



Bern, 2. Dezember 2022

Zukunftsstrategie für die Wärme-Kraft-Kopp- lung

Bericht des Bundesrates
in Erfüllung des Postulates 20.3000 der
Kommission für Umwelt, Raumplanung und
Energie NR vom 14. Januar 2020



Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	3
2	Einleitung	4
3	Rahmenbedingungen	4
3.1	Netto-Null Entscheid des Bundesrats und langfristige Klimastrategie.....	4
3.2	Weiterentwicklung der Energiepolitik und Stromversorgungssicherheit.....	5
3.3	Energieperspektiven 2050+	6
3.4	Künftige Rolle von Gas und Gasinfrastruktur	6
3.5	Entwicklung thermischer Netze	7
4	Wärme-Kraft-Kopplung in der Schweiz	8
4.1	Wärme-Kraft-Kopplungstechnologien.....	8
4.2	Entwicklung der Wärme-Kraft-Kopplung in der Schweiz.....	8
4.3	Optionen für den CO ₂ -neutralen Betrieb von WKK-Anlagen	9
4.4	Wirtschaftlichkeit der verschiedenen WKK-Technologien	10
4.5	Eignung von WKK-Technologien für die Winterstromversorgung	14
5	WKK-Anlagen in der künftigen Energieversorgung	15
5.1	Erkenntnisse zum Stromsektor aus den Energieperspektiven 2050+	15
5.2	Erkenntnisse zum Wärmesektor aus den Energieperspektiven 2050+	16
5.3	Die Wärme-Kraft-Kopplung in den Energieperspektiven 2050+	16
6	Schlussfolgerungen	20
6.1	Transformation zum Energiesystem der Zukunft.....	20
6.2	Künftige Rolle von WKK-Anlagen in der Stromversorgung	20
7	Fördermodell für WKK-Anlagen	22
7.1	Eckpunkte einer möglichen Förderung von WKK-Anlagen	22
8	Replik auf weitere Fragestellungen im Postulat	25
	Literaturverzeichnis	27
	Anhang 1: Beschrieb der verschiedenen WKK-Technologien gemäss Prognos	28

1 Zusammenfassung

Der Bundesrat hat 2019 beschlossen, dass in der Schweiz ab dem Jahr 2050 nicht mehr Treibhausgase ausgestossen werden sollen, als natürliche und technische Speicher aufnehmen können. Dieses so genannte «Netto-Null-Ziel» hat einen direkten Einfluss auf die künftige Energieversorgung. Insbesondere müssen im Verkehrs- und im Wärmebereich fossile Energieträger durch erneuerbaren Strom ersetzt werden (Sektorkopplung). Dies bedingt den verstärkten und rechtzeitigen Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien. Es muss sichergestellt werden, dass langfristig die Stromversorgung auch in den Wintermonaten gewährleistet bleibt.

Mit dem Postulat 20.3000 Zukunftsstrategie für die WKK wurde der Bundesrat beauftragt, eine Strategie für eine künftige Regulierung von Wärme-Kraft-Kopplungs-Anlagen (WKK-Anlagen) auszuarbeiten. Dabei sollen u.a. Anreize geschaffen werden, damit fossile WKK-Anlagen in einer Funktion als Rückversicherung bei der Stromproduktion in den Wintermonaten nicht länger als nötig im Betrieb sind. Solche **stromgeführten** Anlagen würden also nur bei sehr hohen Strompreisen oder angespannten Versorgungssituationen wenige Stunden im Jahr wie Reservekraftwerke betrieben werden und müssten daher subventioniert werden. Die dabei erzeugte Wärme könnte nur teilweise genutzt werden, was ineffizient ist, insbesondere weil diese Anlagen aus klimapolitischen Gründen zwingend mit kostbaren erneuerbaren oder klimaneutralen Brennstoffen betrieben werden müssten. Fossile WKK-Anlagen unterliegen ebenfalls aus klimapolitischen Gründen der CO₂-Abgabe, so dass die gleichzeitige Förderung solcher fossilen Anlagen widersprüchlich wäre.

Wärmegeführte, mit erneuerbaren oder klimaneutralen Brennstoffen betriebene Wärme-Kraft-Kopplungs-Anlagen können hingegen einen wertvollen Beitrag zur Sicherstellung der Stromversorgung im Winterhalbjahr und zur Schonung der Wasserkraftsspeicher leisten. Sie liefern Bandstrom und entlasten damit die Stromproduktion aus der Speicherwasserkraft. Eingebunden in ein urbanes Fernwärmesystem können sie Spitzenlastkessel ersetzen oder ergänzen. Weiter reduzieren sie die Stromnachfrage, indem es im gesamten Energiesystem weniger Wärmepumpen braucht. Durch ihre Wärmeproduktion stellen wärmegeführte WKK-Anlagen zudem sicher, dass an kalten Wintertagen der Mehrbedarf an Wärme abgedeckt werden kann.

Im Bericht werden mögliche Eckpunkte für ein Fördersystem aufgezeigt, mit dem wärmegeführte, erneuerbare bzw. klimaneutrale WKK-Anlagen gefördert werden könnten. Eine allfällige Förderung neuer Anlagen müsste bezüglich der volkswirtschaftlichen Kosten mit anderen Massnahmen wie dem weiteren verstärkten Ausbau der erneuerbaren Energien, insbesondere der Speicherwasserkraft, sowie den Reservekraftwerken verglichen werden. Mit der Botschaft des Bundesrates zum Bundesgesetz über eine sichere Stromversorgung mit erneuerbaren Energien sind technologieoffene Ausschreibungen für zusätzliche Winterspeicher-Kapazitäten bereits vorgesehen, sollte sich spätestens im Jahr 2030 abzeichnen, dass das Ausbauziel von 2 TWh bis 2040 allein mit der Grosswasserkraft nicht erreicht werden kann. Eine vorgezogene Förderung von WKK-Anlagen müsste zusätzlich zur Grosswasserkraft erfolgen und sollte diese nicht konkurrenzieren. Weiter ist zu betonen, dass WKK-Anlagen nur begrenzt als Reservekraftwerke eingesetzt werden können, da sie in aller Regel wärmegeführt und nicht auf Abruf betrieben werden.

2 Einleitung

WKK-Anlagen erzeugen gleichzeitig Wärme und Elektrizität. Sie können im Winterhalbjahr die geringere Stromproduktion aus Sonne und Wasserkraft teilweise kompensieren. WKK-Anlagen lassen sich rasch ein- und ausschalten und können deshalb, sofern der für ihren Betrieb benötigte Brennstoff jederzeit verfügbar ist, auch einen Beitrag zur Stabilität des lokalen Verteilnetzes und in gewissem Umfang zur Versorgungssicherheit leisten.

Im Rahmen der parlamentarischen Beratung zur Totalrevision des CO₂-Gesetzes hatte der Ständerat im September 2019 keine neuen Massnahmen zur Förderung der Wärme-Kraft-Kopplung vorgeschlagen. Die Kommission des Zweitrats (UREK-N) überwies hingegen am 14. Januar 2020 folgendes Postulat (20.3000 Zukunftsstrategie für die WKK):

Der Bundesrat wird beauftragt, in einem Bericht eine Strategie, allenfalls mit Varianten, für die Regulierung der Wärme-Kraft-Kopplung vorzulegen. Dabei sollen folgende Ziele verfolgt werden:

1. Es sollen Investitionen möglich sein, die zur Sicherstellung der Stromversorgung im Winter beitragen.
2. Es sollen Anreize bestehen, die jährliche Dauer des Betriebs dieser Anlagen mit fossilen Energieträgern so einzuschränken, dass diese Anlagen nur dann in Betrieb sind, wenn dies für die Stromversorgung unbedingt notwendig ist.
3. Es soll vermieden werden, dass diese Anlagen in Betrieb sind, wenn genügend Solarenergie (oder eine andere Form erneuerbarer Energien) vorhanden ist.
4. Es soll sichergestellt werden, dass die Wärme meistens verwertet wird.

Im Bericht soll zudem untersucht werden, welche Art und welche Grösse von Anlagen – von WKK mit Brennstoffzellen-Batterien für Einfamilienhäuser bis zur an ein Fernwärmenetz angeschlossenen Gasturbine – sich hierfür am besten eignen.

Nach Auskunft einzelner Mitglieder der UREK-N soll das Postulat klären, ob und wie erneuerbare WKK-Anlagen kurz- bis mittelfristig als Rückversicherung für die Stromerzeugung im Winterhalbjahr gefördert werden könnten. Dies vor dem Hintergrund, dass an kalten Tagen sowohl viel Wärme als auch mehr Strom produziert werden muss. Durch die Integration in Wärmenetze könnten WKK-Anlagen u.a. eine Rückversicherungsfunktion für die Strom- und Wärmeversorgung im Winter übernehmen. Bei einer Strommangellage sollen sowohl der Strom wie auch die Wärme aus solchen WKK-Anlagen zwingend genutzt werden müssen. Auch wenn deswegen eine weitere im Wärmenetz (z.B. innerhalb eines Wärmeverbundes) integrierte Wärmequelle temporär zurückgefahren werden müsste. Für ein solches Modell bräuchte es allerdings regulatorische Anpassungen in der bestehenden Gesetzgebung (CO₂-Gesetz, Energiegesetz).

Der Bundesrat hat am 19. Februar 2020 die Annahme des Postulates beantragt.

Im Zuge der Beratungen zum CO₂-Gesetz im Juni 2020 hat auch der Nationalrat auf weitere Massnahmen zur Förderung der WKK verzichtet. Weiter hat die UREK-S in der Debatte zum Bundesgesetz über eine sichere Stromversorgung mit erneuerbaren Energien eine Förderung von teilweise fossil-betriebenen WKK-Anlagen vorgeschlagen, welche aber durch den Ständerat im September 2022 abgelehnt wurde.

3 Rahmenbedingungen

3.1 Netto-Null Entscheid des Bundesrats und langfristige Klimastrategie

Die Schweiz hat sich mit der Ratifizierung 2017 des Übereinkommens von Paris (SR 0.814.012) verpflichtet, ihre Treibhausgasemissionen bis 2030 um 50 Prozent gegenüber dem Jahr 1990 zu reduzieren. 2019 hat der Bundesrat zudem beschlossen, dass die Schweiz ihre Treibhausgasemissionen bis 2050 auf Netto-Null absenken soll. Die nationale Umsetzung der Verpflichtungen des Übereinkommens von Paris erfolgt über das CO₂-Gesetz. Das Parlament

verabschiedete im September 2020 die Totalrevision des CO₂-Gesetzes für den Zeitraum 2021 bis 2030. Es beinhaltete ein Reduktionsziel von minus 50 Prozent bis 2030, das zu 75 Prozent im Inland erreicht werden sollte. In der Referendumsabstimmung vom 13. Juni 2021 wurde das Gesetz jedoch abgelehnt. Im Dezember 2021 hat das Parlament der Verlängerung des Reduktionsziel für Treibhausgasemissionen im Inland bis Ende 2024 zugestimmt (Parlamentarische Initiative 21.477 «Verlängerung des Reduktionszieles im geltenden CO₂-Gesetz»). Der Bundesrat hat Ende Dezember 2021 die Vernehmlassung zu einer neuerlichen Totalrevision des CO₂-Gesetzes eröffnet. Der Bundesrat hat die Vorlage am 16. September 2022 dem Parlament überweisen.

Am 28. Januar 2021 hat der Bundesrat zudem seine langfristige Klimastrategie 2050 präsentiert¹. Diese beinhaltet die Leitlinien für die Klimapolitik bis 2050 und legt strategische Ziele für die verschiedenen Sektoren fest. Die Strategie orientiert sich am Netto-Null Ziel des Bundesrats bis 2050.

3.2 Weiterentwicklung der Energiepolitik und Stromversorgungssicherheit

Um das Netto-Null Ziel bis 2050 zu erreichen, müssen die Effizienzpotenziale im Wärmebereich schrittweise ausgeschöpft werden, und es braucht eine rasche Elektrifizierung im Verkehrs- sowie im Wärmesektor. Dazu ist ein rascher Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien unumgänglich, flankiert von spezifischen Massnahmen zur Stärkung der Stromversorgungssicherheit. Die dafür nötigen Änderungen im Energiesgesetz und im Stromversorgungsgesetz hat der Bundesrat am 18. Juni 2021 mit der Botschaft zum Bundesgesetz über eine sichere Stromversorgung mit erneuerbaren Energien vorgelegt. Die Vorlage beinhaltet den konsequenten und beschleunigten Ausbau der erneuerbaren Energien, die Integration der dezentralen erneuerbaren Stromproduktion in den vollständig geöffneten Strommarkt, den Ausbau von im Winter sicher abrufbarer Elektrizität aus der Grosswasserkraft (zusätzliche 2 TWh bis 2040) sowie eine neue Energiereserve als Versicherung für kurzfristige unvorhersehbare Situationen. Die Fortschritte werden mit dem regelmässigen Monitoring der Energiestrategie 2050 und anderen Analysen beobachtet: Falls sich spätestens 2030 abzeichnet, dass das Ausbauziel von zusätzlichen 2 TWh mit der Grosswasserkraft alleine nicht erreicht werden kann, sollen technologieoffene Ausschreibungen für zusätzliche Kapazitäten durchgeführt werden, die kurzfristiger verfügbar wären als neue oder ausgebaute Grosswasserkraftanlagen. Diese Kapazitäten müssen sicher abrufbar und klimaneutral sein. Hier könnten mit erneuerbaren Brennstoffen betriebene WKK-Anlagen auch eine Rolle spielen.

Im Oktober 2021 hat das Parlament der «Parlamentarischen Initiative 19.443»² (Erneuerbare Energien einheitlich fördern. Einmalvergütung auch für Biogas, Kleinwasserkraft, Wind und Geothermie) zugestimmt. Es hat damit einige Elemente aus der Vorlage des Bundesrats vorweggenommen. Dies vor dem Hintergrund, dass 2023 die Förderung von Biogas, Wind, Kleinwasseranlagen sowie der Geothermie mit der kostenorientierten Einspeisevergütung (KEV) ausgelaufen wäre. Mit dem Beschluss des Parlaments werden solche Anlagen künftig mit Investitionsbeiträgen und bis 2030 weiter gefördert.

Seit 2017 untersucht das Bundesamt für Energie (BFE) die mittel- und langfristige Stromversorgungssicherheit alle zwei Jahre mit einer System Adequacy Studie. Die aktuellste Studie aus dem Jahr 2019 zeigt³, dass die Einbindung in den grenzüberschreitenden Stromhandel in Europa für die Schweiz von zentraler Bedeutung ist. Dank der verfügbaren Wasserkraftkapazitäten kann sie auf europäische Entwicklungen reagieren, ohne signifikante Versorgungsprobleme befürchten zu müssen. Durch den Abbruch der Verhandlungen über ein institutionelles Abkommen zwischen der Schweiz und der EU kommt das geplante Stromabkommen vorderhand nicht zustande. Die fehlende institutionalisierte Stromkooperation verursacht Systemrisiken und kann sich bereits ab 2025 negativ auf die Importfähigkeit und die Versorgungssicherheit in der Schweiz auswirken. Der Bundesrat hat deshalb das UVEK beauftragt, in Zusammenarbeit mit der Elektrizitätskommission (EiCom) und unter Einbezug des nationalen Netzbetreibers Swissgrid, die kurz- bis mittelfristigen Auswirkungen auf die Netzsicherheit

¹<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/fachinformationen/emissionsverminderung/verminderungsziele/ziel-2050/klimastrategie-2050.html>

² 19.443 | Erneuerbare Energien einheitlich fördern. Einmalvergütung auch für Biogas, Kleinwasserkraft, Wind und Geothermie | Geschäft | Das Schweizer Parlament.

³ [Modellierung der Erzeugungs- und Systemkapazität \(System Adequacy\) in der Schweiz im Bereich Strom 2019 \(Schlussbericht\)](#)

und die Versorgungssicherheit zu analysieren. Der entsprechende Bericht⁴ wurde im Oktober 2021 publiziert (vgl. Kapitel 3.6).

Am 17. Februar 2022 hat der Bundesrat aufgrund dieses Berichts sowie einer Analyse zu Massnahmen für Stromeffizienz weitere Massnahmen zur Stärkung der Versorgungssicherheit beschlossen. Bereits ab Winter 2022/23 soll eine Wasserkraftreserve zur Verfügung stehen. Zudem hat er das UVEK beauftragt, die für den Bau und Betrieb von Reservekraftwerken notwendigen Bestimmungen zu erarbeiten. Reservekraftwerke sollen bei ausserordentlichen Knappheitssituationen verfügbar sein und dem Emissionshandelsystem unterstellt werden. Geklärt werden soll auch, inwieweit WKK-Anlagen zur Sicherstellung der Stromversorgung im Winter beitragen können. In die gleiche Richtung zielt die vom Parlament noch zu behandelnde Motion NR Nussbaumer (22.3150), die u.a. eine Regulierung für den kostendeckenden Betrieb von WKK-Anlagen vorsieht, die grösstenteils im Winterhalbjahr eingesetzt werden. Weiter bereitet das UVEK Massnahmen zur Erhöhung der Stromeffizienz vor.

Der Krieg in der Ukraine und die damit verbundenen Sanktionen haben unter anderem zu starken Auswirkungen auf den Energiemärkten geführt. Der Bundesrat hat dazu seit März 2022 verschiedene Massnahmen beschlossen. Es geht dabei insbesondere um die Gasbeschaffung für den kommenden Winter⁵, dass die Wasserkraftreserve und Reservekraftwerke bereits für den Winter 2022/2023 zur Verfügung stehen, den Rettungsschirm für die Strombranche sowie um einen intensiven Austausch mit der Energiebranche⁶ im Rahmen der seit Ende 2021 tätigen Taskforce Versorgungssicherheit. Weiter hat die UREK des Ständerats im September 2022 ein Fördermodell für WKK-Anlagen vorgeschlagen, welches Investitionsbeiträge aus dem Netznutzungszuschlag vorsah, wobei die Anlagen zu 60 Prozent mit fossilen Energien betrieben werden dürften.⁷ Dieses Fördermodell wurde am 22. September 2022 im Ständerat jedoch abgelehnt.

3.3 Energieperspektiven 2050+

Die Energieperspektiven 2050+⁸, die das BFE im November 2020 publiziert hat, liefern erstmals Szenarien, welche die Zielsetzungen der Energie- und der Klimapolitik gemeinsam abbilden.

Die Energieperspektiven 2050+ analysieren im Szenario Netto-Null (Szenario ZERO) eine Entwicklung des Energiesystems, die mit dem Netto-Null-Ziel bis 2050 kompatibel ist und gleichzeitig eine sichere Energieversorgung gewährleistet. Innerhalb dieses Szenarios wurden mehrere Varianten mit einem unterschiedlichen Mix an Technologien untersucht.

Das Szenario ZERO Basis zeigt aus heutiger Sicht die grössten Vorteile in Bezug auf Kosteneffizienz, gesellschaftliche Akzeptanz, energetische Versorgungssicherheit sowie der Robustheit der Zielerreichung. Für die Zielerreichung gibt es jedoch einen gewissen Spielraum. Dieser wird in den Varianten ZERO A, B und C aufgezeigt. ZERO A verfolgt eine stärkere Elektrifizierung, ZERO B setzt stärker auf strombasierte Gase wie Wasserstoff und synthetisches Methan sowie auf WKK-Anlagen und in ZERO C erhalten strombasierte flüssige Energieträger und Wärmenetze ein stärkeres Gewicht als in ZERO Basis. Die wichtigsten Resultate der Energieperspektiven 2050+ zu den WKK-Anlagen sind in Kapitel 5 dargestellt.

3.4 Künftige Rolle von Gas und Gasinfrastruktur

Rund die Hälfte des Energiebedarfs in der Schweiz entfällt auf Wärme (und Kälte) für Heizung, Warmwasser und Industrieprozesse. Ein Grossteil davon wird durch die Verbrennung von fossilen Energien erzeugt. Diese werden aus dem Ausland importiert, obwohl erneuerbare Alternativen für die

⁴ [Kurzbericht Netzseitige Massnahmen für die Sicherstellung der kurz- und mittelfristigen Versorgungssicherheit und der Netzstabilität.pdf](#)

⁵ [Ukraine: Bundesrat beschliesst Massnahmen für die Gasversorgungssicherheit im Winter 2022/23 \(admin.ch\)](#)

⁶ [Versorgungssicherheit: Bund intensiviert Austausch mit der Energiebranche \(admin.ch\)](#)

⁷ [Stärkung der Versorgungssicherheit mit ambitionierten Zielen für einen schnellen Ausbau der erneuerbaren Energien \(parlament.ch\)](#)

⁸ [Energieperspektiven 2050+](#)

Wärmeversorgung in der Schweiz teilweise vorhanden wären, wobei unter aktuellen Bedingungen noch nicht in jedem Fall wirtschaftlich. Dies führt zu einem hohen CO₂-Ausstoss und zu einer grossen Auslandabhängigkeit in der Energieversorgung.

Vor diesem Hintergrund hat das BFE im Oktober 2019 ein Positionspapier zur künftigen Rolle von Gas und Gasinfrastruktur in der Energieversorgung der Schweiz publiziert⁹:

Erdgas und erneuerbare Gase sollten möglichst effizient und zweckmässig eingesetzt werden, nämlich dort, wo es mit Blick auf die Energieversorgungssicherheit und den Klimaschutz volkswirtschaftlich am sinnvollsten ist und wo der Einsatz von erneuerbaren Energien kurzfristig zu übermässig hohen Kosten führen würde. Zudem gilt der Grundsatz, dass aus Gas möglichst hochwertige Energie (Strom) bereitgestellt und in Systemen mit einem höchstmöglichen Wirkungsgrad implementiert werden sollte. Erdgas und erneuerbares Gas sollten daher mittel- bis langfristig nur noch in diesen Bereichen eingesetzt werden: In Industrie und Gewerbe für die Erzeugung von Hochtemperaturprozesswärme, im Schwer- und Langstreckenverkehr, für die Spitzenlastabdeckung in Wärmenetzen, die primär mit erneuerbaren Energien gespeist werden, und in wärmegeführten WKK-Anlagen¹⁰ für die kombinierte Strom- und Wärmeproduktion.

Für Raumwärme und Warmwassererwärmung (Niedrigtemperatur-Anwendungen) sollten hingegen ausschliesslich erneuerbare Energien oder Abwärme verwendet werden, wenn dies wirtschaftlich zumutbar ist. Heimisches Biogas ist nur in beschränkten Mengen verfügbar und deshalb teurer als fossiles Erdgas. Es sollte daher langfristig im Gebäudebereich höchstens zur Abdeckung der Spitzenlast verwendet werden.

3.5 Entwicklung thermischer Netze

Um das Netto-Null-Ziel bis 2050 zu erreichen, müssen vorhandene thermische Netze für Niedertemperaturanwendungen im Gebäudebereich konsequent auf erneuerbare Energien oder Abwärme umgestellt werden. Effizienzpotenziale wie die Senkung der Betriebstemperaturen müssen ausgeschöpft und Wärme- sowie Kälteanwendungen wo immer möglich energetisch verknüpft werden. Die CO₂-Emissionen der fossilen Fernwärmeerzeugung werden so deutlich reduziert. Fernwärme ist eine zentrale Option zur CO₂-freien Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser, weil es in der Schweiz umfangreiche Potenziale an erneuerbaren Wärmequellen zur Fernwärmeerzeugung gibt. Das ermittelte Wärmepotenzial aus erneuerbaren Energiequellen und nicht vermeidbarer Abwärme in der Schweiz liegt gemäss Weissbuch Fernwärme Schweiz¹¹ jährlich bei rund 240 TWh. Dieses Potenzial übersteigt den langfristig sinkenden Wärmebedarf für Raumwärme und Warmwasser um ein Vielfaches. Von diesem Potenzial ist allerdings nur ein Teil wirtschaftlich-technisch nutzbar. Das nutzbare Potenzial ist möglichst konsequent zu erschliessen .

Für die CO₂-freie Fernwärmeerzeugung in bestehenden Anlagen wird fossiles Erdgas durch Biogas (Biomethan) bzw. durch klimaneutrale Brennstoffe ersetzt. Bei wärmegeführtem Betrieb decken diese Anlagen insbesondere die Spitzenlast im Fernwärmenetz ab und stellen damit Flexibilität auf der Wärmeseite zur Verfügung. Mittelfristig, das heisst bis 2035, könnten bestehende fossile Spitzenlastkessel in erneuerbaren Fernwärmenetzen durch WKK-Anlagen ersetzt oder ergänzt werden, falls dies zur Verhinderung einer Strommangellage im Winter als sinnvoll erachtet wird. Solche Anlagen würden im Winter bei gleichzeitig hoher Wärme- und Stromnachfrage laufen und könnten sicher abrufbare Elektrizität aus der Grosswasserkraft schonen (vgl. Botschaft zum Bundesgesetz über eine sichere Stromversorgung mit erneuerbaren Energien).

Das Szenario ZERO Basis der Energieperspektiven 2050+ verzichtet bei der Raumwärme auf die Nutzung von strombasierten Energieträgern wie Wasserstoff, da deren Kosten auch langfristig hoch bleiben werden. Stattdessen setzt ZERO Basis auf die Abwärme aus neuen Geothermie-Kraftwerken (langfristig rund 2,8 TWh) und auf die umfassenden Potenziale von Wärmequellen, die mittels

⁹ [Künftige Rolle von Gas und Gasinfrastruktur in der Energieversorgung der Schweiz](#)

¹⁰ Landwirtschaftliche Biogasanlagen können nur bedingt wärmegeführt betrieben werden, da diese in der Regel nicht an ein Wärmenetz angeschlossen sind.

¹¹ Weissbuch Fernwärme Schweiz – VFS Strategie, eicher + pauli, März 2014.

Wärmepumpen zur Wärmeversorgung genutzt werden können. Dazu gehören Grundwasser, Seen, Flüsse aber auch Abwärme in Abwasser von Abwasserreinigungsanlagen (ARA), aus industriellen Prozessen und Kühlanwendungen. Dazu werden Grosswärmepumpen eingesetzt, die langfristig rund 6 TWh an Wärme bereitstellen.

4 Wärme-Kraft-Kopplung in der Schweiz

4.1 Wärme-Kraft-Kopplungstechnologien

In WKK-Anwendungen kommen verschiedene Technologien zum Einsatz (vgl. Anhang 1). Am häufigsten eingesetzt werden heute Gasmotoren, in grösseren Leistungsklassen sind es Dampf- und Gasturbinen, die vor allem in der Industrie zum Einsatz kommen. Zu den noch weniger verbreiteten Technologien und Anwendungen zählen Brennstoffzellen, Geothermie-Anlagen mit Wärmeauskopplung und so genannte Organic-Rankine-Cycle-Anlagen¹².

Die Leistungen von Brennstoffzellensystemen können stark variieren, von weniger als 1 kW_{el} bis zu Hunderten von kW_{el}. Im Betrieb sind Brennstoffzellen sehr flexibel und weisen hohe Wirkungsgrade unter Teillast auf. Je nach Brennstoffzellentyp liegen die Anfahrzeiten im Bereich von Minuten bis Stunden. Brennstoffzellen sind am Markt erhältlich, in der Regel aber auf finanzielle Unterstützung im Rahmen von Demonstrationsprojekten angewiesen. Die Investitionskosten dürften künftig sinken und die Lebensdauer und Wirkungsgrade der Brennstoffzellentypen zunehmen.

Der Übergang von dezentralen WKK-Anlagen im Gebäudebereich mit installierten Leistungen unter 300 kW_{el} zu grösseren Anlagen in Nah- und Fernwärmeverbänden oder grossen Gebäudekomplexen im Bereich von mehreren MW_{el} ist fliessend. In der Industrie werden WKK-Anlagen zur Auskopplung von Prozesswärme genutzt.

4.2 Entwicklung der Wärme-Kraft-Kopplung in der Schweiz

Seit Beginn der 1990er-Jahre wurden insgesamt 580 Klein-WKK-Anlagen realisiert (siehe Fussnote 14). Zunehmend werden ältere, kleine Aggregate durch grössere, neue Aggregate ersetzt. Teilweise wurden Anlagen aber auch ersatzlos stillgelegt, so dass der Anlagenbestand in den vergangenen Jahren stagnierte bzw. zurückging. Entsprechend sank auch die Stromproduktion aus WKK-Anlagen. So produzierten die industriellen WKK-Anlagen im Jahr 2020 nur noch 363.4 GWh¹³, zehn Jahre zuvor waren es 901.7 GWh.

Diese Abnahme der Stromerzeugung aus WKK-Anlagen ist ein Trendumbruch gegenüber des deutlichen Ausbaus der WKK-Anlagen in den 1990er-Jahren. Dies dürfte auf die ungünstigen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen für WKK-Anlagen zurückzuführen sein (vgl. Kapitel 4.5). Dazu gehören die sinkenden Strompreise, die Absenkung der Rückliefertarife durch die Verteilnetzbetreiber, höhere Brennstoffpreise (verursacht durch Marktschwankungen und CO₂-Abgabe) und damit verbunden die ungünstige Entwicklung des Preisunterschieds zwischen Brennstoffinput und Stromoutput. Auch der Wegfall von Industriestandorten hat sich auf die Zahl der industriellen WKK-Anlagen ausgewirkt. Seit Herbst 2021 steigen die Strompreise in Europa. Seit Ausbruch des Ukrainekriegs am 24. Februar 2022 sind die Preise nochmals stark gestiegen und sind sehr volatil. Wie sich diese volatilen Strompreise und die zunehmende Sorge um die Versorgungssicherheit auf die Entwicklung der WKK-Anlagen in der Schweiz auswirken werden, kann heute nicht abschliessend beurteilt werden. Deshalb sind die Auswirkungen der aktuellen geopolitischen Entwicklungen nicht in diesen Bericht eingeflossen.

¹² Der Organic Rankine Cycle (Abkürzung ORC) ist ein Verfahren des Betriebs von Dampfturbinen mit einem anderen Arbeitsmedium als Wasserdampf und kommt vor allem für Wärmequellen mit niedriger Temperatur wie Geothermie-Anlagen zur Anwendung.

¹³ BFE-Statistik «Thermische Stromproduktion inklusive Wärmekraftkopplung (WKK) in der Schweiz», Ausgaben 2010 und 2020.

Unterstützung von mit erneuerbaren Gasen betriebenen WKK-Anlagen

Gemäss geltendem Recht ist für die Verstromung in Biogasanlagen nach dem Auslaufen des Einspeisevergütungssystems Ende 2022 keine Förderung mehr vorgesehen.

Mit der Zustimmung zur Parlamentarischen Initiative 19.443 (vgl. Kapitel 3.2) hat das Parlament die Regulierungslücke für die Förderung unter anderem auch von Biomasseanlagen bis zur Inkraftsetzung des Bundesgesetz über eine sichere Stromversorgung mit erneuerbaren Energien geschlossen. Demnach werden ab 2023 befristet bis 2030 neue Biomasseanlagen sowie die erhebliche Erweiterung oder Erneuerung von Biomasseanlagen mit einem Investitionsbeitrag in der Höhe von maximal 60 Prozent der anrechenbaren Investitionskosten unterstützt. Zudem gibt es einen Betriebskostenbeitrag für die erzeugte Elektrizität. Keinen Anspruch auf Betriebskostenbeiträge haben jedoch Kehrichtverbrennungs-, Schlammverbrennungs-, Klärgas- und Deponiegasanlagen. Dasselbe gilt für Anlagen, die teilweise fossile Brenn- oder Treibstoffe nutzen.

4.3 Optionen für den CO₂-neutralen Betrieb von WKK-Anlagen

Unter Vorgabe des Netto-Null-Ziels bis 2050 ist der Ausbau von WKK-Anlagen nur dann sinnvoll, wenn diese mittel- bis langfristig mit erneuerbaren bzw. synthetischen klimaneutralen Brennstoffen betrieben werden. Dazu bestehen folgende Optionen:

- *Gasbefeuerte Blockheizkraftwerke und Gasturbinen:* Bei gasbefeuerten Blockheizkraftwerken (BHKW) und Gasturbinen bzw. Gas- und Dampfkombikraftwerken kann Erdgas durch Biogas und andere erneuerbare Gasen (Wasserstoff, synthetisches Methan) ersetzt werden. So können Blockheizkraftwerke direkt erneuerbaren Strom und erneuerbare Wärme erzeugen.
- *Brennstoffzellen:* Die meisten Brennstoffzellen werden mit Wasserstoff betrieben (vgl. Anhang 1). Wird der Wasserstoff mit erneuerbarem Strom oder aus Erdgas mit Carbon-Capture and Storage (CCS) hergestellt, ist der Strom aus der Brennstoffzelle CO₂-neutral. Diese Technologie bleibt aber auch mittelfristig teuer und ist vor allem nur dann sinnvoll, wenn eine möglichst autonome Stromversorgung mit lokalem Wasserstoffspeicher angestrebt wird. In den Energieperspektiven 2050+ (vgl. Kapitel 5.3) werden deshalb Brennstoffzellen nicht berücksichtigt. Die Herstellung von Wasserstoff führt zu hohen Wirkungsverlusten, womit die Verstromung in Brennstoffzellen zumindest mit den heute kommerziell verfügbaren Technologien ineffizient und höchstens bei negativen Strompreisen (negative Regelenergie) wirtschaftlich ist. Der Vorteil von Wasserstoff ist, dass er in der bestehenden Erdgasinfrastruktur in kleinen Konzentrationen gespeichert werden kann. Aufgrund der geringen Dichte von Wasserstoff braucht es jedoch drei- bis viermal grössere Speicherkapazitäten als für das Speichern von Erdgas.
- *Kehrichtverbrennungsanlagen:* Die bei der Verbrennung von Kehricht anfallende Wärme wird für die Produktion von Strom und für den Betrieb von Fernwärmenetzen bzw. für Prozesswärme in Industrieanlagen eingesetzt. Bei CO₂-Kompensationsprojekten gilt die Abwärme aus Kehrichtverbrennungsanlagen gemäss CO₂-Gesetz als CO₂-frei, sofern damit fossile Wärme substituiert wird¹⁴. Fernwärme wird heute zu rund 80 Prozent aus der Abfallverbrennung gewonnen.
- *Holzheizkraftwerke:* Holzheizkraftwerke können im Winterhalbjahr und allenfalls ergänzend zu einer andern erneuerbaren Wärmequelle die Wärmenachfrage in Fern- und Nahwärmenetzen abdecken und gleichzeitig erneuerbaren Strom produzieren. Der Brennstoff Holz ist zudem einfach lagerbar. Mit der am 1. Oktober 2021 verabschiedeten Revision des Energiegesetzes gibt es dafür auch Betriebskostenbeiträge.
- *Geothermieanlagen:* Eine weitere Option zur CO₂-freien, gekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung liegt in der Verwendung der Wärme aus tiefen geologischen Wasser- und Gesteinsschichten.

¹⁴ Wären die KVA-Anlagen anstelle in der Branchenvereinbarung im EHS eingebunden, müsste im Umfang der Treibhausgasemissionen Emissionsrechte abgegeben werden.

4.4 Wirtschaftlichkeit der verschiedenen WKK-Technologien

Die Wirtschaftlichkeit von WKK-Anlagen hängt ab vom Strompreis beziehungsweise von den Erlösen aus dem Strom- und Wärmeverkauf. Auf der Kostenseite stehen primär die Kosten für die Beschaffung des eingesetzten Brennstoffs und für die gesetzlichen Auflagen (z.B. CO₂-Abgabe oder Teilnahme am Emissionshandelssystem). Ab etwa 4'000 Betriebsstunden pro Jahr sind die Kapitalkosten gegenüber den Brennstoffkosten bei kleinen Anlagen (ohne KVA und grossen Geothermieanlagen) vernachlässigbar (siehe Kapitel 4.4.2).

4.4.1 Vorausschauende Entwicklung der Brennstoffkosten und der CO₂-Preise gemäss Energieperspektiven 2050+

Die Energieperspektiven 2050+ fokussieren auf die mittel- und langfristigen Entwicklungen des Energiesystems und arbeiten mit verschiedenen Szenarien und technologischen Entwicklungspfaden. Ereignisse wie die COVID-Pandemie und der Krieg in der Ukraine beeinflussen die politischen Rahmenbedingungen. Es ist möglich, dass die gegenwärtige Preis- und Versorgungssituation zu einem schnelleren Ausbau der erneuerbaren Energien und zu einem schnelleren Ergreifen von Effizienzmassnahmen führen kann und somit kurz- bis mittelfristige Entwicklungen beschleunigt werden. Die zukünftigen Energiepreise werden in den Energieperspektiven 2050+ als (exogene) Annahmen gesetzt, um darauf basierend Szenarien zu modellieren.¹⁵

Die Brennstoffkosten von WKK-Anlagen hängen vom eingesetzten Energieträger ab (Erdgas, Biogas, synthetisches Gas oder Wasserstoff). Gemäss Energieperspektiven 2050+ variiert der Erdgaspreis ohne Berücksichtigung der CO₂-Abgabe je nach Anschlussgrösse zwischen 4 Rp/kWh für Grossverbraucher und 9 bis 12 Rp/kWh für Haushalte. Die hier dargestellten Grenzübergangspreise entsprechen Grosshandelspreisen. Der Preis für Biogas liegt bei 12 Rp/kWh und die Preise für synthetische Energieträger wie Wasserstoff und strombasiertes Methan bei 29 Rp/kWh bzw. 43 Rp/kWh (vgl. Abbildung 1).

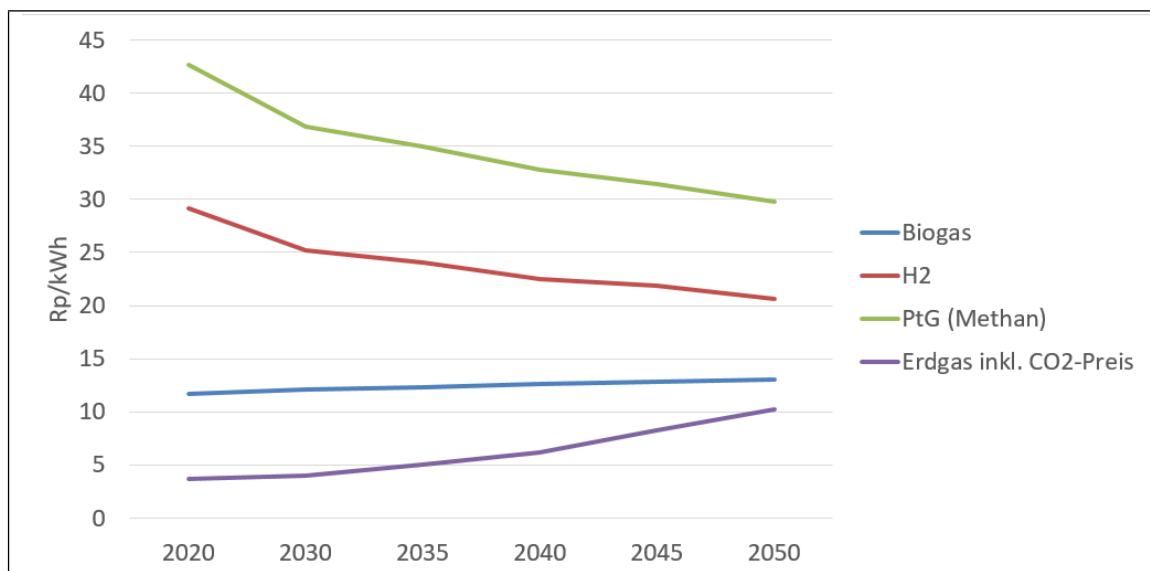


Abbildung 1: Zeitliche Entwicklung der Grenzübergangspreise (in Rp/kWh zu Preisen von 2017) im Szenario ZERO Basis für Erdgas (mit CO₂-Preis EHS, aber ohne Berücksichtigung der CO₂-Abgabe), Biogas, Wasserstoff und synthetische Gase, gemäss Prognos¹⁶ (2021). Die verwendeten Erdgaspreise basieren auf dem World Energy Outlook der IEA, Sustainable Development Scenario (2018). Die verwendeten CO₂-Preise auf Erdgas entsprechen den Annahmen für die Preisentwicklung der Emissionsrechte im europäischen Emissionshandelssystem¹⁷. Dies sind langfristige Preisannahmen, welche die Preisanstiege auf den Rohstoffmärk-

¹⁵ So genannte Wenn-Dann-Aussagen.

¹⁶ Prognos, Energieperspektiven 2050+, Exkurs «Stromerzeugung aus WKK-Anlagen».

¹⁷ Die Annahmen zur Entwicklung der EU-ETS CO₂-Preise stammen aus verschiedenen Quellen. Hauptquelle ist, wie für die fossilen Energieträger, der WEO (IEA, 2018) [auch hier Preise gemäss IEA-Szenario SDS für ZERO-Szenario]. Des Weiteren werden Annahmen der Europäischen Union (Nationale Energie- und Klimapläne (European Commission, 2019) sowie die langfristige strategische Vision der Europäischen Kommission vom November 2018 (European Commission, 2018) herangezogen.

ten seit Herbst 2021 und insbesondere seit Beginn des Kriegs in der Ukraine Ende Februar 2022 nicht berücksichtigen.

Die Preise für synthetische Brennstoffe werden auch in Zukunft höher sein als für fossiles Erdgas. Für die Wirtschaftlichkeit von WKK-Anlagen ist jedoch auch der künftige CO₂-Preis entscheidend. Fossilthermische Kraftwerke sind in dem mit der EU gelinkten Emissionshandelssystem eingebunden und müssen auf dem Markt Emissionsrechte dazukaufen. In seinen Studien zur langfristigen Energieversorgungssicherheit stützt sich das BFE für die europäische CO₂-Preisentwicklung auf Studien der europäischen Kommission¹⁸. Diese gehen davon aus, dass der CO₂-Preis in den Netto-Null-Szenarien bis 2050 in den Sektoren, die im Emissionshandelssystem eingebunden sind, auf 350 EUR/tCO₂ ansteigt. Das bedeutet, dass sich der Preis für Erdgas inklusive CO₂-Emissionsrechten bis 2050 auf rund 100 Franken/MWh¹⁹ oder 10 Rp/kWh erhöhen könnte (vgl. Abbildung 1, wobei hier die neuste Preisentwicklung angesichts der aktuellen geopolitischen Entwicklungen noch nicht berücksichtigt ist).

4.4.2 Strompreise und Vergleich der Stromgestehungskosten mit WKK-Anlagen

Entwicklung der Strompreise

Gemäss den Energieperspektiven 2050+ werden die Strompreise in der Schweiz und den Nachbarländern ab dem Jahr 2035 auf über 100 Franken/MWh ansteigen (Szenario Basis ZERO; angenommene Laufzeit der Kernkraftwerke 50 Jahre). Für das Winterhalbjahr 2050 geht das BFE zudem davon aus, dass die durchschnittlichen wöchentlichen Stromgrosshandelspreise über 200 Franken/MWh liegen werden.

Gestehungskosten von Stromproduktionsanlagen

Die Gestehungskosten von fossilen Gaskombikraftwerken sind im Wesentlichen von den Brennstoffkosten, dem Wirkungsgrad und den jährlichen Betriebsstunden abhängig. Da die Initialinvestition Fixkosten darstellt, gilt folgender Grundsatz: Je weniger Stunden im Jahr die Kraftwerke betrieben werden, desto relevanter ist die Rolle der Kapitalkosten.

Im Szenario ZERO B der Energieperspektiven 2050+ werden zwischen 2030 und 2040 Gasturbinen im Umfang von 2.5 GW Leistung und unter Einsatz von Wasserstoff zugebaut. Sie dienen primär der zusätzlichen Spitzenlastabdeckung während weniger Stunden im Jahr und leisten damit einen Beitrag von rund 0.4 TWh an die Winterstromversorgung (vgl. Kapitel 5.3). Im Szenario ZERO Basis werden keine Gasturbinen zugebaut.

WKK-Anlagen: Abbildung 2 zeigt die Entwicklung der Gestehungskosten bis 2050 von WKK-Anlagen mit elektrischen Leistungen von 10 bis 1000 kW, die mit verschiedenen Brennstoffen betrieben werden. Die Gestehungskosten wurden für den Betrieb mit erneuerbaren Brennstoffen (Biogas und grüner Wasserstoff) vom BFE geschätzt, ebenso die Einpreisung der CO₂-Kosten²⁰ beim Betrieb mit Erdgas; die Entwicklung der Brennstoffkosten wurde aus den Energieperspektiven 2050+ übernommen (vgl. Abbildung 1). Ab etwa 4'000 jährlichen Betriebsstunden sind die Kapitalkosten bei grossen WKK-Anlagen gegenüber den Brennstoffkosten inklusive CO₂-Kosten vernachlässigbar. Bei 4'000 Betriebsstunden betragen die Kapitalkosten gut 1 Rp/kWh, bei 2'000 Betriebsstunden gut 2 Rp/kWh.

Bis 2050 steigen die Gestehungskosten für mit Erdgas betriebene grosse WKK-Anlagen (1000 kW elektrische Leistung) von rund 16 Rp/kWh auf 23 Rp/kWh an. Dies vor allem aufgrund der steigenden Preise für Emissionsrechte innerhalb des Emissionshandelssystems. 2050 haben mit Biogas betriebene grosse WKK-Anlagen die tiefsten Gestehungskosten (20 Rp/kWh). Solche Anlagen könnten somit ab

¹⁸ Long term (2050) projections of techno-economic performance of large-scale heating and cooling in the EU, ILF and AIT on behalf of the EC (DG JRC), 2019.

¹⁹ Gemäss Treibhausgasinventar des BAFU gilt ein Emissionsfaktor für Erdgas von 56.3 Tonnen CO₂ pro TJ oder 202.7 Kilogramm CO₂ pro MWh.

²⁰ Bei den Energieperspektiven 2050+ wird von steigenden Preisen für Emissionsrechte im europäischen Emissionshandelssystem ausgegangen: 2020: 28 Euro pro Tonne CO₂; 2035: 86 Euro pro Tonne CO₂; 2050: 397 Euro pro Tonne CO₂; siehe «Energieperspektiven 2050+ Kurzbericht», Prognos, TEP Energy, Infrac, Ecoplan, 2020.

einem Strompreis von 200 Franken/MWh wirtschaftlich betrieben werden und tragen im Szenario ZERO B mit einer installierten Leistung von 0.7 GW im Jahr 2050 rund 2 TWh an die Stromversorgung bei (vgl. Kap. 5.3). Mit Erdgas oder Wasserstoff betriebene WKK-Anlagen sind hingegen weniger wirtschaftlich.

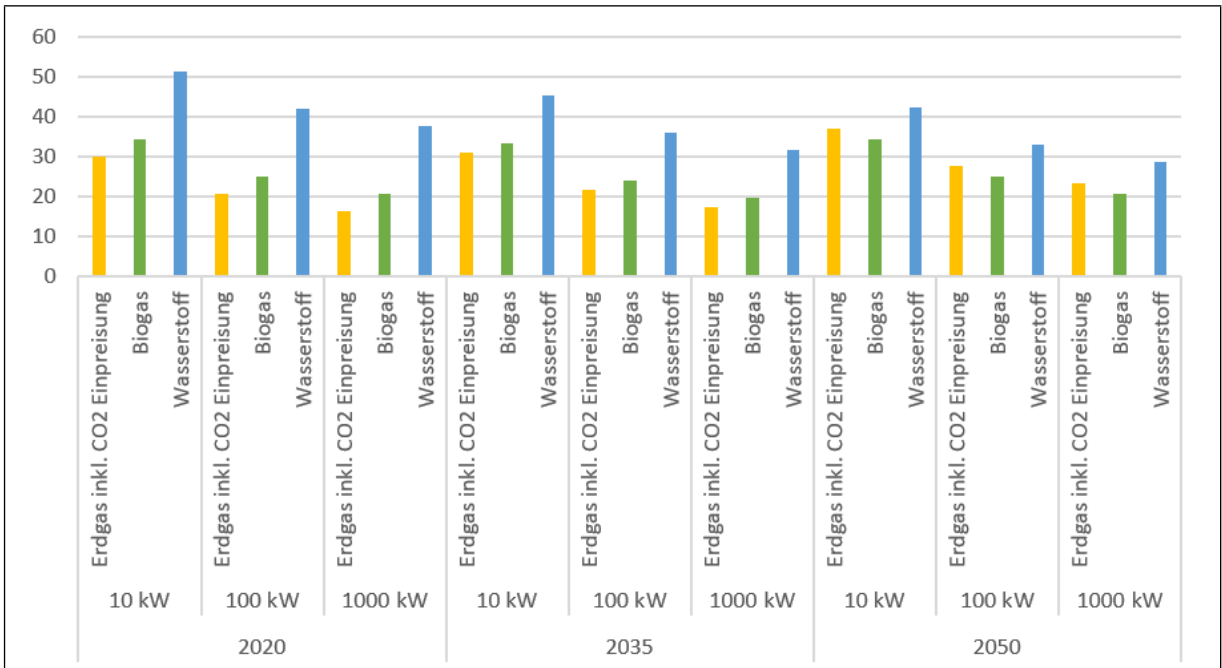


Abbildung 2: Heutige und zukünftige Stromgestehungskosten für fossile WKK-Anlagen (in Rp/kWh) für die Leistungsklassen 10, 100 und 1000 kW elektrisch und 2500 Betriebsstunden pro Jahr, gemäss PSI sowie Abschätzungen BFE für den Betrieb mit Biogas und Wasserstoff. Die Entwicklung der Brennstoffpreise wurde gemäss Abbildung 1 (S.10) angenommen.

In den Energieperspektiven 2050+ spielen zudem kleine mit Erdgas oder Wasserstoff betriebene Gasturbinen im Leistungsbereich von 5 MW_{el} (ohne Wärmeauskopplung), Biomasse-Heizkraftwerke, Kehrlichtverbrennungsanlagen sowie Tiefengeothermiekraftwerke eine Rolle, wobei Gasturbinen einzig in der Variante ZERO B zugebaut werden. Tabelle 1 zeigt die betriebswirtschaftlichen Parameter dieser Kraftwerke. Die Investitionskosten für ein Biomasse-Heizkraftwerk mit Wärmeauskoppelung sind fast zehn Mal höher als für eine einfache Gasturbine, die allerdings während nur rund 160 Stunden pro Jahr²¹ für die Abdeckung der Spitzenlast betrieben wird. Aus diesem Grund werden Biomasse-Kraftwerke neu mit Investitionsbeiträgen unterstützt). Bei den erneuerbaren Heizkraftwerken (mit Wärmeauskopplung) geht man von wesentlich mehr Betriebsstunden aus, weil diese vor allem im Winter zur Deckung der Wärmenachfrage betrieben werden. Die Stromgestehungskosten liegen für Biomasse-Heizkraftwerke und mit erneuerbaren Gasen betriebene Gasturbinen auch 2050 noch über 30 Rp/kWh.

²¹ 160 Stunden Betrieb bei 2.5 GW Leistung ergeben 400 GWh jährlich produzierte Elektrizität.

Technologie	Leistungs- klasse (el.)	Kostenart	Einheit	2020	2030	2040	2050
Gasturbine	5 MW	Investitionskosten	CHF/kW _{el}	838	782	755	755
		Betriebskosten fix	CHF/kW _{el}	43	43	43	43
		Betriebskosten var.	CHF/MWh _{el}	1.7	1.7	1.7	1.7
		Volllaststunden	h	1'500	1'500	1'500	1'500
Biomasse- Heizkraftwerk	5 MW	Investitionskosten	CHF/kW _{el}	7'079	6'904	6'792	6'760
		Betriebskosten fix	CHF/kW _{el}	346	329	313	298
		Betriebskosten var.	CHF/MWh _{el}	2.1	2.1	2.1	2.1
		Volllaststunden	h	2'500	2'500	2'500	2'500
Tiefengeothermie mit Wärmeaus- kopplung	5 MW	Investitionskosten	CHF/kW _{el}	11'021	9'665	8'309	7'785
		Betriebskosten fix	CHF/kW _{el}	239	227.	222	222
		Betriebskosten var.	CHF/MWh _{el}	6.3	6.2	5.7	5.2
		Volllaststunden	h	6'000	6'000	6'000	6'000
Kehrichtver- wertungsanlage		Investitionskosten	CHF/kW _{el}	4'580	4'400	4'312	4'312
		Betriebskosten fix	CHF/kW _{el}	97	93	92	92
		Betriebskosten var.	CHF/MWh _{el}	1.1	1.1	1.1	1.1
		Volllaststunden	h	3'000	3'000	3'000	3'000
Gasturbine mit Ein- satz von H ₂	5 MW	Investitionskosten	CHF/kW _{el}	1'258	1'094	981	905
		Betriebskosten fix	CHF/kW _{el}	43	43	43	43
		Betriebskosten var.	CHF/MWh _{el}	1.7	1.7	1.7	1.7
		Volllaststunden	h	1'500	1'500	1'500	1'500

Tabelle 1: Betriebswirtschaftliche Parameter für den Betrieb von Gasturbinen, Biomasse-Heizkraftwerke, Kehrichtverwertungsanlagen und Tiefengeothermie-Kraftwerken (Quelle: Exkurs WKK-Anlagen, Prognos 2021)

Exkurs: Gestehungskosten von Brennstoffzellen

Im Bericht 2022 zu den Gestehungskosten von Stromproduktionstechnologien²² schätzt das PSI, dass die Gestehungskosten für Brennstoffzellen unterschiedlicher Leistungsklassen im Jahr 2050 wesentlich höher als für Gaskombikraftwerke und deutlich über dem Strommarktpreis liegen werden (vgl. Tabelle 2).

Die vom PSI betrachteten Brennstoffzellen erzeugen Strom und Wärme elektrochemisch aus Methan (Erdgas oder Biogas). Systeme, die mit Wasserstoff als Brennstoff funktionieren, sind mit einem so genannten Reformier ausgestattet, um vor Ort aus Erdgas Wasserstoff zu erzeugen. Wird grüner Wasserstoff verwendet, fallen die Kapitalkosten für den Reformier weg.

²² Paul Scherrer Institut 2022, Electricity storage and hydrogen – technologies, costs and climate impact. Including Updates of costs and potentials of photovoltaics and wind power.

	<i>Elektrische Leistung</i>	<i>Neue Anlagen heute</i>	<i>Neue Anlagen 2035</i>	<i>Neue Anlagen 2050</i>
<i>Protonenaustauschmembran-Brennstoffzelle (PEFC)</i>	1 kW	49 - 104	23 - 48	21 - 46
<i>Festoxidbrennstoffzelle (SOFC)</i>	1 kW	57 - 109	23 - 48	20 - 45
<i>Festoxidbrennstoffzelle (SOFC)</i>	300 kW	29 - 63	16 - 39	16 - 25
<i>Schmelzkarbonatbrennstoffzelle (MCFC)</i>	300 kW	19 - 34	17 - 32	16 - 26
<i>Phosphorsäurebrennstoffzelle (PAFC)</i>	300 kW	19 - 35	15 - 24	15 - 23

Tabelle 2: Heutige und zukünftige Stromgestehungskosten für Brennstoffzellen (in Rp/kWh), gemäss PSI.

Fazit

Die Stromgestehungskosten von mit Erdgas oder mit CO₂-neutralen synthetischen Brennstoffen betriebenen WKK-Anlagen werden langfristig wesentlich höher sein als jene von erneuerbaren Stromproduktionsanlagen²³, die bei fluktuierender Produktion mit einem Tagesspeicher (z.B. Batterie) betrieben werden können. Wegen der hohen Brennstoffkosten für alle hier betrachteten Energieträger können solche stromgeführten WKK-Anlagen mittel- bis langfristig allenfalls mit Investitionsbeiträgen wirtschaftlich betrieben werden.

4.5 Eignung von WKK-Technologien für die Winterstromversorgung

WKK-Anlagen erreichen nur dann einen hohen Wirkungsgrad, wenn Strom und Wärme gleichzeitig genutzt werden können, wenn also der Wärmeabsatz gesichert ist. Man spricht vom *wärmegeführten* Betrieb. Durch einen Wärmespeicher kann die Wärme zu einem im Tagesgang zeitlich verschobenen Zeitpunkt genutzt werden.

Durch die gleichzeitige Auskopplung von Wärme und Strom können WKK-Anlagen jedoch nur bedingt systemdienlich zur Stromversorgungssicherheit im Winter beitragen (vgl. Postulat 16.3890 «Stromverbrauch. Wie hoch ist der jährliche Stromverbrauch für von Elektrizitätswerken gesteuerte Verbraucher wie Elektroboiler, Speicherheizungen, Wärmepumpen, Pumpspeicher usw. in der Schweiz?»). Für einen systemdienlichen Betrieb müssten die WKK-Anlagen *strom- und nicht wärmegeführt* betrieben werden. Das ist aber nur dann sinnvoll, wenn die erzeugte Wärme kurzfristig (im Tagesverlauf) zwischengespeichert werden kann und der Wärmebedarf zu jeder Zeit abgedeckt bleibt.

Aus diesem Grund können WKK-Anlagen im Vergleich zu Wasserkraftanlagen oder Gasturbinen (ohne Wärmeauskopplung) weniger flexibel auf eine erhöhte Stromnachfrage reagieren. Anders ist die Situation, wenn WKK-Anlagen in Kombination mit einer anderen Wärmequelle – beispielweise mit Abwärme aus einer Kehrlichtverbrennungsanlage – betrieben werden. In diesem Fall können sie zur Abdeckung der Spitzenlast für Wärme im Fernwärmenetz eingesetzt werden und gleichzeitig Strom in das Netz einspeisen. Solche Anlagen würden im Winter bei gleichzeitig hoher Wärme- und

²³ Zu den Gestehungskosten von Stromproduktionsanlagen, siehe Berichte des PSI unter folgendem Link: <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/stromversorgung/bundesgesetz-erneuerbare-stromversorgung.html#kw-98276>

Stromnachfrage laufen und könnten sicher abrufbarer Elektrizität aus der Grosswasserkraft schonen (vgl. Kapitel 3.5).

Heimisches Biogas aus Abfällen und Hofdünger kann während des ganzen Jahres produziert und in einem Blockheizkraftwerk (BHKW) verstromt oder aufbereitet in das Gasnetz eingespeist werden. Die saisonale Lagerung von Biogas ist aufgrund der fehlenden Speicher in der Schweiz aufwendig. Die kurzfristige Lagerung ermöglicht jedoch, tägliche Nachfrageschwankungen von Strom auszugleichen. Zu Tageszeiten mit hohen Strompreisen kann das Biogas bedarfsgerecht im BHKW verstromt werden²⁴.

Auch Abwasserreinigungsanlagen (ARA) können bedarfsgerecht Strom aus Klärgas bereitstellen. Im Rahmen eines Leuchtturmprojektes des BFE wurde bei fünf ARA ein Regelpooling zum Lastausgleich des Stromnetzes untersucht. Es wurde nachgewiesen, dass ARA so genannte Sekundärregelleistungen bereitstellen²⁵ können.

Kehrichtverbrennungsanlagen (KVA) verwerten über das ganze Jahr eine relativ konstant anfallende Menge an Siedlungsabfall. Auch wenn bereits Pilotprojekte durchgeführt worden sind, mit denen der Siedlungsabfall vom Sommer in den Winter gespeichert worden ist, kommt für KVA-Anlagen vorwiegend der Grundlastbetrieb in Frage: Die Anlagen produzieren während des ganzen Jahres mit konstanter Leistung Strom, im Sommer mehr, da weniger Wärme ausgekoppelt werden muss.

Bei der Beurteilung von WKK-Technologien auf ihre Eignung für die Winterstromversorgung muss berücksichtigt werden, dass gasförmige Brennstoffe kaum in grösseren Mengen gelagert werden können. Der Bundesrat hat in der Botschaft für eine sichere Stromversorgung mit erneuerbaren Energien bei den Massnahmen zur Verbesserung der Stromversorgungssicherheit im Winter explizit das Kriterium «sicher abrufbar» aufgenommen, was eine gewisse Speicherfähigkeit bedingt.

5 WKK-Anlagen in der künftigen Energieversorgung

5.1 Erkenntnisse zum Stromsektor aus den Energieperspektiven 2050+

Mit Bezug auf die langfristige Stromversorgungssicherheit liefern die Energieperspektiven 2050+ folgende Erkenntnisse. Dies hauptsächlich basierend auf dem Basisszenario ZERO:

- Der Anstieg des Stromverbrauchs der Schweiz (Landesverbrauch inklusive Übertragungsverluste) wird durch Energieeffizienzmassnahmen gedämpft. Der gesamte Stromverbrauch steigt unter Berücksichtigung des Verbrauchs für Elektrofahrzeuge und Wärmepumpen sowie des Verbrauchs von Speicherpumpen auf rund 84 TWh im Jahr 2050. Im Jahr 2035 beträgt der Stromverbrauch rund 74 TWh.
- Die Stromerzeugung der Schweiz kann bis 2050 praktisch vollständig auf Wasserkraftwerke und erneuerbare Energien umgestellt werden. Voraussetzung dafür ist ein umfassender Ausbau der erneuerbaren Energien.
- Importe aus dem europäischen Ausland ergänzen die inländische Stromproduktion zur Deckung des jährlichen Strombedarfs. Der jährliche Importsaldo sinkt nach einem Anstieg aufgrund der Ausserbetriebnahme der Kernkraftwerke kontinuierlich und ist 2050 ausgeglichen. Im Winterhalbjahr 2035 betragen die Importe je nach Variante 12 bis 16 TWh.
- Im Vergleich dazu bleibt der Ausbau erneuerbarer Energien unter aktuellen Rahmenbedingungen (Szenario WWB) deutlich hinter dem notwendigen Ausbau zur Deckung des inländischen Jahresverbrauchs bis 2050 zurück.
- Der höhere Stromverbrauch in Variante ZERO A erfordert durch die Zielsetzung der ausgeglichenen Jahresbilanz im Jahr 2050 einen höheren Ausbau erneuerbarer Energien als in ZERO Basis. Die Stromerzeugung erneuerbarer Energien liegt im Jahr 2050 in der Variante ZERO A um rund 4 TWh über der Variante ZERO Basis, im Jahr 2035 liegt der Beitrag der

²⁴ Optimierter Flexibilitätseinsatz im Verteilnetz, Adaptricity, 2019, im Auftrag des BFE.

²⁵ Regelpooling mit Infrastrukturanlagen, Infracore, Alpiq und Ryser Ingenieure, 2017, im Auftrag des BFE.

erneuerbaren Stromerzeugung in beiden Varianten bei 17 TWh. Im Vergleich dazu ist der Ausbau erneuerbarer Energien in Variante ZERO B tiefer. Ein Zubau von mit Wasserstoff betriebenen Gasturbinen in Variante ZERO B ab dem Jahr 2035 sorgt für mehr gesicherte Leistung. Die Anlagen leisten bei einem marktgeführten Einsatz einen vergleichsweise geringen Beitrag zur Reduktion der Stromimporte.

- Der Zubau erneuerbarer Stromproduktion mit hohen Anteilen an Photovoltaik muss rasch und in einem Ausmass erfolgen, welches deutlich über das heutige Niveau hinausgeht. Im Jahr 2035 beträgt die erneuerbare Stromerzeugung (exkl. Wasserkraft) rund 17 TWh, im Jahr 2050 sind es 39 TWh (darin berücksichtigt sind abgeregelte Strommengen von rund 3 TWh).
- Wasserkraftwerke, zukünftige Flexibilität im Stromverbrauch und Batteriespeicher leisten wesentliche Beiträge zur Integration grosser Mengen erneuerbarer Energien im Stromsystem der Schweiz. Zentrale Voraussetzungen dafür sind die Nutzung der Flexibilitätspotenziale beim Stromverbrauch, der Erhalt des Bestandes und der Zubau von flexiblen Wasserkraftwerken, dezentrale Batteriespeicher in Kombination mit Photovoltaik-Anlagen sowie die Bereitstellung der notwendigen Netzinfrastruktur. Die Stromversorgung der Schweiz ist durch den hohen PV-Ausbau und die Wasserkrafterzeugung langfristig durch hohe Sommeranteile und entsprechend tiefere Winteranteile gekennzeichnet. Speicherkraftwerke und WKK-Anlagen können ihre Produktion zum Teil in das Winterhalbjahr verschieben. Im Winterhalbjahr bleibt die Schweiz wie in den vergangenen Jahrzehnten jedoch Nettoimporteur.
- Der notwendige Stromimport ist über den gesamten Betrachtungszeitraum gewährleistet, wenn das Stromsystem der Schweiz international gut eingebunden bleibt. Im Winter ergänzen insbesondere Stromimporte aus Windenergie die inländische Stromerzeugung aus Wasserkraftwerken und erneuerbaren Energien.

5.2 Erkenntnisse zum Wärmesektor aus den Energieperspektiven 2050+

Die Erkenntnisse aus den Energieperspektiven 2050+ bestätigen, dass ein mit dem Stromsektor eng vernetzter Wärmesektor (Sektorkopplung) eine zentrale Rolle bei der inländischen Reduktion der Treibhausgasemissionen zukommen wird:

- Dank Wärmenetzen mit erneuerbaren Energieträgern können die Treibhausgasemissionen aus der Wärmeversorgung reduziert werden. In manchen Bau- und Siedlungszonen sind sie aufgrund von technischen Restriktionen und mangels lokaler Potenziale neben einer Versorgung mit erneuerbarem Gas die zentrale Möglichkeit zur CO₂-freien Deckung des Wärmebedarfs.
- Die CO₂-arme Fernwärmeversorgung erfolgt mit Holz oder Abfall betriebenen WKK-Anlagen sowie durch die verstärkte Nutzung von Abwärme und Umweltwärme aus der Luft, dem Boden und aus Gewässern mittels Wärmepumpen sowie mit der direkten Nutzung der Geothermie.
- In der Strom- und Wärmeerzeugung (Umwandlungssektor) verbleiben Treibhausgasemissionen aufgrund der fossilen Anteile des in Kehrlichverwertungsanlagen eingesetzten Kehrlichs. Diese müssen mittels Carbon-Capture and Storage (CCS) Technologien abgeschieden und gespeichert werden.

5.3 Die Wärme-Kraft-Kopplung in den Energieperspektiven 2050+

Die Stromversorgung der Schweiz ist durch den hohen Ausbau der Photovoltaik, die Wasserkrafterzeugung und langfristig durch hohe Sommeranteile sowie entsprechend tiefere Winteranteile gekennzeichnet. Der Winteranteil der gesamten Stromerzeugung der Schweiz beträgt im Jahr 2050 im Szenario ZERO Basis rund 42 Prozent²⁶. Entsprechend liegt eine wesentliche Herausforderung in der Sicherstellung der Stromversorgung im Winterhalbjahr.

²⁶ EE Variante ausgeglichene Jahresbilanz, Laufzeit Kernkraftwerke 50 Jahre.

Die Variante ZERO B der Energieperspektiven setzt im Vergleich zum Szenario ZERO Basis auf einen verstärkten Ausbau der Gasinfrastruktur und der Wärme-Kraft-Kopplung. Durch die weniger hohe Elektrifizierung in dieser Variante ist ein geringerer Ausbau an erneuerbaren Energien notwendig und es wird angenommen, dass es weniger flexible Stromverbraucher gibt (weniger Elektrofahrzeuge).

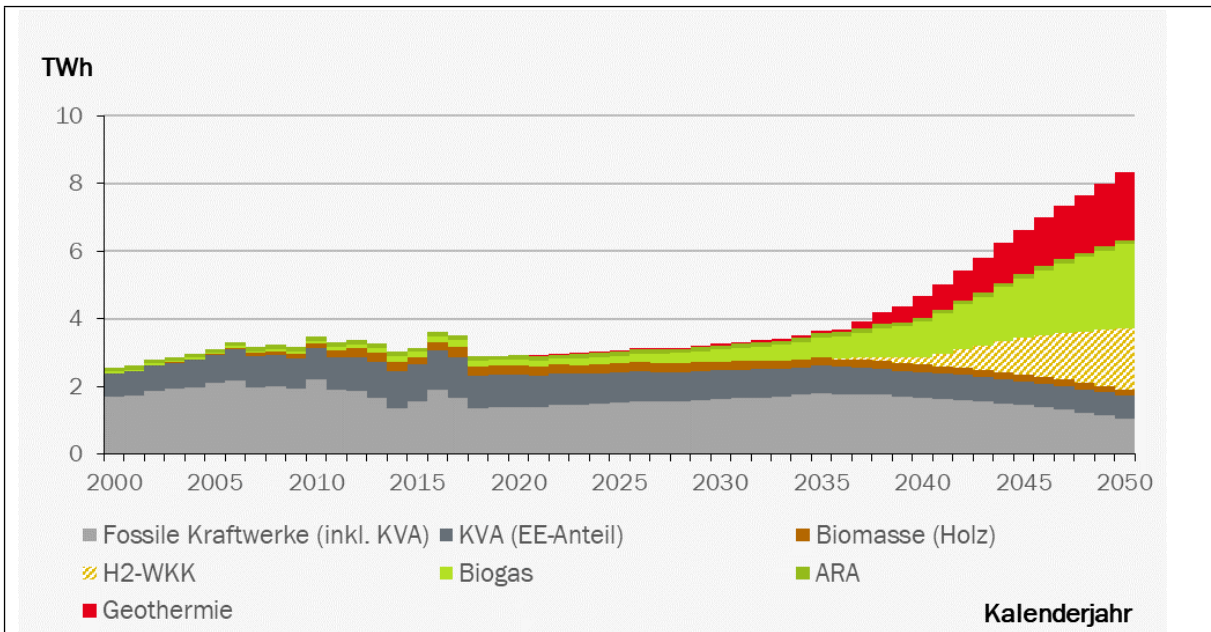


Abbildung 3: Entwicklung der Stromerzeugung aus WKK-Anlagen nach Energieträgern bis 2050, Variante ZERO B, ausgeglichene Jahresbilanz, angenommene KKW Laufzeit 50 Jahre. Quelle: Exkurs WKK, Prognos.

Die Stromproduktion aus WKK-Anlagen steigt in der Variante ZERO B bis 2050 auf rund 8 TWh beziehungsweise 2.2 GW installierter Leistung an. In der Variante ZERO Basis sind es hingegen nur 5 TWh Energie und 1.2 GW Leistung. In ZERO B werden vor allem mit Biogas betriebene WKK-Anlagen (2.5 TWh im Jahr 2050) und ab 2035 mit Wasserstoff betriebene WKK-Anlagen (1.8 TWh im Jahr 2050) zugebaut. Wie in ZERO Basis werden die fossil betriebenen WKK-Anlagen auf Biogas umgestellt, zudem erfolgt ein Zubau von 2.5 GW Gasturbinenleistung ohne Wärmeauskopplung. Der Anteil von Holzheizkraftwerken und ARA ist relativ klein. Biogas und strombasierte erneuerbare Energieträger (z.B. Wasserstoff) werden mehrheitlich importiert.

Neben dem Beitrag der Speicherkraftwerke und dem Zusammenspiel mit dem europäischen Ausland kommt den WKK-Anlagen bei der inländischen Stromproduktion im Winterhalbjahr eine wichtige Bedeutung zu: Bei einem wärmegeführten Betrieb liegt der Schwerpunkt der Stromerzeugung im Winterhalbjahr. Wenn die Anlagen stromgeführt betrieben werden, orientiert sich ihr Einsatz an den Strompreisen am Grosshandelsmarkt. Entsprechend wird Flexibilität in jenen Stunden bereitgestellt, in denen das Dargebot erneuerbarer Energien tief sowie der Verbrauch und der Strompreis hoch sind. Solche Situationen treten an kalten Wintertagen auf. Werden die Anlagen stromgeführt betrieben, ergibt dies nur Sinn, wenn die Wärme direkt genutzt oder zwischengespeichert werden kann.

5.3.1 Winterstromerzeugung und Flexibilität im künftigen Stromsystem

Durch die steigenden Anteile erneuerbarer Energien erhöht sich der Anteil der Stromerzeugung mit fluktuierendem Einspeiseprofil. Gleichzeitig weist das Stromsystem der Schweiz zukünftig aufgrund der hohen Erzeugung aus Wasserkraft und Photovoltaik einen vergleichsweise tiefen Winterproduktionsanteil auf. Daher ist die flexible Stromerzeugung im Winterhalbjahr in Zukunft von hoher Bedeutung.

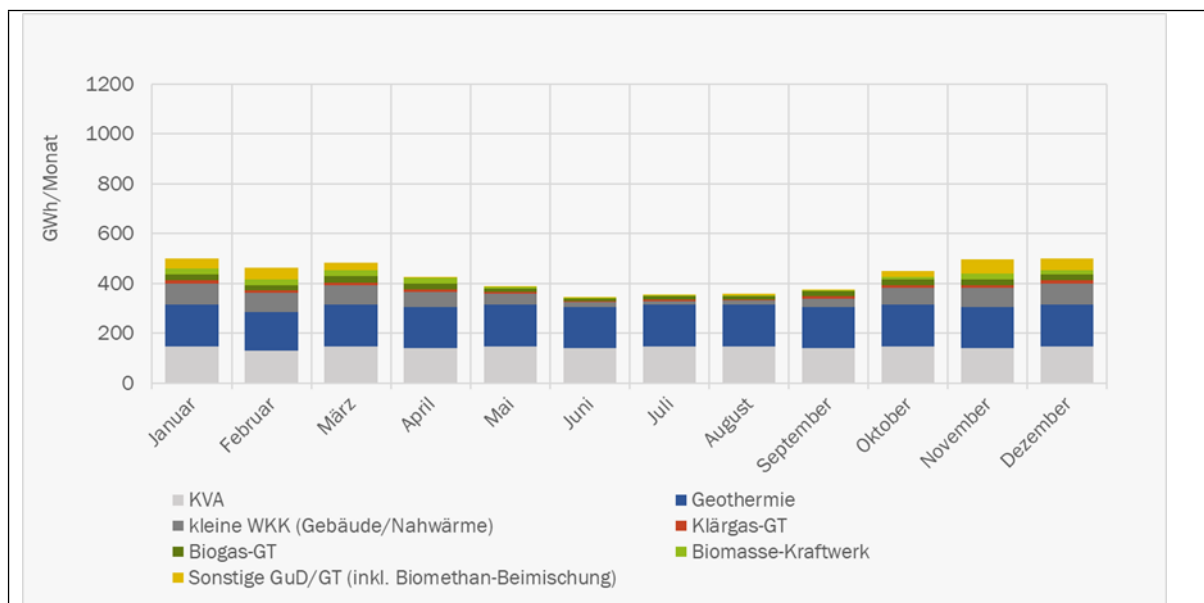
Neben der Wasserkraft können auch WKK-Anlagen flexible inländische Leistung zur Verfügung stellen. Bei einem stromgeführten Betrieb orientiert sich ihr Einsatz an den Strompreisen und liegt daher perspektivisch vor allem in Zeiten tiefer Einspeisung erneuerbarer Energien. Bei einem wärmegeführten Betrieb fällt ein Grossteil der Stromerzeugung aufgrund des hohen Wärmebedarfs im Winterhalbjahr an.

Im Vergleich zum Szenario ZERO Basis erfolgt in der Variante ZERO B ein zusätzlicher Ausbau von wärmegeführten WKK-Anlagen und stromgeführten Gasturbinen unter Einsatz von Wasserstoff. Bis 2050 werden Gasturbinen mit einer Leistung von insgesamt 2,5 GW zugebaut. Wärmegeführte WKK-Anlagen stellen eine zusätzliche elektrische Leistung von rund 0,7 GW bereit²⁷.

Die Stromproduktion in ZERO B ist in den Wintermonaten (November bis Februar) mit durchschnittlich rund 1'000 GWh pro Monat doppelt so hoch als in Variante ZERO Basis (vgl. Abbildung 4). In ZERO B werden im Winterhalbjahr rund 5,3 TWh mit WKK-Anlagen produziert, oder rund 14 Prozent der Winterstromnachfrage von 38 TWh.

Kehrichtverbrennungsanlagen und Geothermie-Kraftwerke laufen im Grundlastbetrieb mit entsprechend hohen Volllaststunden. Entsprechend fällt ihre Stromerzeugung je zur Hälfte im Sommer und Winter an. Kleine WKK-Anlagen in Gebäuden und Nahwärmeverbunden werden wärmegeführt betrieben: Bei ihnen überwiegt deshalb die Stromerzeugung im Winterhalbjahr. Stromgeführte WKK-Anlagen – dezentrale Biogas- und Klärgas-Anlagen, ein Teil der Biomassekraftwerke sowie Gasturbinen – stellen Flexibilität in Stunden hoher Strompreise bereit, das heisst bei geringer erneuerbarer Stromerzeugung und hoher Nachfrage. Da diese Anlagen nur während weniger Stunden im Jahr laufen, ist ihr Beitrag zur Monatsproduktion auch in ZERO B entsprechend gering.

Durch den höheren Ausbau an kleinen WKK-Anlagen (primär mit Biogas befeuert) und von mit Wasserstoff betriebenen WKK-Anlagen, die im Winter betrieben werden und Wärme in Fernwärmenetze auskoppeln, ist die Stromerzeugung aus der Wärme-Kraft-Kopplung in ZERO B mehr als 3 TWh höher als in der Variante ZERO Basis. Im Jahr 2050 hat die gekoppelte Stromproduktion in ZERO B eine Leistung von 4.5 GW (vgl. Abbildung 3). Der Zubau dieser WKK-Anlagen erfolgt ab 2030.



²⁷ Siehe Prognos, Kurzbericht Energieperspektiven 2050+

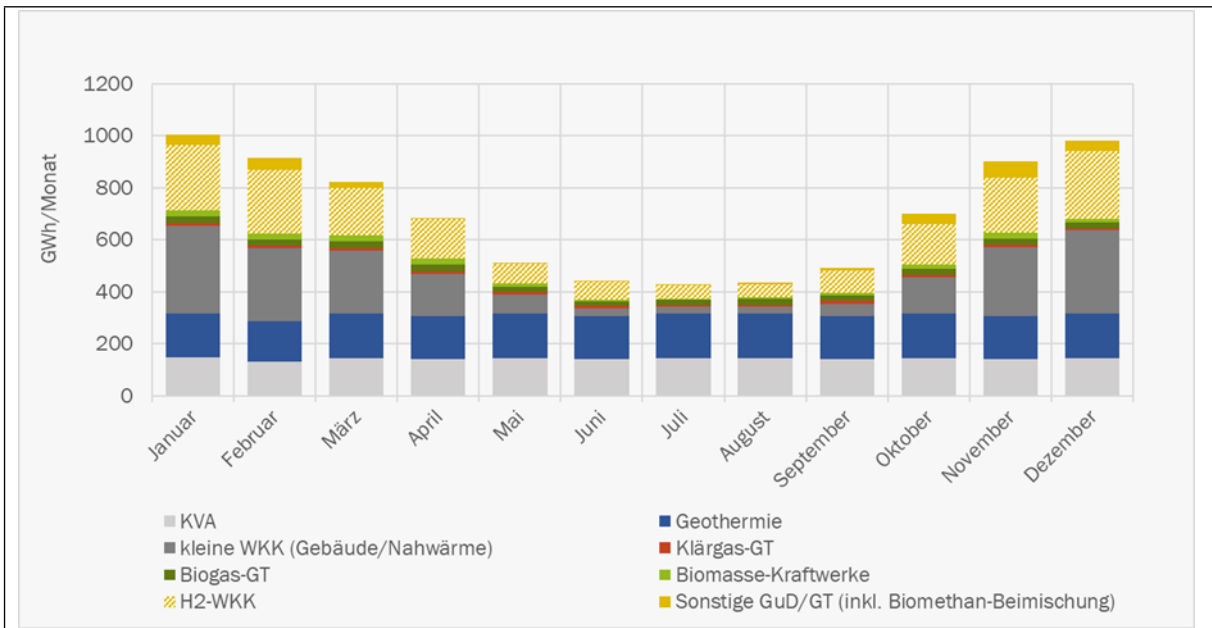


Abbildung 4: Vergleich der monatlichen Stromerzeugung von WKK-Anlagen in den Szenarien ZERO Basis (oben) und ZERO B (unten) für das Jahr 2050. GT steht für Gasturbine; H2-WKK für mit Wasserstoff betriebene WKK-Anlage (keine Brennstoffzelle, sondern Gasmotor oder Gasturbine). Quelle: Exkurs WKK-Anlagen, Prognos.

5.3.2 Vorschläge von Verbänden

Im Herbst 2021 hat der WKK-Fachverband Powerloop ein so genanntes «Versicherungsmodell» lanciert. Es sieht den schrittweisen Zubau von rund 2'000 stromgeführten WKK-Anlagen bis 2050 vor, die hauptsächlich mit fossilem Gas und später mit erneuerbaren bzw. klimaneutralen Brennstoffen betrieben werden sollen. Die Anlagen würden nur dann in Anspruch genommen, wenn die Grenzkosten gedeckt sind, eine Nachfrage nach Strom und Wärme besteht und letztere nicht ausreichend aus erneuerbarer Produktion zur Verfügung gestellt werden kann (wenige Tag im Jahr). Inzwischen hat der Verband sein Konzept weiterentwickelt und setzt den Fokus auf wärmegeführte WKK-Anlagen. Diese sollen im Winterhalbjahr klimaneutrale Wärme produzieren, die vollständig genutzt werden kann. Zusätzlich produzieren die Anlagen Winterstrom. Vorgesehen ist der Zubau von 365 WKK-Anlagen mit einer elektrischen Leistung von insgesamt 500 MW bis 2035. Je nach Grösse sollen diese in Liegenschaften, in kleinen Quartieren mit Wärmenetzen, in der Industrie oder in Fernwärmeverbänden eingesetzt werden. Gleichzeitig schlägt Powerloop die Förderung von Power-to-X-Anlagen (insgesamt 500 MW Leistung) sowie eines saisonalen Speichers (1 TWh) bis 2035 vor.

Swisspower, der Verband der Stadtwerke und der regionalen Energieversorgungsunternehmen, will urbane thermische Netze in Städten und in der Agglomerationen zubauen. Dabei sollen wärmegeführte WKK-Anlagen intelligent in diese Netze integriert werden. Konkret soll die Hauptwärmequelle im Fernwärmenetz erneuerbar sein (KVA, Seewärme, Geothermie, Holz etc.) und von der WKK-Anlage nicht konkurrenziert werden. Die WKK-Anlagen wiederum produzieren im Winterhalbjahr erneuerbare bzw. klimaneutrale Wärme für die thermischen Netze und liefern zudem Strom zur Deckung des Winterbedarfs.

6 Schlussfolgerungen

6.1 Transformation zum Energiesystem der Zukunft

Die Sektoren Strom, Wärme und Verkehr vernetzen sich (Sektorkopplung). Der Bundesrat hat im September 2019 beschlossen, dass auch die Energieversorgung bis 2050 CO₂-neutral erfolgen muss (Netto-Null Ziel). Damit dieses Ziel erreicht werden kann, muss frühzeitig der Umstieg auf eine möglichst vollständig erneuerbare Energieversorgung im Strom-, Wärme- und Mobilitätsbereich erfolgen. Dabei muss der Stromsektor eng mit dem Wärme- und dem Mobilitätssektor vernetzt bzw. gekoppelt werden, um erneuerbaren Strom effizient direkt in Wärmepumpen und in der Elektromobilität zu nutzen. Damit werden CO₂-Emissionen verringert bzw. neue, zusätzliche CO₂-Emissionen vermieden. Unvermeidbare CO₂-Emissionen – z.B. in Kehrichtverbrennungsanlagen oder in der Zementindustrie – werden abgeschieden, genutzt oder gespeichert. Gemäss den Energieperspektiven 2050+ werden 2050 jährlich rund 12 Millionen Tonnen CO₂ abgeschieden bzw. kompensiert, davon könnten dereinst jährlich höchstens 4 Millionen Tonnen in der Schweiz gelagert werden.

Ein umfassender Ausbau der erneuerbaren Energien ist nötig. In den Energieperspektiven 2050+ wird das Netto-Null-Ziel abgebildet und der damit verbundene Anstieg des Stromverbrauchs bis 2050. Dieser wird durch Effizienzmassnahmen gedämpft, die über die Zeitachse verstärkt werden. Die Energieperspektiven 2050+ zeigen, dass die Stromerzeugung bis 2050 praktisch vollständig auf Wasserkraftwerke und neue erneuerbare Energien umgestellt und der Jahrestromverbrauch gedeckt werden kann. Voraussetzung dafür ist ein umfassender Ausbau der erneuerbaren Energien. Stromimporte werden – bei einem ausgeglichenen jährlichen Importsaldo – allerdings weiterhin nötig sein.

Der starke Ausbau der Photovoltaik und der Wasserkrafterzeugung führt zu hohen Sommerproduktionsanteilen und entsprechend tieferen Winteranteilen. **Batteriespeicher, flexible Verbraucher und flexible Produktionsanlagen leisten wesentliche Beiträge zur Integration grosser Mengen erneuerbarer Energien im Stromsystem und zur Winterstromversorgung.** Dazu zählen neben Wind- und Geothermieanlagen auch WKK-Anlagen, sofern die Wärme gleichzeitig genutzt oder zwischengespeichert werden kann. Diese werden hauptsächlich wärmegeführt und ausschliesslich mit erneuerbaren Brennstoffen betrieben.

Im Wärmebereich reduzieren mit erneuerbaren Energien betriebene Wärmenetze die Treibhausgasemissionen. Die CO₂-freie Fernwärmeversorgung erfolgt durch mit Biomasse oder Geothermie betriebene WKK-Anlagen, durch die verstärkte direkte Nutzung von Geothermie und Hochtemperaturabwärme sowie durch die konsequente Nutzung von Umweltwärme aus der Luft, dem Boden und aus Gewässern mittels Wärmepumpen. Der starke Ausbau thermischer Netze bedingt jedoch, dass das vorhandene Potenzial in den Regionen frühzeitig konsequent erkannt und ausgeschöpft wird. Der Zubau an dezentralen, erneuerbaren Wärmeversorgungsanlagen (Einzelheizungssysteme) kann die Wirtschaftlichkeit thermischer Netze reduzieren bzw. erhöht in Folge die Bandbreite der spezifischen Wärmegestehungskosten je Gebäude. Generell wird erneuerbare Wärme mit steigender Höhe der CO₂-Abgabe wirtschaftlicher.

6.2 Künftige Rolle von WKK-Anlagen in der Stromversorgung

WKK-Anlagen liefern einen Beitrag zur Stromproduktion im Winter, sofern die Anlagen wärmegeführt und mit erneuerbaren Energien betrieben werden. Bei einem *wärmegeführten* Betrieb liegt der Schwerpunkt der Stromerzeugung aufgrund des höheren Raumwärmebedarfs im Winterhalbjahr. Damit können die Wasserkraftspeicher geschont werden. Wenn die WKK-Anlagen *stromgeführt* betrieben werden, orientiert sich der Einsatz an den Strompreisen am Grosshandelsmarkt und sie funktionieren wie ein Reservekraftwerk.

WKK-Anlagen eignen sich nur beschränkt für den stromgeführten Betrieb. Im Vergleich zu Wasserkraftanlagen oder Gasturbinen (ohne Wärmeauskopplung) können WKK-Anlagen weniger flexibel auf eine erhöhte Stromnachfrage reagieren. Wenn stromgeführte WKK-Anlagen hingegen in

Kombination mit anderen Wärmequellen (Umweltwärme, Abwärme aus KVA, Industriebetrieb, etc.) betrieben werden, können sie zur Abdeckung der Spitzenlast für Wärme im Fernwärmenetz eingesetzt werden und gleichzeitig Strom ins Netz einspeisen. Diese Situation ergibt sich typischerweise an kalten Wintertagen und man spricht von wärmegeführtem Betrieb. Bei einem stromgeführten Betrieb geht ein Teil der Abwärme verloren, ausser der Betrieb der erneuerbaren Wärmequelle kann kurzzeitig reduziert werden.

Wasserstoff und synthetisches Methan sind kostbar. Für die CO₂-neutrale Strom- und Wärmeerzeugung in WKK-Anlagen können Wasserstoff oder erneuerbare synthetische Brennstoffen genutzt werden. Strombasierte Energieträger wie Wasserstoff sollten aber aus Energie- und Kosteneffizienzgründen vor allem in jenen Bereichen eingesetzt werden, in denen es wenig Alternativen gibt. Dazu gehören insbesondere der Schwerverkehr, der Schiffverkehr und der internationale Flugverkehr. Mit Wasserstoff betriebene WKK-Anlagen produzieren zu rund zwei Dritteln Wärme, welche vorzugsweise als Hochtemperaturprozesswärme genutzt wird.

Die Rückverstromung von Wasserstoff ist mit hohen Wirkungsverlusten verbunden. Wasserstoff und strombasierte synthetische Gase können überschüssige erneuerbare Energie aus dem Sommerhalbjahr für den Winter speichern. Wasserstoff kann dann im Winter in WKK-Anlagen, beispielsweise in Brennstoffzellen, Gasmotoren oder Gasturbinen, rückverstromt werden. Dabei entstehen aber hohe Wirkungsverluste. Zudem fehlen in der Schweiz bis auf weiteres saisonale Gasspeicher, die für strombasierte synthetische Gase verwendet werden könnten.

Erdgas wird durch erneuerbaren und synthetischen Brennstoff ersetzt. Die Energieperspektiven 2050+ zeigen im Szenario ZERO Basis (vgl. Kapitel 5.3), dass die heute mit Erdgas betriebenen WKK-Anlagen mittelfristig durch Anlagen mit erneuerbarem Gas (Biogas, synthetisches Gas) ersetzt werden. Einen wesentlichen Ausbau der WKK-Anlagen gibt es in der Variante ZERO B, insbesondere von mit Wasserstoff betriebenen WKK-Anlagen sowie Gasturbinen zur Deckung der Stromspitzenlast, die nicht zwingend Wärme auskoppeln. Strombasierte erneuerbare Energieträger werden teuer bleiben und mehrheitlich importiert werden müssen.

Die Wirtschaftlichkeit der Stromproduktion aus WKK-Anlagen ist nur bedingt gegeben. Sowohl bei mit fossilen als auch mit erneuerbaren oder synthetischen Brennstoffen betriebenen WKK-Anlagen werden die Gesteungskosten der Stromproduktion auch langfristig höher sein, als die beim Verkauf der Elektrizität durchschnittlich zu erzielenden Erlöse. Diese Situation könnte sich allenfalls bei einer Strommangellage und hohen Strompreisen ändern.

Die künftigen Einsatzgebiete der WKK-Technologien sind vielfältig.

- *Industrielle WKK-Anlagen* (Dampfprozess) können Hochtemperaturprozesswärme auskoppeln und gleichzeitig bedarfsgerecht Strom produzieren.
- In *Fernwärmenetzen* sind WKK-Anlagen in Kombination mit weiteren Wärmequellen geeignet, bei hoher Wärmenachfrage die Spitzenlast abzudecken und Strom ins Netz einzuspeisen.
- *Kehrichtverbrennungsanlagen* werden ganzjährig betrieben und erzeugen Bandlaststrom.
- *Holzheizkraftwerke*, die an ein Fernwärmenetz angeschlossen sind, laufen im Winter vorwiegend im Bandlastbetrieb und können so gleichzeitig Strom und Wärme produzieren.
- Mit einer *Biogasanlage gekoppelte Blockheizkraftwerke* (BHKW) können bedarfsorientiert Strom zu Zeiten mit hohen Strompreisen produzieren und Regelenergie bereitstellen.
- Mit erneuerbaren Gasen betriebene *Gasturbinen* ohne Wärmeauskopplung sind am besten geeignet, bei hoher Stromnachfrage Spitzenlaststrom zu produzieren. Gasturbinen sind flexibel im Einsatz, sind aber auf eine externe Versorgung mit Gas aus dem Netz angewiesen.
- *Brennstoffzellen*, die für kleine Leistungen ausgelegt sind, können mit erneuerbaren Gasen mittelfristig kaum wirtschaftlich betrieben werden. Sie werden deshalb nur dort eingesetzt, wo eine netzunabhängige Stromproduktion im Sinne einer Versorgungsautonomie wichtig ist.

7 Fördermodell für WKK-Anlagen

Das Postulat beinhaltet auch den Auftrag, eine Strategie für eine künftige Regulierung von WKK-Anlagen zu formulieren. Diese soll Anreize schaffen, damit fossile WKK-Anlagen für die Stromproduktion in den Wintermonaten nicht länger als nötig im Betrieb sind (nur als Rückversicherung). Solche stromgeführten Anlagen würden demnach nur wenige Stunden im Jahr betrieben und könnten kaum wirtschaftlich betrieben werden.

Der Bundesrat erachtet es als nicht zielführend, dass WKK-Anlagen ausschliesslich für die Deckung von Stromspitzenlasten im Winterhalbjahr im Sinne von Reservekraftwerken eingesetzt werden. Die dabei gleichzeitig erzeugte Wärme könnte nur teilweise genutzt werden, was ineffizient ist, insbesondere weil diese Anlagen aus klimapolitischen Gründen zwingend mit kostbaren erneuerbaren oder klimaneutralen Brennstoffen betrieben werden müssten. Ebenfalls aus klimapolitischen Gründen unterliegen Energieträger für den Betrieb von fossilen WKK-Anlagen der CO₂-Abgabe. WKK-Anlagen, die Teil einer Anlage im EHS oder einer Verminderungsverpflichtung sind, erhalten die CO₂-Abgabe zurückerstattet. Die hohen Kosten des erneuerbaren Brennstoffs bzw. der Internalisierung der CO₂-Abgaben belastet die Wirtschaftlichkeit solcher Anlagen. Eine Förderung von fossilen WKK-Anlagen – beispielsweise durch die Rückerstattung der CO₂-Abgabe gemäss Art. 32a und 32b CO₂-Gesetz – ist mit den Klimazielen der Schweiz nicht vereinbar. Das Netto-Null-Ziel bis 2050 erfordert die schrittweise und konsequente Dekarbonisierung des Schweizer Energiesystems.

Der Bundesrat anerkennt jedoch, dass wärmegeführte, mit erneuerbaren oder klimaneutralen Brennstoffen betriebene WKK-Anlagen eine wichtige Ergänzung zur Sicherstellung der Stromversorgung im Sinne der Winterspeicher durch Grosswasserkraft leisten können. **Die Anlagen liefern Bandstrom und entlasten damit die Stromproduktion aus der Speicherwasserkraft im Winterhalbjahr.** Eingebunden in ein Wärmesystem mit erneuerbarer Energie als Primärenergiequelle reduzieren sie zudem die Stromnachfrage, indem es weniger Wärmepumpen braucht, was den Stromverbrauch zusätzlich reduziert. Wärmegeführte WKK-Anlagen können somit Spitzenlastkessel in Wärmenetzen ergänzen oder ersetzen.

Dem Auftrag im Postulat folgend, skizziert der Bundesrat nachfolgend ein mögliches Fördermodell, allerdings ausschliesslich für wärmegeführte WKK-Anlagen, die mit erneuerbaren oder klimaneutralen Brennstoffen betrieben werden. Voraussichtlich im Jahr 2024 wird das Register für erneuerbare gasförmige und flüssige Treib- und Brennstoffe seinen Betrieb aufnehmen. Damit wird im Vollzug ein Instrument zur Verfügung stehen, mit dem sichergestellt bzw. überprüft werden kann, ob subventionierte WKK-Anlagen auch tatsächlich mit erneuerbaren Energieträgern betrieben werden.

7.1 Eckpunkte einer möglichen Förderung von WKK-Anlagen

7.1.1 Zubau gemäss Energieperspektiven 2050+

Gemäss den *Energieperspektiven 2050+* erreichen die Winterimporte im Jahr 2035 mit rund 15 TWh ihr Maximum. Dies unter der Annahme, dass 2034 das letzte Kernkraftwerk nach 50 Jahren vom Netz genommen wurde. Die 15 TWh verteilen sich auf rund 3'800 Nettoimportstunden im Winter. Bis 2050 gehen die Stromimporte im Winterhalbjahr auf knapp 9 TWh bzw. 3'200 Nettoimportstunden zurück. Bei einer angenommenen Laufzeit von 60 Jahren geht das letzte Kernkraftwerk im Jahr 2044 vom Netz. Aufgrund der höheren Produktion aus der Kernenergie würde der Importbedarf im Winterhalbjahr zwischen 2034 und 2043 bei rund 9 TWh liegen. Um diese Importmenge mit WKK-Anlagen zu decken, wäre theoretisch ein Zubau von 4.5 GW_{el} Leistung bei 2'000 Betriebstunden nötig, wobei eine Stromautarkie aus ökonomischen bzw. volkswirtschaftlichen Gründen keinen Sinn machen würde.

In den Energieperspektiven 2050+ beinhaltet die Variante ZERO B einen Ausbau der Produktionsleistung durch WKK-Anlagen auf 4.5 GW bis 2050. Zugebaut werden dabei vor allem mit Biogas betriebene WKK-Anlagen (0.7 GW Leistung und 2.5 TWh im Jahr 2050) und ab 2035 WKK-Anlagen, die mit Wasserstoff betrieben werden (1.8 TWh im Jahr 2050).

Die Tabellen 3 zeigen, wie der Zubau der gekoppelten Stromproduktion mit WKK-Technologien in den Energieperspektiven 2050+ dargestellt wird.

in TWh	Szenario ZERO Basis					
	Jahr	Winter	Jahr	Winter	Jahr	Winter
WKK Technologien	2020	2020	2035	2035	2050	2050
fossile WKK	0.47	0.38	0.62	0.32	0.00	0.00
Biomasse (Holz)	0.28	0.14	0.23	0.13	0.16	0.12
Biogas	0.17	0.09	0.47	0.24	1.15	0.65
H2 WKK	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ARA	0.13	0.06	0.13	0.06	0.11	0.06
KVA (EE-Anteil)	0.94	0.48	0.80	0.40	0.67	0.33
KVA (nicht EE-Anteil)	0.94	0.40	0.99	0.45	1.06	0.51
Geothermie	0.00	0.00	0.07	0.03	2.00	1.00
gekoppelt Erneuerbar inkl H2	1.52	0.77	1.71	0.86	4.09	2.16
gekoppelt nicht Erneuerbar	1.41	0.40	1.61	0.45	1.06	0.51
gekoppelt total	2.93	1.17	3.32	1.31	5.15	2.67

in TWh	Szenario ZERO B					
	Jahr	Winter	Jahr	Winter	Jahr	Winter
WKK Technologien	2020	2020	2035	2035	2050	2050
fossile WKK	0.19	0.14	0.69	0.45	0.00	0.00
Biomasse (Holz)	0.28	0.14	0.24	0.13	0.19	0.13
Biogas	0.17	0.09	0.58	0.28	2.49	1.17
H2 WKK	0.00	0.00	0.00	0.00	1.80	1.50
ARA	0.13	0.06	0.13	0.06	0.12	0.06
KVA (EE-Anteil)	0.94	0.48	0.80	0.40	0.67	0.33
KVA (nicht EE-Anteil)	0.94	0.40	0.99	0.40	1.06	0.50
Geothermie	0.00	0.00	0.07	0.03	2.00	1.00
gekoppelt Erneuerbar inkl H2	1.52	0.77	1.82	0.91	7.27	4.18
gekoppelt nicht Erneuerbar	1.13	0.40	1.68	0.40	1.06	0.50
gekoppelt total	2.65	1.17	3.50	1.31	8.33	4.68

Tabellen 3: Zubau der gekoppelten Stromproduktion in den Szenarien ZERO Basis (oben) und ZERO B (unten) zwischen 2020 und 2050; mit jeweiligem Anteil der Winterproduktion.

7.1.2 Weitere Grundlagen

In den Energieperspektiven 2050+ werden in der Variante ZERO B die fossil betriebenen WKK-Anlagen schrittweise auf Biogas umgestellt. Darüber hinaus erfolgt ab 2030 ein Zubau von 2.5 GW Gasturbinenleistung ohne Wärmeauskopplung. Der Beitrag von *Gasturbinen für die Winterstromerzeugung* ist jedoch gering, da diese Anlagen bei marktgeführtem Betrieb aufgrund der hohen Brennstoffkosten nur in einzelnen Stunden eingesetzt werden. Diese Anlagen stellen aber zusätzlich gesicherte Leistung bereit.

Mit dem Bundesgesetz für eine sichere Stromversorgung mit erneuerbaren Energien soll die Versorgungssicherheit speziell im Winterhalbjahr verbessert werden. Dazu beitragen sollen der konsequente und beschleunigte Ausbau der erneuerbaren Energien, der Ausbau von spezifisch im Winter sicher abrufbarer Elektrizität aus der Grosswasserkraft von 2 TWh bis 2040 (Speicherwasserkraft) sowie eine neue Energiereserve (Hydroreserve) als Versicherung für unvorhersehbare Situationen. Weiter hat der Bundesrat das UVEK im Februar 2022 beauftragt, die für den Bau und Betrieb von Reservekraftwerken notwendigen Bestimmungen zu erarbeiten.

Für zusätzliche Winterspeicher-Kapazitäten sind technologieoffene Ausschreibungen vorgesehen, sollte sich spätestens im Jahr 2030 abzeichnen, dass das Ausbauziel von 2 TWh bis 2040 allein mit der Grosswasserkraft nicht erreicht werden kann. Damit will der Bundesrat die bisherige Selbstversorgungsfähigkeit der Schweiz von aktuell im Mittel rund 22 Tagen längerfristig beibehalten. Die Finanzierung des Ausbaus erfolgt über einen im Stromversorgungsgesetz (Artikel 9) zur Vorbeugung gegen mögliche Versorgungssicherheitsdefizite bereits heute vorgesehenen, von den Stromkonsumenten zu entrichtenden «Winterzuschlag» von 0.2 Rp/kWh. Der Ausbau setzt prioritär bei der grossen Speicherwasserkraft an. Hier könnten unter Umständen auch mit erneuerbaren Brennstoffen betriebene WKK-Anlagen zum Zug kommen. Dies unter der Bedingung, dass der eingesetzte Brennstoff auch gespeichert werden und die Energie jederzeit abgerufen werden kann. Eine vorgezogene Förderung von WKK-Anlagen müsste jedoch zusätzlich zur Grosswasserkraft erfolgen und sollte diese nicht konkurrenzieren.

In den Energieperspektiven 2050+ ist vorgesehen, die fehlenden 9 TWh in den Wintermonaten auch mit Stromimporten zu decken. Die Stromautarkie Schweiz ist nicht Ziel der langfristigen Energiestrategie des Bundesrats. Dies würde zu einem überdimensionierten und teuren Ausbau des Kraftwerksparks in den nächsten 30 Jahren führen, was aus volkswirtschaftlicher Perspektive ineffizient wäre.

7.1.3 Investitionsbeiträge für erneuerbare und klimaneutrale WKK-Anlagen

Falls sich das Parlament dennoch ein Fördermodell wünscht, könnte dieses folgende Eckpunkte aufweisen:

- Der Bundesrat legt ab dem Jahr 2025 während **zehn Jahren ein jährliches Zubauziel von maximal 50 MW** elektrischer Leistung für wärmegeführte WKK-Anlagen fest.
- Dazu finden **jährliche Ausschreibungen** statt, die vom BFE durchgeführt werden. Der zu erwartende Wärmebedarf wird berücksichtigt, um sicherzustellen, dass die gekoppelte Wärme durch den Zubau an WKK-Technologien abgenommen werden kann. Damit könnte die installierte elektrische Leistung bis 2035 um maximal 0.5 GW_{el} ausgebaut werden. Dies entspricht bei 1'000 bis 2'000 Volllaststunden einer Stromerzeugung von 0.5 bis 1 TWh und würde einen Beitrag an die bis 2040 angestrebten 2 TWh Winterspeicher durch Grosswasserkraft leisten. Dieselbe Energiemenge müsste zudem als Wärme abgesetzt werden können, wozu es zusätzliche Wärmesenken braucht.
- Voraussetzung zur Teilnahme an den Ausschreibungen ist, dass die Anlagen Teil eines neu geplanten Wärmeverbunds sind, der innerhalb der **räumlichen Energieplanung für erneuerbare Energien** der zuständigen Gemeinwesen (Kanton, Gemeinden) ausgewiesen wird.
- Vorausgesetzt wird zudem, dass die WKK-Anlagen mit **Biogas, grünem Wasserstoff oder sonstigen klimaneutralen Brennstoffen** hauptsächlich im Winterhalbjahr betrieben werden und die erneuerbare Wärme genutzt wird.
- Werden **neue WKK-Anlagen** in einen bereits bestehenden Wärmeverbund integriert, der entsprechend erweitert werden soll oder werden mit den Anlagen fossile Spitzenlastkessel ersetzt, sind diese Anlagenbetreiber ebenfalls berechtigt, an den Ausschreibungen teilzunehmen.
- Die Projekte müssen auktionsspezifische Kriterien einhalten. Projekte, die einen Zuschlag erhalten, erhalten einen **Investitionsbeitrag** in der Höhe von maximal 60 Prozent der anrechenbaren Investitionskosten.
- Mit der Förderung wird der **ökologische Mehrwert** für die erneuerbare Energie (Wärme und Strom) nicht abgegolten, so dass weitere Fördergelder insbesondere für die Umsetzung bzw. Erweiterung neuer oder bestehender Wärmeverbünde beansprucht werden können (Produktionsanlage erneuerbarer Brennstoffe, Verteilnetze).
- Nach ersten Abschätzungen des BFE ist mit Investitionsbeiträgen in der Höhe von jährlich rund **50 bis 100 Millionen Franken** zu rechnen, um den Zubau von maximal 50 MW elektrischer Leistung pro Jahr zu finanzieren. Über zehn Jahre verteilt würde dies einer maximalen Gesamtsumme von rund 500 bis 1'000 Millionen Franken entsprechen. Dabei gilt festzuhalten, dass die Investitionsbeiträge nur einen Teil der Kapitalkosten, aber nicht die Brennstoffkosten abdecken, welche bei WKK-Anlagen im Gegensatz zu erneuerbaren Stromproduktionanlagen wie Wasserkraft, Solar- oder Windenergie sehr hoch sind.
- Ausgeschlossen von der Förderung sind Kehrlichtverbrennungsanlagen (KVA) und Abwasserreinigungsanlagen (ARA). Diese sind bereits heute wirtschaftlich und benötigen deshalb keine finanzielle Unterstützung.
- Die **Finanzierung** dieses Fördermodells müsste vertieft abgeklärt bzw. die verschiedenen Optionen geprüft werden.

8 Replik auf weitere Fragestellungen im Postulat

Einschränkung des Betriebs fossiler WKK-Anlagen, so dass diese nur dann in Betrieb sind, wenn dies für die Stromversorgung unbedingt notwendig ist.

WKK-Anlagen können effizient betrieben werden, wenn der Strom und die Wärme gleichzeitig genutzt werden. Es wird also nur dann Strom produziert, wenn der Wärmeabsatz gesichert ist. Durch einen Wärmespeicher kann allenfalls sichergestellt werden, dass die Wärme zu einem im Tagesgang zeitlich verschobenen Zeitpunkt genutzt werden kann (vgl. Anhang 1). Im Vergleich zur Speicherwasserkraft oder Gasturbinen (ohne Wärmeauskopplung) können jedoch WKK-Anlagen weniger flexibel auf eine erhöhte Stromnachfrage reagieren. Etwas anders ist die Situation, wenn sie in Kombination mit anderen Wärmequellen, beispielweise mit Abwärme aus einer KVA, betrieben werden. In diesem Fall können sie zur Abdeckung der Spitzenlast für Wärme im Fernwärmenetz eingesetzt werden und gleichzeitig Strom ins Netz einspeisen. Diese Situation ergibt sich typischerweise an kalten Wintertagen, wenn gleichzeitig die Wärme- und Stromnachfrage hoch sind, und die Schweiz tendenziell auf Stromimporte angewiesen ist.

Im Gegensatz zu erneuerbaren Stromproduktionsanlagen wie Windkraft und Photovoltaik, welche keine Brennstoffkosten haben, werden brennstoffbasierte Kraftwerke wie WKK-Anlagen erst dann zugeschaltet, wenn die Stromnachfrage hoch ist und somit der Betrieb für die Stromversorgung notwendig ist. Der Preis gibt das Signal dafür, wann Strom produziert wird. Damit WKK-Anlagen wirtschaftlich betrieben werden können, muss sowohl der Strom wie auch die Wärme verkauft werden können. Weil WKK-Anlagen auf einen Brennstoff angewiesen sind, werden sie nur dann eingesetzt, wenn der Strompreis und der Erlös aus dem Wärmeverkauf den wirtschaftlichen Betrieb zulassen. Zusätzliche Einschränkungen des Betriebs sind deshalb nicht notwendig.

Vermeiden, dass fossile WKK-Anlagen in Betrieb sind, wenn genügend Solarenergie oder eine andere Form erneuerbarer Energien vorhanden ist.

Regelbare Stromerzeugungsanlagen werden nur dann zugeschaltet, wenn der Markt dies erfordert. WKK-Anlagen sind unter diesem Aspekt ein Spezialfall, da sie neben Strom bedarfsgerecht Wärme auskoppeln: Wenn ein Gebäude Raumwärme oder eine Industrieanlage Prozesswärme benötigt, muss die wärmegeführte WKK-Anlage in Betrieb sein. Dies bedeutet, dass sie allenfalls auch dann laufen muss, wenn gleichzeitig PV-Strom produziert wird. In der Regel ist es aber so, dass grosse Gebäude bzw. Nahwärmeverbände und Industrieanlagen zwei parallele Heizsysteme haben, eines für die Wärmegrundlast und eines für die Wärmespitzenlast. Ist eines der beiden Heizsysteme eine WKK-Anlage, wird diese ausschliesslich bei entsprechender Stromnachfrage zugeschaltet, also in der Regel dann, wenn zu wenig erneuerbarer Strom produziert wird.

Kleine WKK-Anlagen sind in erster Linie dank der Eigenverbrauchsregelung wirtschaftlich, weil dadurch die Netzkosten des bezogenen Stroms eingespart werden können. Kleine Anlagen werden auf den Eigenverbrauch optimiert und darum nicht zwingend systemdienlich bei hohen Strompreisen betrieben. Dies kann dazu führen, dass kleine fossile WKK-Anlagen auch bei genügend erneuerbarem Strom im Netz betrieben werden. Aus klimapolitischer Sicht sollten diese Anlagen deshalb nur noch mit erneuerbarem Brennstoff betrieben werden.

Die Preissignale des Marktes sollten ausreichend verhindern, dass grosse fossile WKK-Anlagen in Betrieb sind, wenn gleichzeitig PV-Strom eingespeist wird. Kleine fossile WKK-Anlagen im Eigenverbrauch sind den Preissignalen des Marktes weniger direkt ausgesetzt.

Sicherstellung, dass die Wärme meistens verwertet wird.

Die Wirtschaftlichkeit von WKK-Anlagen hängt stark vom Erlös der ausgekoppelten Wärme ab, welche einen Wert von rund 8 bis 10 Rp/kWh hat und mengenmässig rund 65 Prozent des Energieabsatzes ausmacht²⁸.

²⁸ Beispiel einer WKK-Anlage mit einem Wirkungsgrad für Strom von 25 Prozent und 65 Prozent für Wärme: Der Energieinput einer WKK-Anlage beträgt 10 kWh; daraus werden rund 6.5 kWh Wärme und 2.5 kWh Strom produziert. Bei einem Erlös von

Aus betriebswirtschaftlicher Sicht ergibt es keinen Sinn, eine WKK-Anlage ohne Verwertung der Wärme zu betreiben. Es sei denn, der Erlös aus dem Stromverkauf könnte den Erlös aus der Wärme kompensieren, was nur bei sehr hohen Strompreisen möglich ist, wie sie in der Regel nur wenige Stunden im Jahr vorkommen.

10 Rp/kWh für Strom und Wärme macht der Erlös aus dem Wärmeverkauf mehr als doppelt so viel aus wie jener aus dem Stromverkauf.

Literaturverzeichnis

BFE (2011). *Thermische Stromproduktion inklusive Wärmekraftkopplung (WKK) in der Schweiz, Ausgabe 2010*. Bern: Bundesamt für Energie.

BFE (2020). *Thermische Stromproduktion inklusive Wärmekraftkopplung (WKK) in der Schweiz, Ausgabe 2019*. Bern: Bundesamt für Energie.

Bundesrat (28. August 2019). *Das Portal der Schweizer Regierung*. Abgerufen am 21. Juli 2020 von Bundesrat will bis 2050 eine klimaneutrale Schweiz:
<https://www.admin.ch/gov/de/start/dokumentation/medienmitteilungen.msg-id-76206.html>

Bundesrat. *Bericht des Bundesrates in Erfüllung des Postulates 16.3890 Grossen vom 30. September 2016*.

Eicher und Pauli (2014), *Weissbuch Fernwärme Schweiz: Langfristperspektiven für erneuerbare und energieeffiziente Nah- und Fernwärme in der Schweiz*.

Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL (2017), *Biomassepotenziale der Schweiz für die energetische Nutzung. Ergebnisse des Schweizerischen Energiekompetenzzentrums SCCER BIOSWEET*.

Paul Scherrer Institut (2017). *Potenziale, Kosten und Umweltauswirkungen von Stromproduktionsanlagen*. Bern: Bundesamt für Energie.

Paul Scherrer Institut (2019). *Potenziale, Kosten und Umweltauswirkungen von Stromproduktionsanlagen. Aufdatierung*. Bern: Bundesamt für Energie.

Prognos/TEP Energy/Infras/Ecoplan (2020). *Energieperspektiven 2050+ Kurzbericht*. Bern: Bundesamt für Energie.

Prognos (2021). *Energieperspektiven 2050+: Exkurs Thermische Stromerzeugung und Wärme-Kraft-Kopplung*. Bern: Bundesamt für Energie.

Prognos (2021). *Energieperspektiven 2050+: Exkurs Winterstrom. Stromversorgung der Schweiz im Winterhalbjahr*. Bern: Bundesamt für Energie.

Anhang 1: Beschrieb der verschiedenen WKK-Technologien gemäss Prognos

Betriebsarten von WKK-Anlagen

Im Hinblick auf die Ressourcenschonung kommt der gekoppelten Erzeugung von elektrischer und thermischer Energie aufgrund des hohen Gesamtwirkungsgrades von WKK-Systemen eine besondere Bedeutung zu. Grundsätzlich wird bei WKK-Anlagen zwischen wärmegeführten und stromgeführten Betriebsweisen unterschieden.

Bei wärmegeführten Anlagen bestimmt die Wärmenachfrage (Raumwärme und Brauchwassererwärmung bis 90°C bzw. Prozesswärme bis 500°C) die Laststufe und den Ein- und Ausschaltzeitpunkt der WKK-Anlage.

Durch eine stromgeführte Betriebsweise besteht der Nutzen in der Bedienung von Stromlastspitzen mit hohen Strompreisen. Die dabei erzeugte Wärme sollte in einem Wärmespeicher für eine spätere Verwendung zwischengespeichert werden können. Durch die stromgeführte Betriebsweise wird meistens keine hohe Auslastung der WKK-Anlage erreicht und der wirtschaftliche Vorteil ergibt sich durch eine Optimierung des Stromlastprofils.

Der elektrische Wirkungsgrad von WKK-Anlagen ist abhängig von der Technologie: Gasmotoren haben einen Wirkungsgrad von 10 bis 30 Prozent, Gasturbinen einen solchen von 20 bis 40 Prozent, Gaskombikraftwerke mit Gas- und Dampfturbine einen solchen von 50 bis 60 Prozent und Brennstoffzellen einen solchen von 40 bis 60 Prozent (Prognos WKK-Exkurs). Holzheizkraftwerke und KVA werden mit Dampfturbinen betrieben, welche heute einen Wirkungsgrad von rund 15 Prozent aufweisen; dieser dürfte sich in Zukunft noch leicht erhöhen (PSI 2017).

Brennstoffzellen

Brennstoffzellen sind galvanische Zellen, die chemische Reaktionsenergie in elektrische Energie wandeln. Sie sind in Leistungsklassen von 1 bis 250 kW verfügbar. Sie haben verschiedene Vorteile: hoher elektrischer Wirkungsgrad, schadstofffreie Energiewandlung und geräuscharmer Betrieb.

Aufgrund dieser vielversprechenden Eigenschaften werden Brennstoffzellen z.B. als WKK-Heizgeräte weiterentwickelt. Verschiedene Heizgeräte-Hersteller bieten Brennstoffzellen-Heizgeräte bereits am Markt an. Neben fehlenden Langzeit-Erfahrungswerten liegt der entscheidende Nachteil dieser Technologie in den deutlich höheren Kosten gegenüber herkömmlichen WKK-Anlagen. Aus diesem Grund kamen sie bisher nur in Bereichen zum Einsatz, in denen Kosten eine nachrangige Rolle spielen, z.B. in Unterseebooten oder in der Raumfahrt.

Es werden verschiedene Brennstoffzellentypen (BZ) erforscht, sowohl bezüglich der Brennstoffe (Wasserstoff, Alkohole, Erdgas) und Oxidationsmittel (Sauerstoff, Wasserstoffperoxid, Salpetersäure), als auch bezüglich des technischen Aufbaus und ihres Einsatzes (stationär oder mobil).

Motor-Blockheizkraftwerke (BHKW)

Motor-Blockheizkraftwerke (BHKW) werden meist mit einem klassischen Motor mit innerer Verbrennung nach dem Otto- oder Dieselp Prozess angetrieben. Weltweit werden Motor-BHKW mit Nennleistungen von 1 kW_{el} bis zu zweistelligen MW_{el} eingesetzt. Für die Motoren von BHKW kleiner bis mittlerer Leistung werden üblicherweise PKW- oder LKW-Motoren modifiziert, für grosse BHKW mit einer Leistung ab 1 MW_{el} und grösser werden häufig Schiffsdieselmotoren angepasst. Der elektrische Wirkungsgrad von BHKW nimmt mit steigender Leistung zu und beträgt 26 bis 43 Prozent (im Bereich der elektrischen Leistung zwischen 5 kW und 2 MW).

Erdgas ist heute der vorrangig eingesetzte Brennstoff in Motor-BHKW. Aus der Verwendung industrieller oder biogener Mischgase (Synthesegase, Biogas etc.) bestehen jedoch auch jahrzehntelange Erfahrungen mit Brennstoffgemischen unterschiedlicher und in gewissen Bandbreiten auch

schwankenden Zusammensetzungen. Grundsätzlich ist es durch Anpassungen möglich, die Motoren auf unterschiedliche Brenngase einzustellen bzw. umzurüsten oder zu konstruieren.

Bei Gasen wie Biogas oder Holzgas aus Holzvergasung sind die Anpassungen an Motoren vergleichsweise überschaubar. Bei Wasserstoff als Brennstoff ist der Anpassungsaufwand deutlich höher, da Wasserstoff völlig andere Verbrennungseigenschaften aufweist als Erdgas.

Stirlingmotoren

Stirlingmotoren sind Kraftmaschinen mit externer Wärmezufuhr, basierend auf einem geschlossenen thermodynamischen Kreisprozess eines Arbeitsmediums. Die Wärmezufuhr kann durch nahezu jede Wärmequelle erfolgen, u.a. durch Verbrennung beliebiger Brennstoffe. Da keine interne Verbrennung erfolgt, sind Stirlingmotoren sehr wartungsarm und langlebig. Sie sind in Leistungsklassen von 1 bis 200 kW verfügbar und erreichen elektrische Wirkungsgrade zwischen 7 bis 28 Prozent.

Dampfturbinen

Dampfturbinen kommen als Energiewandler von thermischer (Dampf-) Energie in mechanische Energie zum Antrieb eines Generators in grossen Kraftwerken zum Einsatz, in denen meist ein Festbrennstoff (z.B. Kohle, feste Biomasse wie Holz, Kehrlicht) verbrannt wird.

Aus dem Dampfprozess lässt sich flexibel Prozesswärme und Nutzwärme für Heizzwecke auskoppeln. Im Falle einer WKK-Nutzung erfolgt die Entspannung des Dampfes dann nur bis zu einem Temperatur-/Druckniveau, auf dem die Wärme zur Wärmebereitstellung erfolgen soll, z.B. 2 bar für 120°C Heizwärme oder 20 bar für >200 °C Prozesswärme. Dadurch sinkt die elektrische Energieausbeute, jedoch kann durch die Nutzung der Abwärme die Brennstoffenergie insgesamt höher ausgenutzt werden. Typische Leistungsklassen von Dampfturbinen im WKK-Einsatz sind 75 kW bis zu mehreren hundert MW und erreichbare elektrische Wirkungsgrade liegen zwischen 15 und 25 Prozent.

Gasturbinen

Der Gasturbinenprozess besteht aus den Teilschritten Verdichtung, Wärmezufuhr, Expansion und Wärmeabfuhr: Frischluft wird im Verdichter angesaugt und verdichtet und nimmt anschliessend unter Zugabe eines Brennstoffes in der Brennkammer an der Verbrennung teil. Die heissen Verbrennungsgase mit Temperaturen von bis zu 1500 °C strömen mit hoher Geschwindigkeit in den Expander der Turbine, in dem sie ihre Strömungsenergie über die Schaufelblätter und den Rotor in mechanische Energie umwandeln. Das hohe Temperaturniveau der Gasturbinenabgase (450 bis 600 °C) kann als Prozesswärme in industriellen Prozessen oder zur Nutzung in einem nachgeschalteten Dampfprozess genutzt werden. Gasturbinen sind als Mikro-Gasturbinen in einer Leistungsgrösse ab 30 kW erhältlich und erreichen als Kraftwerksgasturbinen bis zu knapp 600 MW Leistung. Die elektrischen Wirkungsgrade liegen zwischen 25 und rund 43 Prozent.

Der überwiegende Brennstoff für Gasturbinen ist heute Erdgas, wobei auch Diesel ein gut geeigneter Brennstoff ist (ähnlich wie in Flugzeugtriebwerken). Der Einsatz von Wasserstoff in Gasturbinen wird mit zunehmender Perspektive von Wasserstoff als THG-neutralem Energieträger diskutiert.

Gas- und Dampfturbinen-Kraftwerke (Gaskombikraftwerke)

In Gas- und Dampf-Kraftwerken werden die heissen Abgase von Gasturbinen in einem nachgeschalteten Dampfkraftprozess genutzt und dadurch der elektrische Wirkungsgrad auf rund 60 Prozent gesteigert. Die Energie der heissen Gasturbinenabgase wird zur Dampferzeugung in einem Abhitzeessel genutzt, dessen Dampf wiederum über eine Dampfturbine zur Strom- und Wärmeproduktion dient. Alternativ kann der heisse Wasserdampf auch als Prozesswärme ausgekoppelt werden (WKK-Betrieb); dabei sinkt jedoch der elektrische Wirkungsgrad.

Geothermiekraftwerke mit Wärmeauskopplung

Geothermie basiert auf der technischen Nutzung der Wärme des Erdinneren, die in geothermische Ressourcen wie Heisswasser-Aquifere, Störungzonen (in der Tektonik) und heisse trockene kristalline Gesteine unterschieden wird. Durch Tiefenbohrungen werden diese Ressourcen erschlossen und für Heizzwecke und/oder Stromerzeugung nutzbar gemacht. Das erreichbare Temperaturniveau ist aufgrund der technisch limitierten maximalen Bohrtiefe (rund 10 km) limitiert. Der durchschnittliche geothermische Temperaturgradient beträgt $1^{\circ}\text{C}/33\text{ m}$, in einer Tiefe von 3300 m liegt im Mittel also eine Temperaturzunahme um 100°C vor. Typische Temperaturniveaus der Geothermie liegen im Bereich von < 100 bis 300°C . Die geothermische Stromerzeugung erfordert aufgrund der niedrigen Temperaturen neue Kraftwerkskonzepte. Dazu zählen Direktdampfnutzung, ORC-Kraftwerke etc. Die elektrischen Wirkungsgrade der geothermischen Stromerzeugung sind aufgrund der niedrigen Prozesstemperaturen gering ($< 12\%$), sodass der Wärmenutzung eine hohe Bedeutung zukommt. Geothermiekraftwerke produzieren also wie KVA ganzjährig Wärme; der elektrische Wirkungsgrad liegt jedoch wesentlich tiefer als jener von KVA. Das Potenzial der Geothermie ist weniger begrenzt als jenes von Abfallbiomasse. Die Technologie ist aber noch nicht ausgereift und somit mit Risiken verbunden.