujący pierwszy etap tych przemian. To zaledwie sześć lat temu. W tym okresie wiele się wydarzyło. Transformacja energetyczna stała się strategią globalną, a dzięki Porozumieniu Paryskiemu nabrała formalnie ogólnoświatowego charakteru. Unia Europejska potwierdziła swoją znaczącą rolę w tym procesie, ogłaszając program *fit-for-55*, który oznacza, że do roku 2030 zostanie osiągnięta redukcja emisji gazów cieplarnianych o 55% w porównaniu z rokiem 1990. Nowy rząd niemiecki wybrany jesienią 2021 roku ogłosił w umowie koalicyjnej bardziej rygorystyczne plany w odniesieniu do celów ekologicznych i wreszcie rosyjska agresja na Ukrainę pokazała, że walka o zasoby energetyczne odgrywa ważną rolę także w działaniach politycznych np. Rosji, czemu przez lata usilnie zaprzeczano, nazywając takie projekty jak Nord Stream 2 czysto komercyjnymi.

Drugi etap transformacji energetycznej w Niemczech (patrz rys. 4), którego celem było ustalenie metod i zasad integracji odnawialnych źródeł energii (OZE) z systemem energetycznym, dobiega aktualnie końca. Wydaje się, że cel ten został osiągnięty. W Niemczech średnia produkcja energii z OZE w roku 2021 wyniosła około 42%. Oznacza to, że było wiele okresów, w których generacja z OZE była bliska 100% zapotrzebowania na moc. Oczywiście podjęto liczne działania inwestycyjne, prawne i organizacyjne, aby zapewnić pełną integrację takiego potencjału OZE z siecią. Dowodem na słuszność podjętych działań jest fakt, że nie wystąpiły żadne widoczne efekty wskazujące na niewłaściwą pracę systemu w tych nowych warunkach. Zarówno parametry pracy systemu, zakres zmienności częstotliwości i napięcia, jak i ogólna niezawodność dostaw energii do odbiorców końcowych pozostały na tym samym, wysokim poziomie.

Ten ostatni parametr przedstawiono dla lat 2006-2020 na rysunku 1 poprzez porównanie wskaźnika SAIDI_{EnWG}, który wskazuje średnią przerwę w dostawie energii przypadającą na przyłączonego odbiorcę końcowego w roku kalendarzowym.



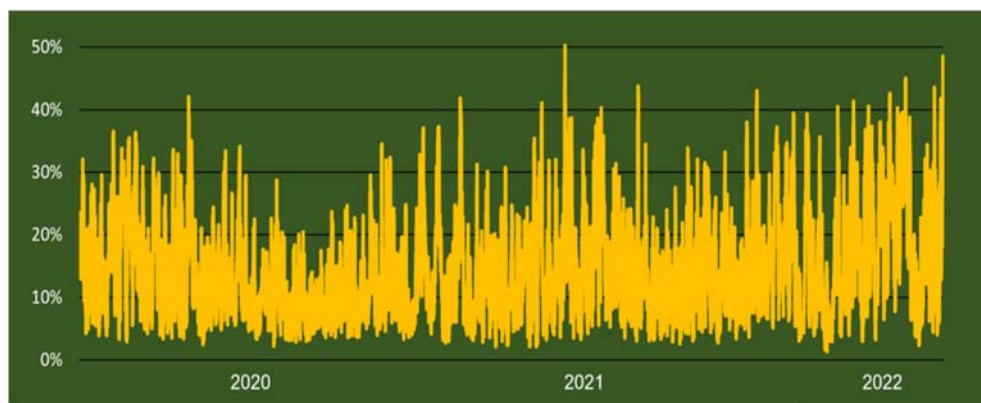
Rysunek 1. SAIDI_{ENWG} (System Average Interruption Duration Index) w Niemczech w latach 2006-2020

Źródło: [2].

Na rysunku 1 widać wyraźnie, że wartości współczynnika SAIDI od lat pozostają w niezmiennym przedziale i raczej zaobserwować można lekką tendencję spadkową jego wartości.

Pozytywnym zjawiskiem jest to, że również Polska poczyniła w ostatnich latach znaczne postępy w zakresie integracji OZE z systemem energetycznym. Szczególnie intensywnie rozwinął się rynek fotowoltaiczny [3], ale również energetyka wiatrowa zaczęła odgrywać znaczącą rolę w systemie. Świadczy o tym fakt, że 28 marca 2022 roku łączna generacja energii z OZE wynosiła prawie 10 GW, co oznacza prawie 50% pokrycie zapotrzebowania na moc w danej jednostce rejestracji mocy (15 minut).

Tendencję wzrostową udziału OZE w generacji energii elektrycznej w Polsce można zaobserwować na wykresie przedstawionym na rysunku 2. Widać wyraźnie, że o ile w latach 2019-2021 udział OZE wynosił średnio około 10%, to obecnie wzrósł do ponad 20%, a nierzadko w niektórych okresach godzinowych osiąga nawet 40%. Są to zachęcające wyniki, które pokazują, że nie tylko w ostatnich latach nastąpił znaczny wzrost ilości zainstalowanej mocy z OZE, ale także, że łatwo jest zintegrować tę już znaczną moc do systemu energetycznego bez żadnych, wcześniej przewidywanych, zakłóceń w jego pracy.



Rysunek 2. Udział elektrowni wiatrowych i słonecznych w pokryciu zapotrzebowania Polski na energię elektryczną

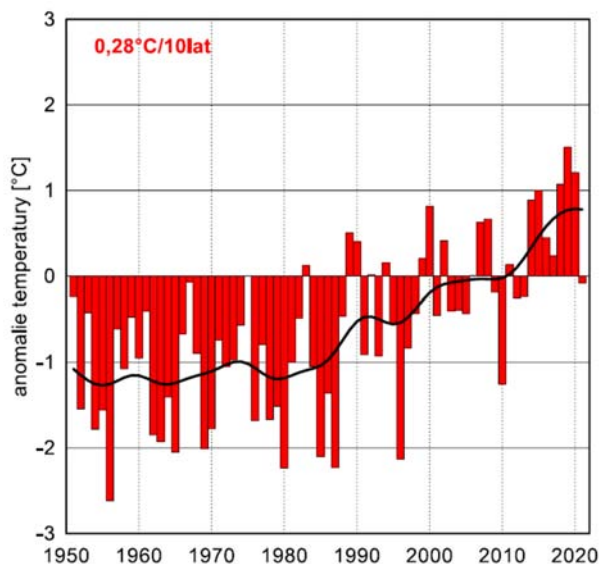
Źródło: [22]

1.2. Zmiany klimatyczne przyczyną transformacji energetycznej

Pierwsze „oficjalne” sygnały, że intensywna działalność człowieka (industrializacja) będzie miała negatywny wpływ na klimat naszej planety, zostały przedstawione w tzw. raporcie Klubu Rzymskiego, który ukazał się w roku 1972 pod znamienym tytułem *Granice wzrostu* [4]. W tym roku obchodzimy 50. rocznicę opublikowania tego raportu, który w tamtym czasie spotkał się również z niezrozumieniem u wielu osób. W tamtym czasie trudno nam było sobie wyobrazić, że rozwój industrializacji i wzrost liczby ludności pójdą w rzeczywistości tak daleko w kierunku opisanym w tym raporcie. Dziś możemy powiedzieć, że przewidywany rozwój (zużycie energii, liczba ludności itd.) poszedł jeszcze dalej. Nie dziwi więc, że nawet te bardzo futurystyczne prognozy można dziś uznać za trafne.

Po opublikowaniu kolejnego opracowania Klubu Rzymskiego zatytułowanego *Wielkie opracowanie* [5] wiemy, że żyjemy w przeludnionym (przepełnionym) świecie. Oznacza to, że mieszkańcy Ziemi zużywają rocznie prawie dwukrotnie więcej zasobów, niż ziemia organicznie odnawia w tym samym okresie. To, co jeszcze 50 lat temu było dla wielu –

w tym dla autorów tego artykułu – odległą fikcją, dziś przyjmowane jest z obawą (patrz rysunek 3).



Rysunek 3. Seria anomalii średniej rocznej temperatury powietrza w Polsce

Źródło: [6].

W ostatnich latach dowody na zmiany klimatyczne na ziemi stały się tak silne, że praktycznie wszystkie kraje starają się zmienić swoje systemy energetyczne, aby ograniczyć emisje gazów cieplarnianych, głównie CO₂. Transformacje energetyczne, jak nazywane są te procesy, mają różne oblicza, ponieważ dotyczą konkretnych systemów krajowych, które rozwijały się indywidualnie przez lata. Wspólną cechą wszystkich tych przemian jest jednak dążenie do ograniczenia emisji szkodliwych gazów (CO₂ i innych), a tym samym osiągnięcie bezemisyjnej gospodarki energetycznej. Jest kwestią sporną, czy jest to w ogóle możliwe i co należy rozumieć przez bezemisyjne wytwarzanie energii lub system zerowej emisji netto (net-zero), ale w każdym przypadku celem jest drastyczne ograniczenie emisji. Jeśli chodzi o klimat, ogromna większość ludzi dostrzega związek między emisjami a niekorzystnymi zmianami klimatycznymi i, jak w przypadku pandemii koronawirusów, pokłada wielką wiarę w ogólnie przyjęte prognozy, które wskazują drogę do poprawy klimatu (porównaj rys. 3).

Energiewende to słowo-synonim, którym od lat określa się drogę transformacji energetycznej w Niemczech. Trudno powiedzieć, kiedy termin *Energiewende* się przyjął. Różne źródła podają lata 80. zeszłego wieku, ale w rzeczywistości proces ten rozpoczął się w latach 90. od wprowadzenia w roku 1991 ustawy o sieciach elektroenergetycznych z gwarantowanymi przyłączeniami do sieci i taryfami gwarantowanymi. Katastrofa w Fokushimie w roku 2011 uważana jest za ostateczny punkt zwrotu w polityce energetycznej Niemiec i oficjalny początek *Energiewende*. Rozwój OZE jest podstawowym filarem transformacji energetycznej. W tym kontekście skutecznym instrumentem promocji energii elektrycznej z odnawialnych źródeł energii była ustawa o odnawialnych źródłach energii (EEG), która po raz pierwszy weszła w życie w roku 2000 i od tego czasu jest stale rozwijana (EEG 2004, EEG 2009, EEG 2012, nowelizacja PV, EEG 2014, EEG 2017).

1.3. Elementy transformacji energetycznej *Energiewende*

Cele ustawy EEG w Niemczech były następujące [7]:

- zrównoważony rozwój energetyczny,
- obniżenie kosztów produkcji energii z odnawialnych źródeł energii,
- oszczędzanie paliw kopalnych,
- zachęty dla rozwoju technologii energii odnawialnej.

Mechanizmy uruchamiane przez tę ustawę są następujące:

- zobowiązanie niemieckich operatorów sieci do zapewnienia dostępu i wprowadzania do sieci energii elektrycznej z odnawialnych źródeł energii w sposób bardziej korzystny niż energii elektrycznej z innych źródeł energii (w szczególności z węgla kamiennego, brunatnego i jądrowego; elektrownie kogeneracyjne traktowane są równorzędnie z odnawialnymi źródłami energii),
- stałe taryfy gwarantowane wypłacane wytwórcom od momentu, gdy po raz pierwszy wprowadzą energię elektryczną do sieci, przez okres do 20 lat,
- coroczne obniżanie taryf gwarantowanych dla nowych elektrowni OZE jako zachęta do innowacji.

Transformacja energetyczna *Energiewende* jest bardzo złożonym i długotrwałym procesem. Jeśli przyjmiemy, że elektrownię planuje się i buduje przez ponad 8 lat, a okres zwrotu nakładów wynosi około 30 lat, to oczywiste jest, że przekształcenie systemu

elektroenergetycznego musi zająć wiele lat. Myśląc w takiej perspektywie czasowej, sukces transformacji energetycznej wymaga współpracy wszystkich sił ze sfery polityki, nauki i biznesu, a także społecznej akceptacji międzypokoleniowej. Jeśli spojrzymy na *Energiewende*, która trwa już de facto ponad 30 lat i zajmie kolejne 25-30 lat, całkowity okres czasu wynosi ponad 60 lat, co odpowiada mniej więcej okresowi formowania się dzisiejszego systemu elektroenergetycznego, którego początki sięgają roku 1890 (pierwsza elektrownia Niagara i pierwsze linie przesyłowe 30 kV), a który w latach 60. XX wieku został faktycznie rozwinięty do dzisiejszej postaci.

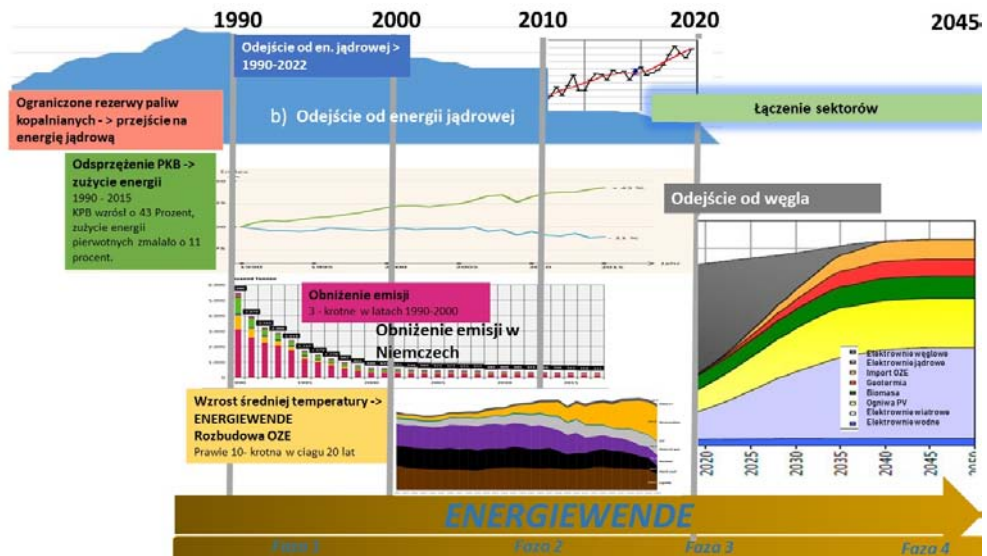
W procesie *Energiewende* można ogólnie wyróżnić cztery fazy, które nakładają się na siebie tak, że trudno jest je jednoznacznie od siebie oddzielić [8; 9]:

- Faza 1 – lata 1985-2015. Rozwój podstawowych technologii i pierwszych zastosowań w celu zmniejszenia emisji o 25%¹.
- Faza 2 – lata 2015-2024. Integracja systemu energii odnawialnych, cel: redukcja emisji o 25-55%.
- Etap 3 – lata 2025-2060. Paliwa syntetyczne oparte na odnawialnych źródłach energii, cel: redukcja emisji o 55-85%.
- Etap 4 – lata 2045-2080 Dekarbonizacja przemysłu, cel: redukcja emisji o 85-100%.

Fazy te przedstawiono bardziej szczegółowo na rysunku 4, gdzie zaznaczono również najważniejsze decyzje cząstkowe. Niniejszy artykuł nie omawia szczegółowo tych faz. Aby uzyskać wyczerpujące informacje na ten temat, polecamy naszą książkę [8].

Wychodząc od miksu energetycznego z lat 90. XX wieku, w którym dominowały paliwa kopalne uzupełniane energią jądrową (jako energia dla pokrycia obciążenie podstawowego), działania w ramach transformacji *Energiewende* dążą do osiągnięcia w roku 2045 miksu energetycznego opartego na źródłach odnawialnych (głównie wiatr, fotowoltaika, biomasa i wodór) wspomagane turbinami gazowymi zasilanymi zielonym wodorem. Turbiny te służą jako „zasilanie awaryjne” w mikście generacyjnym podczas tzw. „ciemnych flaut” oraz jako zasilanie uzupełniające w okresach niewystarczającej produkcji energii elektrycznej z odnawialnych źródeł energii.

¹ Redukcje emisji odnoszą się do roku bazowego, w tym przypadku 1990.



Rysunek 4. Fazy transformacji energetycznej *Energiewende*

Źródło: [8], tłumaczenie autorów.

Oczywiście odchodzenie od technologii kopalnych i jądrowych w produkcji energii może być jedynie stopniowe i dokonuje się, ale tylko wtedy, gdy energia wytwarzana przez nowe odnawialne źródła energii może zastąpić energię utraconą na wskutek planowego zamknięcia elektrowni jądrowych wzg. węglowych.

W dyskusji pojawia się czasem wątpliwość, czy decydenci są świadomi tego faktu i czy potrafią odróżnić moc od energii? Wydaje się, że po 30 latach transformacji energetycznej argument ten stracił swoją prowokacyjną wartość. Ogólnie rzecz biorąc, należy założyć, że ostatecznie to nie polityka, lecz przemysł energetyczny jest odpowiedzialny za bezpieczne funkcjonowanie systemu i nigdy nie zdecyduje się na stworzenie deficytu mocy, energii lub energii kontrolnej. Obliczenia statyczne i dynamiczne, które poprzedzają każdą zmianę w projekcie sieci, są obecnie niezwykle dokładne, ponieważ wszyscy operatorzy systemu przesyłowego (OSP) posiadają szczegółowe modele swoich sieci i symulują ich pracę nie tylko w sytuacjach normalnych, ale również w sytuacjach awaryjnych i ponadkrytycznych. Te często tysiące obliczeń są analizowane przez ekspertów (nie polityków) i dopiero wtedy możliwe są zmiany w miksie wytwórczym.

Trudno też sobie wyobrazić, aby polityk chciał tu narzucić swoją wolę, bo doprowadzenie do blackoutu systemu energetycznego jako struktury prawdziwie krytycznej byłoby równoznaczne z politycznym samobójstwem.

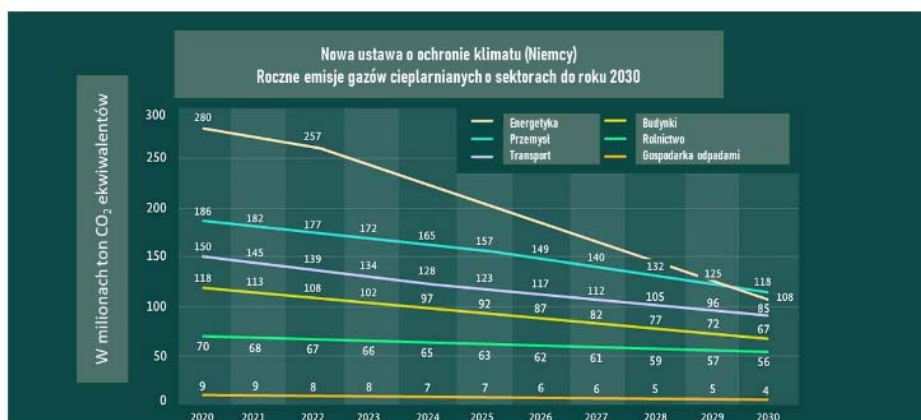
W tym kontekście należy również rozumieć społeczno-polityczny konsensus w ramach transformacji energetycznej w Niemczech, dotyczący wyłączenia elektrowni węglowych i jądrowych. Odbywa się to zgodnie z planem (energia jądrowa do roku 2022, węgiel do 2035 – obecnie rozważane jest przyspieszenie do roku 2030), ale tylko wtedy, gdy dostępna jest wystarczająca ilość nowej mocy wytwórczych w odnawialnych źródłach energii lub, w przypadku Niemiec, w elektrowniach gazowych.

Jest oczywiste, że transformacja energetyczna jest zadaniem globalnym. Jednocześnie, ze względu na bardzo indywidualną konstrukcję systemu elektroenergetycznego i specyficzne zapotrzebowanie na energię, poszczególne kraje muszą same decydować o szczegółowym kierunku działań. W tym kontekście (transformacja energetyczna jest zadaniem globalnym) konieczna jest ocena szeregu porozumień zawartych wcześniej (Protokół z Kioto z roku 1998) lub ostatnio (Porozumienie Paryskie z roku 2018), określających cele dla poszczególnych krajów lub regionów.

Ważnym tego elementem było europejskie porozumienie, znane jako fit-for-55%, dotyczące ograniczenia emisji CO₂ o 55% do roku 2030, czyli wcześniej niż zakładały to wytyczne ogólne. Europa chce i musi dawać dobry przykład, zwłaszcza krajom rozwijającym się. Te zmiany w strategii doprowadziły również do tego, że niemiecki Trybunał Konstytucyjny za poprzedniego rządu (rząd Angeli Merkel) zwrócił się do rządu o rewizję planów ochrony klimatu, które zostały przyjęte w czerwcu 2021 roku. Ustawa ta przesuwająca cel neutralności klimatycznej o pięć lat, do roku 2045, a drogę do niego wyznaczają wiążące cele na lata 20. i 30. bieżącego wieku.

Cel pośredni na rok 2030 został zwiększony z obecnych 55 do 65% redukcji emisji gazów cieplarnianych w porównaniu z rokiem 1990. Do roku 2040 obowiązuje nowy cel pośredni w postaci 88% redukcji emisji. W ten sposób wysiłki na rzecz ochrony klimatu do roku 2045 zostaną sprawiedliwie rozdzielone między dzisiejsze i przyszłe pokolenia. Niedawno niemiecki rząd przyjął w ramach budżetu na rok 2022 program inwestycyjny na rzecz ochrony klimatu, który wyznacza szczegółowy kurs dla tego nowego celu. Rysunek 5 przedstawia cele, które rząd Merkel wyznaczył sobie jeszcze w roku 2021, aby zredukować emisję CO₂ do roku 2030. Ustawa ta przewiduje wiążące cele roczne wraz z obszarami odpowiedzialności w różnych właściwych departamentach:

- Sektor energetyczny: z 280 mln ton CO₂ w roku 2020 do 108 mln ton w 2030.
- Sektor przemysłowy: z 186 mln ton CO₂ w roku 2020 do 118 mln ton w 2030.
- Sektor transportu: z 150 mln ton CO₂ w roku 2020 do 85 mln ton w 2030.
- Sektor budowlany: z 118 mln ton CO₂ w roku 2020 do 67 mln ton w 2030.
- Sektor rolniczy: z 70 mln ton CO₂ w roku 2020 do 56 mln ton w 2030.
- Gospodarka odpadami i inne sektory: z 9 mln ton CO₂ w roku 2020 do 4 mln ton w 2030.



Rysunek 5. Wiążące roczne cele klimatyczne dla Niemiec na mocy ustawy z roku 2021 (punkty danych interpolowane dla celów ilustracyjnych)

Źródło: [20], © BMU, tłumaczenie autorów tłumaczenie autorów.

Nowością jest również cel ochrony i poprawy tzw. naturalnych pochłaniaczy, takich jak lasy i torfowiska. Są one potrzebne do zrównoważenia w zasadzie nieuniknionych emisji gazów cieplarnianych, np. pochodzących z hodowli zwierząt lub niektórych procesów przemysłowych. Rozwój tych obszarów wymaga długiego czasu realizacji. Dlatego też rząd niemiecki już teraz zaczyna inwestować w ponowne nawadnianie torfowisk oraz konieczną przebudowę i powiększanie lasów.

Z punktu widzenia eksploatacji sieci elektroenergetycznych integracja energii odnawialnych na obecną skalę wymagała rozwiązania wielu nowych problemów. Nie wszystkie z tych problemów były znane na początku transformacji energetycznej, lecz pojawiały się stopniowo wraz ze wzrostem udziału odnawialnych źródeł energii w koszyku

energetycznym. Na samym początku, w latach 90. XX wieku, główną rolę odgrywały warunki przyłączenia, które ostatecznie zostały określone w wytycznych VDE/FNN. Kolejne wydania tych wytycznych dla niskiego VDE-AR-N 4105, średniego VDE-AR-N 4110 i wysokiego VDE-AR-N 4120 uwzględniają już europejskie przepisy dotyczące przyłączania generatorów do sieci, Network Code „Requirements for Generators” (RfG).

Poniżej jako przykłady przedstawiono niektóre z najważniejszych nowych rozwiązań i wynikających z nich niezbędnych dostosowań do praktyk sieciowych wynikających z integracji coraz większej liczby odnawialnych źródeł energii w sieci:

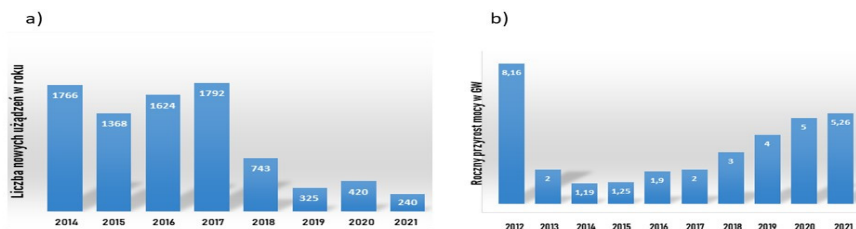
- Procedura FRT (*Fault ride through*) określająca zachowanie się OZE w przypadku zwarcia w sieci – konieczność wspierania obniżania napięcia od roku 2009 część wytycznych dotyczących warunków przyłączenia
- Procedura 50,2 Hz i 49,5 Hz – nowe koncepcje systemowe wprowadzona w 2011 i 2015 roku dla powolnego wyłączania wytwarzania energii elektrycznej z odnawialnych źródeł energii, głównie PV, w przypadku przekroczenia określonych progów częstotliwości jako część rozporządzenia w sprawie stabilności systemu (SysStabV).
- Włączenie energii elektrycznej z OZE do rynku energii – tzw. opłata wyrównawcza jako część opłaty za energię, zawarta w pierwszej ustawie o odnawialnych źródłach energii (EEG 2000) – służyła uregulowaniu stałego wynagrodzenia za wytwarzanie ekoproduktów, które stopniowo były sprzedawane na rynku. Obecnie duża część energii elektrycznej wytwarzanej w OZE nie podlega opłacie stałej i jest sprzedawana bezpośrednio na giełdzie po tańszych cenach. Zgodnie z zapowiedzią rządu, opłata ma zostać wycofana z rynku do końca 2023 roku.
- Dokładne prognozy pogody/prognozy wytwarzania energii z OZE – wraz ze wzrostem wytwarzania energii z OZE, prognozy pogody i wynikające z nich prognozy wytwarzania energii z OZE zyskały na znaczeniu. Obecnie stosowane metody prognozowania, oparte na metodach AI (sieci neuronowych), charakteryzują się średnim odchyleniem poniżej 2% dla okresów 4-godzinnych. Operatorzy sieci zazwyczaj korzystają z kilku systemów prognozowania OZE i wykorzystują wyniki tych obliczeń do określenia optymalnej pracy sieci dla danego przedziału czasowego.
- Nowe regulacje redispatchingowe – niedokładne prognozy pogody, a co za tym idzie utrudnione planowanie dostaw energii elektrycznej z OZE były powodem wzrostu kosztów redispatchingu dla elektrowni. Zwiększenie dokładności prognoz

oraz wprowadzenie dodatkowych mechanizmów zwiększających elastyczność systemu wytwórczego doprowadziło do zmniejszenia kosztów redispatchingu.

- Autostrady energetyczne HVDC – przesunięcie ośrodków wytwórczych z południa (elektrownie jądrowe) na północ (elektrownie wiatrowe) spowodowało konieczność przesyłania dużych ilości energii elektrycznej do ośrodków obciążenia na południu. Ze względu na odległości transmisji, systemy AC muszą być zastąpione przez systemy DC. Obecnie w budowie znajdują się trzy nowe trasy o łącznej mocy przesyłowej do 10 GW, każda o długości 1000 km.

3. Umowa koalicyjna 2021 i „Pakiet Wielkanocny 2022”

Punktem wyjścia dla nowego rządu w Niemczech jest miks energetyczny na koniec 2021 r. Osiągnięty udział energii odnawialnych w produkcji energii elektrycznej na poziomie 42 % jest dobrym wynikiem, ale niestety w ostatnich latach rządów Angeli Merkel ilość nowych instalacji OZE rocznie znacznie się obniżyła. Rysunek 4 przedstawia wzrost mocy elektrowni wiatrowych i fotowoltaicznych w Niemczech w ostatnich latach.



Rysunek 6. Sytuacja wyjściowa dla kolejnej fazy transformacji energetycznej. Niższy wskaźnik instalacji energii odnawialnych w Niemczech. a) energia wiatrowa, b) ogniwa fotowoltaiczne

Źródła: Opracowanie własne z wykorzystaniem materiałów [18,19].

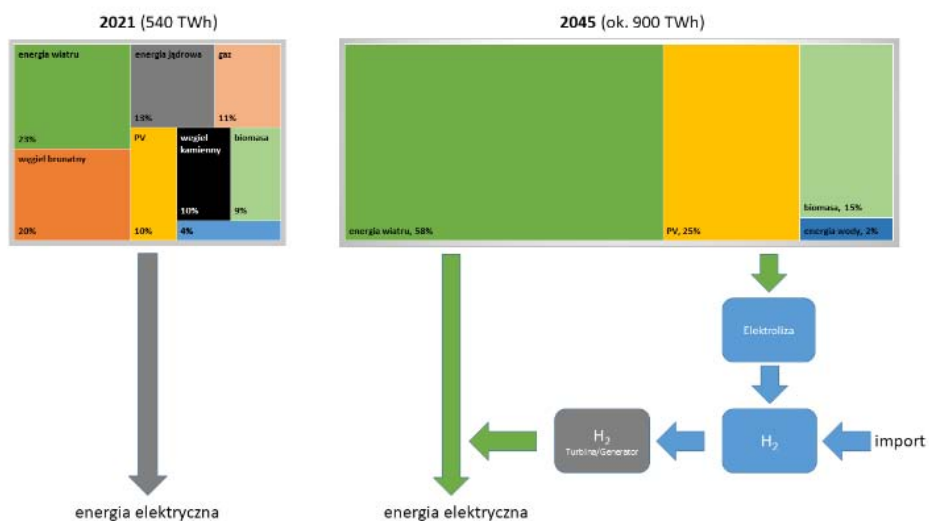
Dane te wyraźnie pokazują, że wzrost mocy zainstalowanej w energetyce wiatrowej załamał się w latach 2018-2021, a mocy PV załamał się w latach 2012-2017. Te niekorzystne tendencje wynikały ze zmieniających się warunków w przypadku wysokiego udziału odnawialnych źródeł energii (np. ustawa 10H), które nie doprowadziły do koniecznych dostosowań uwarunkowań prawnych ramowych. Przy założeniu niezmiennego zużycia energii w kolejnych latach do roku 2030 powstanie potrzeba substytucji energii, która nie będzie wyprodukowana z powodu wyłączenia elektrowni jądrowych (planowo do 2022) i węglowych (wg. planu nowego rządu do 2030). Jeśli nieco uprościmy, dla celów ilustracyjnych, obliczenia, możemy założyć, że 213 TWh energii elektrycznej powinno zostać zastąpione przez wytwarzanie tej energii w źródłach OZE.

Zakładając zapowiadany wzrost zainstalowanej mocy PV do 200 TWh, oznacza to wzrost produkcji o ok. 150 TWh, co odpowiada ok. 150 dodatkowym GW zainstalowanej mocy PV. Pozostałe dodatkowe 63 TWh powinny pochodzić z energii wiatrowej, co oznacza, że należy zainstalować 25 GW nowych mocy w elektrowniach wiatrowych, w wyniku czego zainstalowana moc energii wiatrowej wyniosłoby na rok 2031 88 GW (porównaj plany rządu niemieckiego podane w tabeli 1).

Dalsze zmiany, szczególnie substytucja gazu przez wodór, oraz ogólny wzrost zużycia energii elektrycznej na skutek współdziałania sektorów doprowadzić ma do bezemisyjnego systemu, którego struktura wytwórcza stan na rok 2045 poglądowo przedstawiona jest na rysunku 7. Widać na nim, przed jakimi zadaniami stanie niemiecka energetyka w ciągu najbliższych 20-25 lat. Nie tylko bowiem prawie 70% wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną ale przede wszystkim opracowanie całkowicie nowego systemu produkcji i dystrybucji wodoru, mającego służyć jako rezerwowośnośnik energii i substytut wielu produktów mineralnych w przemyśle chemicznym, jest zadaniem nowym, a jego realizacja obciążona jest w związku z tym wieloma ryzykami (np. problemy z przesyłem i magazynowaniem).

Ostateczny kształt (design) systemu na lata po 2045 roku w Niemczech została zaprezentowana m.in. w 2018 roku przez grupy projektowej ISYS z Akademią Nauk Aca-tech [9] (autorzy byli zaangażowani w prace tej grupy projektowej) i ogólnie pokrywa się z propozycjami będącymi wynikami badań innych instytucji takich jak Deutsche Energie-Agentur GmbH (DENA), Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik e.V. (VDE) czy Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE). W tych projektach omówiono szczegółowo potrzebę zainstalowania nowych

mocy w elektrowniach gazowych, które mają być stopniowo przestawiane na zastosowanie wodoru jako paliwa. Czy ma to być 25 GW, czy może 60 GW lub więcej?



Rysunek 7. Koszyk energetyczny w Niemczech w roku 2021 i planowany udział w roku 2045

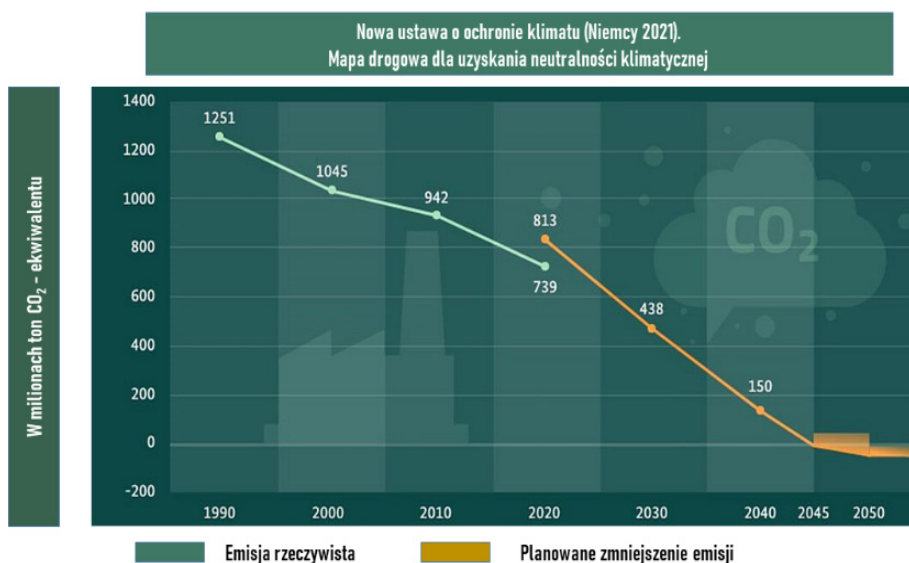
Źródło: Opracowanie własne z wykorzystaniem materiałów Ministerstwa BMWE.

Trwające badania na ten temat nie są jeszcze zakończone. Zależy to nie tylko od założeń *Energiewende*, ale także od decyzji europejskich. W ostatnich dniach Unia Europejska przyjęła tzw. taksonomię, która zalicza do technologii przejściowych zarówno energię gazową, jak i jądrową. Niedługo okaże się, jak w tej sytuacji rozwiną się strategie poszczególnych krajów europejskich, do których musi się dostosować niemiecki miks energii.

Wreszcie nowy rząd przedstawił limity emisji, które muszą być osiągnięte w ciągu najbliższych kilku lat (rysunek 8). Czarna linia na tym rysunku pokazuje przybliżony rozwój w oparciu o obecne trendy i prognozy. Pokazuje to, że nadal pozostaje wiele do zrobienia, aby zapewnić rzeczywiste osiągnięcie celów mierzonych pod względem redukcji emisji CO₂. Różowa linia na tym rysunku pokazuje przybliżony rozwój w oparciu o obecne trendy i prognozy. Widoczne jest, że nadal pozostaje wiele do zrobienia, aby zapewnić rzeczywiste osiągnięcie celów mierzonych pod względem redukcji emisji CO₂.

Również mimo trwającej wojny na Ukrainie rząd niemiecki realizuje konsekwentnie

transformację energetyczną *Energiewende*. Dnia 6 kwietnia w nieco ponad 100 dni sprawowania władzy w Niemczech koalicja SPD/Zieloni/FDP zatwierdziła obszerny plan opisujący szczegółowo poczynania rządu w sprawie *Energiewende* [9]. Zatwierdzony w kwietniu 2022 tzw. „Pakiet Wielkanocny” jest największą od dziesięcioleci nowelizacją polityki energetycznej. Przyspieszy to wszechstronnie rozwój energii odnawialnej na wodzie, na lądzie i na dachach.



Rysunek 8. Przewidywana redukcja emisji CO₂ przez nowy rząd Niemczech

Źródło: [21], © BMU, tłumaczenie autorów.

W tabeli 1 zestawione zostały najważniejsze postanowienia umowy koalicyjnej [10] i „Pakietu Wielkanocnego” [11] w poszczególnych obszarach ważnych dla osiągnięcia wyznaczonych bardzo ambitnych celów klimatycznych w Niemczech. Analiza stanu ich realizacji na dzień dzisiejszy w ocenie branżowej organizacji Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW) [12] wskazuje, że dużo jeszcze jest do zrobienia by ambitne cele klimatyczne zostały osiągnięte.

Tabela 1. Cele i najważniejsze zadania wynikające z postanowień nowego rządu niemieckiego

Dotyczy	Umowa koalicyjna [10]	Pakiet Wielkanocny [11; 14]
Warunki ogólne	<ul style="list-style-type: none"> Masowy rozwój OZE wymaga szybszego tempa i większego zaangażowania w rozbudowę sieci na wszystkich poziomach. W tym celu rząd federalny niezwłocznie zleci Federalnej Agencji ds. Sieci (BnetzA) oraz operatorom sieci elektroenergetycznych opracowanie nowego planu, który wykraczałby poza obecne plany rozwoju sieci i uwzględnił nowe cele klimatyczne (patrz tabela 2). Procedury planowania i zatwierdzania projektów rozbudowy sieci zostaną zmodernizowane, odbiurokratyzowane i ucyfrowione. Poprzez wcześniejsze zaangażowanie obywateli w procesach decyzyjnych można osiągnąć, że planowanie będzie szybsze i bardziej efektywne. Zapewni to skrócenie czasu trwania procedur o co najmniej połowę. Zapewnienie kapitału na infrastrukturę sieciową będzie nadal wymagało atrakcyjnych warunków inwestycyjnych w porównaniu z innymi krajami europejskimi. Do połowy 2023 roku rząd przedstawi nową „mapę drogową” dla rozwoju systemu w uwzględnieniem jego stabilności. 	<p>Podjmuje się kompleksowy pakiet działań mających na celu promowanie rozwoju energii odnawialnej. Na przykład:</p> <ul style="list-style-type: none"> udostępniono nowe obszary dla rozwoju fotowoltaiki, rozszerzył się udział gmin w lądowej energetyce wiatrowej i fotowoltaice, został zwiększony rozwój lokalizacji o słabym wietrze oraz poprawiono warunki ramowe dla rozwoju dachowych systemów fotowoltaicznych. <p>W roku 2035 energia elektryczna w Niemczech ma być wytwarzana niemal w całości z odnawialnych źródeł energii.</p>
Ustawa o klimacie	Do końca 2022 roku rząd opracuje ustawę o ochronie klimatu i uruchomimy natychmiastowy program ochrony klimatu ze wszystkimi niezbędnymi ustawami, rozporządzeniami i środkami.	<p>Jakie przepisy zostaną dostosowane?</p> <ul style="list-style-type: none"> ustawa o odnawialnych źródłach energii (EEG) ustawa o energii wiatrowej na morzu (WindSeeG) ustawy o przemyśle energetycznym (EnWG) ustawa o federalnym planie wymagań (BBPlG) ustawa o przyspieszeniu rozbudowy sieci przesyłowej (NABEG) oraz innych ustaw i rozporządzeń z zakresu prawa energetycznego.
OZE ogólnie	<p>Cele dla energii odnawialnych są dostosowane do wyższego zapotrzebowania na energię elektryczną brutto, wynoszącego 680-750 TWh w roku 2030, z tego 80% ma pochodzić z odnawialnych źródeł energii. Dlatego też przyspiesza się rozbudowę sieci i dynamicznie dostosowuje się roczny wolumen przetargów OZE.</p> <p>Zapewnione zostanie, że energia elektryczna z OZE wykorzystywana będzie w sposób ekonomiczny również w celu osiągnięcia wysokiego</p>	<p>Podniesienie celu udziału OZE na rok 2030 do 80%.</p> <p>Aby osiągnąć nowy cel 80% ekspansji do roku 2030, ścieżki ekspansji zostaną usprawnione.</p> <p>W roku 2035 energia elektryczna ma pochodzić prawie w całości z odnawialnych źródeł energii.</p>

	stopnia sprzężenia sektorowego, poprzez wykorzystanie jej chwilowych nadmiarów do produkcji wodoru.	
Morska energia wiatrowa	<p>Znacząco zwiększone zostaną moce morskiej energetyki wiatrowej – co najmniej 30 GW w 2030 r., 40 GW w roku 2035 i 70 GW w 2045. W tym celu zabezpieczone zostanie odpowiednie tereny w Zagranicznej Strefie Ekonomicznej. Wiatrowe instalacje morskie będą miały pierwszeństwo przed innymi formami użytkowania tych terenów.</p> <p>Będzie dalej rozwijana europejska współpraca w dziedzinie offshore i będą rozwijane projekty transgraniczne na Morzu Północnym i Bałtyckim.</p> <p>Wygenerowaną energię wiatrową na morzu przyłączy się priorytetowo do sieci na lądzie. Niezwłocznie podjęte zostaną niezbędne decyzje technologiczne, np. dotyczące roli hybrydowych połączeń międzysystemowych, sieci morskich typu mesh lub połączeń wielopunktowych, pamiętając o integracji sieci lądowych.</p>	<p>Cele pozostają takie same jak w umowie koalicyjnej. Zostanie zwiększony wolumen przetargów.</p> <p>Obszary, na których nie przeprowadzono wstępnych pomiarów centralnych, będą również przedmiotem przetargu, ale koncesje przyznawane będą na podstawie kryteriów jakościowych i oferty płatności dodatkowej złożonej przez oferenta. Kryteria jakościowe to:</p> <ul style="list-style-type: none"> (i) wydajność energetyczna turbin, (ii) zawarcie umowy o zakup energii elektrycznej (PPA), (iii) zgodność z zasadami ochrony przyrody i ochrony gatunków oraz (iv) możliwość recyklingu łopat wirnika. <p>70% przychodów z oferowanych płatności przeznaczają się na opłatę za korzystanie z sieci morskiej, 20% na ochronę przyrody, a 10% na rybołówstwo przyjazne dla środowiska.</p> <p>Ponadto nowelizacja reguluje kwestie dalszego wykorzystania i ponownego zasilania istniejących morskich farm wiatrowych oraz wprowadza wymogi dotyczące planowania i zatwierdzania rurociągów do przesyłu wodoru.</p>
Energia wiatrowa na lądzie	2% powierzchni kraju ma zostać przeznaczona na lądową energetykę wiatrową.	<p>Tempo rozbudowy zostanie zwiększone do poziomu 10 GW rocznie.</p> <p>Cel: 115 GW w Niemczech w roku 2030</p>
PV	Cel: około 200 GW do 2030 r. Aby to osiągnąć, będą m.in. usunięte wszelkie przeszkody i przyspieszone będą procedury przyłączanie urządzeń PV do sieci.	<p>Tempo rozbudowy PV 22 GW rocznie.</p> <p>Cel: 215 GW w roku 2030, systemy solarne (dachowe, naziemne, specjalne).</p> <p>Warunki ramowe dla energii słonecznej zostały poprawione:</p> <ul style="list-style-type: none"> • cele rozbudowy instalacji fotowoltaicznych i wielkości przetargów zostaną skorygowane, a rozbudowa zostanie podzielona równo pomiędzy dachy i otwarte przestrzenie. • w przypadku instalacji typu rooftop poza procedurą przetargową, wynagrodzenie za instalacje zostanie znacznie zwiększone. Nowe instalacje, które oddają całą energię elektryczną do sieci, otrzymają w przyszłości odpowiednie wsparcie.
Stopniowe wycofanie się z węgla	Cel: wycofanie węgla do roku 2030 . Elektrownie gazowe, potrzebne do czasu zapewnienia dostaw energii ze źródeł odnawialnych, powinny być również budowane na terenach istniejących elektrowni, aby wykorzystać istniejącą infrastrukturę (sieciową). Muszą one	Potwierdzenie wcześniejszych planów.

	<p>być budowane w taki sposób, aby mogły być przetwarzane na gazy neutralne dla klimatu (H₂-Ready). Gaz ziemny jest niezbędny w okresie przejściowym.</p> <p>Rząd będzie regularnie dokonywał przeglądu bezpieczeństwa dostaw i szybkiej ekspansji odnawialnych źródeł energii.</p>	
Wodór	<p>Cel: elektrolizery 10 GW w roku 2030.</p> <p>Strategia wodorowa będzie realizowana konsekwentnie.</p> <p>Pierwszym priorytetem jest produkcja krajowa H₂ oparta na odnawialnych źródłach energii.</p> <p>Rząd nie chce ograniczać wykorzystania wodoru tylko w sektorze energetycznym. Zielony wodór powinien być stosowany również preferencyjnie w tych sektorach gospodarki, w których nie jest możliwe przekształcenie procesów w celu osiągnięcia neutralności pod względem emisji gazów cieplarnianych poprzez bezpośrednią elektryfikację (np. hutnictwo).</p>	<p>Dalszy rozwój finansowania innowacji i magazyny energii rozporządzenie ma zostać wydane przed końcem 2022 roku. Jednocześnie nowe zakłady produkujące biometan i elektrociepłownie będą nastawione na produkcję wodoru (H₂-ready).</p>
Elektromobilność	<p>Cel: 15 mln EV w roku 2030.</p> <p>Rozbudowa infrastruktury ładowania musi wyprzedzać popyt.</p> <p>Stworzone będą warunki techniczne i organizacyjne umożliwiające ładowanie dwukierunkowe.</p>	<p>Potwierdzenie wcześniejszych planów.</p>
Biomasa		<p>Wykorzystanie biomasy w wysoce elastycznych elektrowniach szczytowych</p> <p>Promocja biomasy będzie w większym stopniu koncentrować się na wysoce elastycznych elektrowniach pracujących przy obciążeniu szczytowym, tak aby bioenergia mogła w coraz większym stopniu wykorzystywać swoje atuty jako źródło energii, które można magazynować i które służy systemowi. Wielkość przetargów na biomasę będzie stopniowo zmniejszana, a na biometan zostanie zwiększona do 600 MW rocznie od roku 2023.</p> <p>W przyszłości biometan może być wykorzystywany jedynie w wysoce elastycznych elektrowniach. Ponadto ograniczone zasoby biomasy mają być w przyszłości w większym stopniu wykorzystywane w obszarach trudnych do dekarbonizacji, takich jak transport i przemysł.</p>
Sieć elektroenergetyczna	<p>Rząd federalny niezwłocznie zleci Federalnej Agencji ds. Sieci (BnetzA) oraz operatorom sieci elektroenergetycznych opracowanie nowego planu, który wykraczałby poza obecne plany rozwoju sieci i uwzględnił nowe cele klimatyczne</p>	<p>Zaktualizowano federalny plan wymagań dotyczący rozbudowy sieci przesyłowych. Uwzględniono 19 nowych projektów rozbudowy sieci i zmieniono 17 projektów ich rozbudowy. W przypadku nowych i zmienionych projektów rozbudowy sieci energetycznej określa się konieczność i pilne potrzeby przemysłu energetycznego.</p>

4. Przewidywany znaczący wzrost mocy zainstalowanej w OZE wyzwaniem dla operatorów sieciowych

Jest oczywiste, że w efekcie przeprowadzenia transformacji energetycznej system elektroneregetyczny stanowić będzie bazę dla olbrzymiej części zasilania w energię głównie przez to, że stanie się on również nieodzowną częścią ścieżki wytwarzania zielonego wodoru, będącego bazą dla substytucji paliw kopalnianych używanych dziś w przemyśle. Dlatego też już dziś należy przygotować się do jego niezbędnej modernizacji (transformacji) związanego z tą jeszcze bardziej odpowiedzialną rolą pewnego rodzaju arterii energetycznej, którą będzie on spełniał w przyszłości.

Dziś struktura operatorów sieci w Niemczech opiera się na czterech obszarach zasilania, które są zarządzane przez niezależnych operatorów sieci. Operatorzy sieci mają różną strukturę własności. Dwa z nich są w większości własnością zagraniczną (Belgia i Holandia), a żaden z operatorów sieci nie jest kontrolowany przez państwo niemieckie. Struktura ta jest przedstawiona na rysunku 9.



Rysunek 9. Struktura operatorów sieci w Niemczech

Źródło: [13].

Operatorzy sieci w Niemczech mają podobną wielkość pod względem mocy i energii a ich obciążenia szczytowe mieszczą się w przedziale od 17 do 25 GW. Rynek energii elektrycznej Niemiec jest zrównoważony jako całość jak również w poszczególnych obszarach zasilania.

Planowanie systemu elektroenergetycznego odbywa się w ramach tzw. planu rozwoju sieci, który jest sporządzany z 10-letnim wyprzedzeniem i obejmuje również planowanie perspektywiczne do roku 2050. Wyniki tych działań są włączane do europejskiego TYDP (Ten Years Development Plan) ENTSO-E i koordynowane z nim. Plany 10-letnie są zatwierdzane przez niemieckiego regulatora sieci, Bundesnetzagentur (Bnetza).

Zapowiedź zmian w planach rozwoju systemu energetycznego przez nową koalicję w Niemczech została pozytywnie przyjęta przez operatorów sieci i branżę. Nowe cele, w szczególności przyspieszona rozbudowa odnawialnych źródeł energii i wcześniejsze wyłączenie elektrowni węglowych (do roku 2030 zamiast do 2038) przy jednoczesnym utrzymaniu planu wyłączenia ostatnich elektrowni jądrowych w roku 2022, spowodowały konieczność nowych obliczeń sieciowych. Pierwsze wyniki symulacyjne systemu po roku 2030 (po planowanym odejściu od węgla) potwierdzają, że możliwe takiego scenariusza rozwoju systemu. Wyniki te pokazują jednak nowe wyzwania, przed którymi stanie operator sieci energetycznych.

W tabeli 2 zestawiono dane z obliczeń modelowych przeprowadzonych przez operatora sieci Amprion w grudniu 2021 roku dla Niemiec, z których wynika, że przyjęty wcześniej scenariusz referencyjny na rok 2030 ulega zmianie.

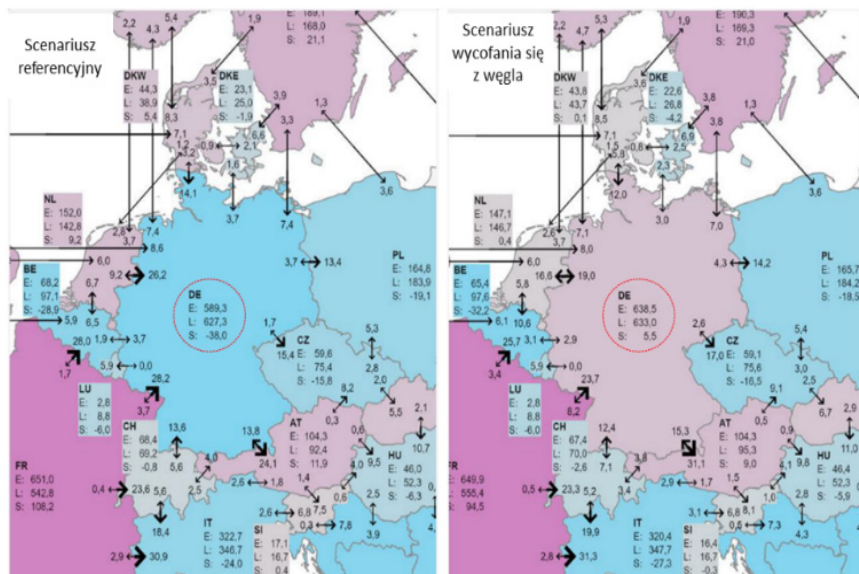
Oceniając wyniki tych symulacji można stwierdzić, że po pierwsze, niezależność energetyczna Niemiec nie ulegnie zmianie (patrz rys. 10). Widać, że bilans mocy na granicach Niemiec zmieni się tylko nieznacznie, o kilka procent². Prognozowana na ten rok moc elektrowni węglowych zmniejsza się o 17 GW (podczas gdy moc elektrowni gazowych pozostaje na poziomie 25 GW). Założenia te są oczywiście dyskusyjne, ale wyniki pokazują tendencję, którą należy wziąć pod uwagę, jeśli zakładane plany mają zostać zrealizowane. Po drugie, wyłączenie 17 GW elektrowni węglowych spowoduje znaczące przesunięcie centrów wytwórczych. Nastąpią przesunięcia w przepływach mocy, które spowodują dodatkowe obciążenia w różnych częściach sieci, które nie są przystosowane (nie były zaplanowane) do tego typu lokalizacji zasilania.

² Należy przyjąć, że dane i obliczenia są z reguły obarczone kilkuprocentowym błędem, jednak nie większym niż 5%.

Tabela 2. Porównanie scenariuszy rozwoju mixu w Niemczech w wyniku wczesnego wycofania węgla [15]

	Stan obecny (2019)	Scenariusz stopniowego wycofywania węgla do roku 2030	Scenariusz referencyjny na rok 2030
Moc zainstalowana [GW]			
RES	124	273	224
PV	49	150	129
Wiatr lądowy	53	85	66
Morski wiatr	7,5	25	15
Biomasa	8,3	7	8
Zbiorniki wodne i elektrownie wodne	4,8	5,3	5,3
Inne OZE	1,3	0,6	0,6
Konwencjonalne	101	41	58
Energia jądrowa	8,1	0	0
Węgiel kamienny	24	0	8
Węgiel brunatny	20	0	9
Gaz ziemny	30	25	25
El. magazynowanie szczytowe i elektrownie szczytowo-pompowe	9,8	9,4	9,4
Olej	4,4	1,8	1,8
Inne konwencjonalne	4,3	4,4	4,4
Produkcja i zużycie energii [TWh]			
RES ogółem	237	505	409
Zużycie energii brutto	576	633	627
Procent OZE	41	80	65
Konwergencja sektorów			
Pompy ciepła [mln sztuk]	1	6	6
Elektromobilność [mln samochodów]	0,3	14	14
Skojarzone wytwarzanie ciepła i energii elektrycznej [GW].	0,8	6,3	6,3
Power-to-gas [GW].	<0,1	7,5	7,5

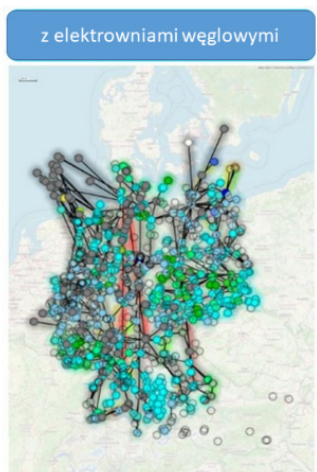
Na rysunku 11 przedstawiono przykładowe wyniki analizy napięć w przypadku zwarć w różnych punktach sieci. Widać (rys. 11b), że prawie cały obszar północnych i środkowych Niemiec jest znacznie bardziej zagrożony załamaniem napięcia niż miałyby to miejsce, gdyby elektrownie węglowe nadal pracowały..



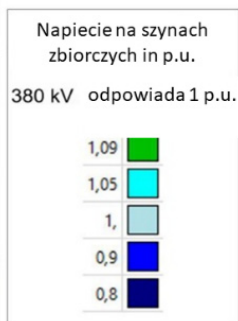
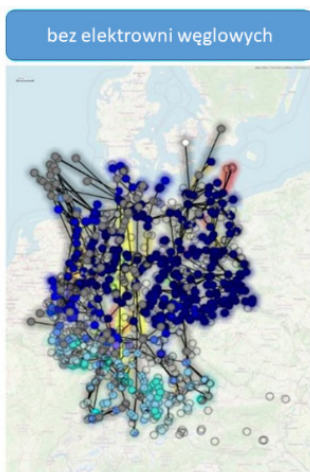
Rysunek 10. Eksport (E), import (L) i saldo (S) w rocznym obrocie energią elektryczną wTWh

Źródło: [15], tłumaczenie autorów.

a)



b)



Rysunek 11. Napięcia na szynach stacji obliczone dla wariantu a) z i b) bez elektrowni węglowych w 2030 roku; 50 ms po lokalnym zwarciu

Źródło: [15], tłumaczenie autorów.

Tym i innym wyzwaniom należy zapobiegać poprzez wczesne podjęcie działań mających na celu wzmocnienie sieci, wprowadzenie nowych metod zarządzania i nowych mechanizmów rynkowych jak również odpowiednich uwarunkowań prawnych. Operatorzy sieci energetycznych w Niemczech widzą szereg pilnych zadań, które muszą być rozwiązane w najbliższej przyszłości by *Energiewende* zakończyła się powodzeniem:

- Wzmocnienie i umocowanie prawne współpracy OSP i OSD - choć temat ten jest dyskutowany od ok. 2010 r., nadal nie ma ostatecznych ram organizacyjno-prawnych dla tej współpracy (np. Redispatch 2.0)
- Pełna cyfryzacja systemu elektroenergetycznego we wszystkich obszarach (opomiarowanie, administracja, eksploatacja i rozliczenia) są niezbędnym elementem sektora energetycznego - rozwój systemów pozostawia w tym zakresie wiele do życzenia
- Nowe metody ruchu (np. przy deficycie inercji) są potrzebne zarówno dla strategii wyposażenia sieci (np. rezerwy wirujące), jak i dla prowadzenia ruchu w warunkach zmniejszonej inercji. Ważna jest tu rola ENTSO-E, które aktualnie prowadzi prace badawcze w tym kierunku.
- Technologia turbin H2 powinna być rozwijana i testowana na skalę przemysłową. Turbiny te powinny być zdolne do pracy z różną zawartością H2 w gazie spalinowym (od 0 do 100%).
- Należy jak najszybciej opracować nowy model rynku energii dostosowany do ostatecznej struktury systemu i rynku europejskiego, tak aby rynek ukierunkowywał rozwój systemu (prace w tym kierunku dla rynków day-a-head i intraday są już prowadzone [16]).
- Cyberbezpieczeństwo systemów energetycznych powinno uzyskać najwyższy priorytet. Należy opracować autonomiczne zasady funkcjonowania kontroli systemu (izolowane systemy informacyjne) oraz zapewnić bezpiecznych przepływ informacji.
- Szkolenie personelu dla potrzeb przyszłego systemu powinno rozpocząć się już teraz, zarówno na poziomie średnim, jak i wyższym. Odpowiednie jednostki szkoleniowe powinny dostosować swój profil kształcenia do nowych technologii.

5. Podsumowanie

Energiende jest zadaniem długofalowym, które do 2045 roku ma doprowadzić do przekształcenia niemieckiego systemu energetycznego w system bezemisyjny. Prace nad realizacją tego, można powiedzieć, epokowego przedsięwzięcia rozpoczęły się w latach 80. dotychczasowe wyniki są zachęcające, ale w ostatnich latach nastąpiły pewne opóźnienia w realizacji wyznaczonych celów.

Na drodze do bezemisyjnego systemu energetycznego wyróżnić można 4 etapy, z którymi wiążą się różnorodne wyzwania techniczne, organizacyjne i społeczne. Obecnie kończy się etap 2 tego procesu. Wyzwania techniczne, które są również przedmiotem oceny niniejszego artykułu, pojawiają się wraz ze wzrostem udziału odnawialnych źródeł energii w koszyku energetycznym i ogólnie dotyczą zapewnienia niezawodnych dostaw energii. W tym względzie koncepcja *Energiende* opiera się na współpracy w europejskim systemie energetycznym, który jest zróżnicowany pod względem rodzajów źródeł wytwarzania energii. Przyjęta niedawno taksonomia przewiduje okres przejściowy dla stosowania technologii gazowych i jądrowych w celu stabilizacji dostaw energii elektrycznej, przy czym ostatecznym celem jest stworzenie w całej Europie gospodarki bezemisyjnej, wykorzystującej odnawialne źródła energii. Niezbędne działania w tym zakresie wyznaczane są zarówno w ramach planowania dziesięcioletniego poszczególnych krajów europejskich, jak i planowania TYDP w ramach ENTSO-E.

Wiele nowych problemów technicznych (np. stabilna praca systemu przy wysokim udziale OZE) i ekonomicznych (obniżenie kosztów wytwarzania energii z OZE) zostało już pomyślnie rozwiązanych. Dzisiejsze sieci są nadal niezawodne i pozwalają na efektywnie wytwarzanie i wykorzystanie energii elektrycznej. W przyszłości trzeba będzie stawić czoła jednak nowym wyzwaniom, zarówno tym znanym, jak i nieznanym by sieci zachowały swoją wysoką niezawodność. W dobie niemal codziennych lotów kosmicznych trudno sobie wyobrazić, by wykraczały one poza dzisiejsze możliwości technologiczne. Umiejętności, doświadczenie i pomysłowość inżynierów z krajów europejskich wydają się być w tym przypadku wystarczające.

Literatura

- [1] Zbigniew Styczyński, Przemysław Komarnicki, Martin Stötzer, 2016, *Transformacja systemu energetycznego w Niemczech: Energiewende – quo vadis?* „Energetyka-Społeczeństwo-Polityka” nr 1
- [2] Bundesnetzagentur, 2021, *Tabellarische Auflistung der bundesweiten Kennzahlenentwicklung Strom 2006 bis 2020*, https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/Versorgungssicherheit/Versorgungsunterbrechungen/Auswertung_Strom/start.html [25.04.2022]
- [3] Instytut Energetyki Odnawialnej, 2021, *Raport: Rynek Fotowoltaiki w Polsce 2021*, <https://ieo.pl/pl/raport-rynek-fotowoltaiki-w-polsce-2021> [25.04.2022]
- [4] Donella H. Meadows, Dennis L. Meadows, Jorgen Randers, William W. Behrens III. 1973, *Granice wzrostu*, Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Ekonomiczne
- [5] Ernst Ulrich von Weizsäcker, Andreas Wijkman, 2017, *Wir sind dran. Der große Bericht*, München: Pentheon
- [6] IMGW-PIB, 2022, *IMGW-PIB: Wstępna Analiza Klimatu 2021*, Komunikat Biura Prasowego IMGW-PIB, https://www.imgw.pl/sites/default/files/2022-01/imgw_0126-wstepna-analiza-klimatyczna-2021.pdf. [7.02.2022]
- [7] Wikipedia, b.d., *Erneuerbare-Energien-Gesetz*, <https://pl.wikipedia.org/wiki/Erneuerbare-Energien-Gesetz> [14.01.2022]
- [8] Przemysław Komarnicki, Michael Kranhold, Zbigniew Styczyński, 2021, *Sektorenkopplung – Energetisch-nachhaltige Wirtschaft der Zukunft*. Wiesbaden: Springer
- [9] Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, b.d., *Energiesysteme der Zukunft (ESYS)*, <https://www.acatech.de/projekt/esys-energiesysteme-der-zukunft/> [8.02.2022]
- [10] Bundesregierung, 2021, *Koalitionsvertrag zwischen SPD, Bündnis 90/Die Grünen und FDP*, <https://www.bundesregierung.de/breg-de/service/gesetzesvorhaben/koalitionsvertrag-2021-1990800> [22.04.2022]
- [11] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, 2022, *Überblickspapier Osterpaket*, https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/0406_ueberblickspapier_osterpaket.pdf?__blob=publicationFile&v=14 [22.04.2022]
- [12] Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft, 2022, *Entwurf eines Gesetzes zu Sofortmaßnahmen für einen beschleunigten Ausbau der Erneuerbaren Energien und weite-*

- ren Maßnahmen im Stromsektor, Version: 2.0*, https://www.bdew.de/media/documents/285_BDEW-Stellungnahme_Sofortma%C3%9Fnahmen-Gesetz_Regierungsentwurf.pdf [29.04.2022]
- [13] Francis McLloyd, 2012, *File: Regelzonen mit Übertragungsnetzbetreiber in Deutschland.png*, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=22232969> [14.01.2022]
- [14] Christian Schnell, 2022, *Renewable energy auction systems in the V4 countries*, Warszawa: Instytut Jagielloński, https://rekk.hu/downloads/events/03_%20RES_auction_systems_Schnell_IJ.pdf [25.04.2022]
- [15] Amprion, 2021, *AUSWIRKUNGEN EINES KOHLEAUSSTIEGS 2030 – KURZUNTERSUCHUNG*, https://www.amprion.net/Dokumente/Presse/Stellungnahmen/2021/Amprion_Kurzuntersuchung_Kohleausstieg_2030.pdf [8.02.2022]
- [16] Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, 2022, *Strommarktdesign 2030. Die Förderung der erneuer-baren Energien wirksam und effizient gestalten*, <https://www.aca-tech.de/publikation/strommarktdesign-2030/download-pdf/?lang=de> [28.04.2022]
- [17] Michael Kranhold, Zbigniew Styczyński, 2022, *Energiewende, czyli wyzwanie operatorów sieci przesyłowych w Niemczech*, <https://biznesalert.pl/energiewende-czyli-wyzwanie-operatorow-sieci-przesylowych-w-niemczech-analiza/> [19.07.2022]
- [18] Ole Kracht, Iris Becker, 2022, *Flaute bei der Windkraft*, Katapult 7.01.2022, <https://katapult-magazin.de/de/artikel/flaute-bei-der-windkraft> [19.07.2022]
- [19] Statista, 2022, *Installierte Leistung (kumuliert) der Photovoltaikanlagen in Deutschland in den Jahren 2000 bis 2021*, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/13547/umfrage/leistung-durch-solarstrom-in-deutschland-seit-1990/> [19.07.2022]
- [20] BMUV, 2021, *Novelle des Klimaschutzgesetzes vom Bundestag beschlossen*, https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Bilder_Sharepics/mehrklimaschutz/sectorziele_emissionen.pdf [19.07.2022]
- [21] BWUV, 2021, *Das neue Klimaschutzgesetz- unser Fahrplan zur Klimaneutralität*, 12. Mai 2021, <https://twitter.com/bmuv/status/1392406080966250498> [19.07.2022]
- [22] wysokienapiecie.pl, 2022, *Udział OZE w zapotrzebowaniu 2020-2022. Dane PSE, marzec 2022 r.*, https://wysokienapiecie.pl/wp-content/uploads/2022/03/udzial_oze_w_zapotrzebowaniu_2020-2022-1024x587.png [19.07.2022]