

Wärme-Kraft-Kopplung (WKK)

Basiswissen-Dokument, Stand März 2020

1. Zusammenfassung

Etwa die Hälfte des Endenergieverbrauchs wird heute zur Erzeugung von Wärme eingesetzt, ein Grossteil davon durch die direkte Verbrennung von Heizöl und Erdgas in Heizkesseln¹. In Anbetracht des Umwelt- und insbesondere des Klimaschutzes, der Kostenunsicherheit und der Auslandabhängigkeit ist die Verbrennung von fossilen Energieträgern nicht sinnvoll. Trotz Effizienzmassnahmen wie verbesserter Wärmedämmung bei Gebäuden und sinkender Heizgradtage aufgrund des Klimawandels wird ein erheblicher Wärmebedarf bestehen bleiben (bis 2050 bis zu 50–70 % des heutigen Wertes). Sofern hohe Temperaturen erforderlich sind, können Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen eine Option sein. In Kombination mit erneuerbaren Brennstoffen oder CO₂-Abscheidung können diese klimaneutral betrieben werden.

Die Stromproduktion von WKK-Anlagen kann unter bestimmten Rahmenbedingungen laut einem Szenario des Bundesamtes für Energie (BFE) bis zu 11,5 TWh erreichen. WKK ist heute meistens nicht wirtschaftlich; sie ist aber energetisch effizienter als eine voneinander getrennte und auf fossilen Brennstoffen basierte Wärme- und Stromproduktion. Zur Entschärfung der Problematik des zunehmenden Winterdefizits in der Stromversorgung sind WKK-Anlagen geradezu ideal. Wenn dezentrale WKK-Anlagen langfristig eine Rolle in der Energieversorgung spielen sollen, müssen die richtigen Rahmenbedingungen geschaffen werden.

2. Heutige Situation in der Schweiz

2.1 Vorausgehende Bemerkung

Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen (WKK-Anlagen) sind Systeme, die gleichzeitig Strom und Wärme produzieren. Der Strom wird mit einem Motor oder einer Brennstoffzelle erzeugt. Die dabei entstehende Abwärme wird gleichzeitig für Heizzwecke (Komfortwärme) oder Produktionsprozesse (Prozesswärme) genutzt. Im Vergleich zu einer voneinander komplett getrennten Bereitstellung von Wärme und Strom aus Brennstoffen erreichen WKK-Anlagen höhere Gesamtwirkungsgrade. Voraussetzung hierfür ist ein möglichst hoher Nutzungsgrad der entstehenden Wärme und des Stroms. Während der Strom lokal genutzt und Überschuss ins Versorgungsnetz eingespeist wird, muss die Wärme lokale Verwendung finden. Anders als bei rein auf die Stromproduktion ausgelegten thermischen Kraftwerken ist deshalb in der Regel der Wärmebedarf massgebend für die Fahrweise einer WKK-Anlage.

Bei der Beurteilung künftiger Strategien der Stromproduktion aus Gas ist deshalb immer auch die Bereitstellung der Wärme miteinzubeziehen. Als Alternative zu einer WKK-Strategie ist insbesondere eine Kombination von Gas- und Dampf-Kombikraftwerk (GuD) mit Wärmepumpen (WP) zu betrachten. Mit GuD-Anlagen wird Strom mit möglichst hohem Wirkungsgrad produziert. Der produzierte Strom kann anderswo mit Wärmepumpen zur Bereitstellung von Komfortwärme genutzt werden. Die anfallende Abwärme bei GuD kann zudem in Fernwärmenetze gespiesen werden. Dadurch erhöht sich der Gesamtwirkungsgrad weiter.

¹ Quelle: Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000–2017 nach Verwendungszwecken, Abbildung 7, BFE 2018

Im vorliegenden Dokument werden fossil betriebene WKK-Anlagen und Brennstoffzellen behandelt. Mit Biomasse betriebene WKK-Anlagen werden im Basiswissen-Dokument «Strom aus Biomasse» vorgestellt.

2.2 Die Wärme-Kraft-Kopplung in der Schweiz

Als WKK-Anlagen werden in der Schweiz thermische Stromerzeuger bezeichnet, die fossile oder biogene Energieträger in einem gekoppelten Prozess zu Strom und Wärme wandeln. Dabei gelten folgende Bedingungen: Mindestens 5 % der eingesetzten Energie müssen in Elektrizität umgewandelt werden und der Gesamtnutzungsgrad (Wärme und Elektrizität) muss mindestens 60 % betragen². Um vergleichbare Technologien und Einsatzbereiche zusammenfassen zu können, wird zwischen Klein- und Gross-WKK-Anlagen unterschieden.

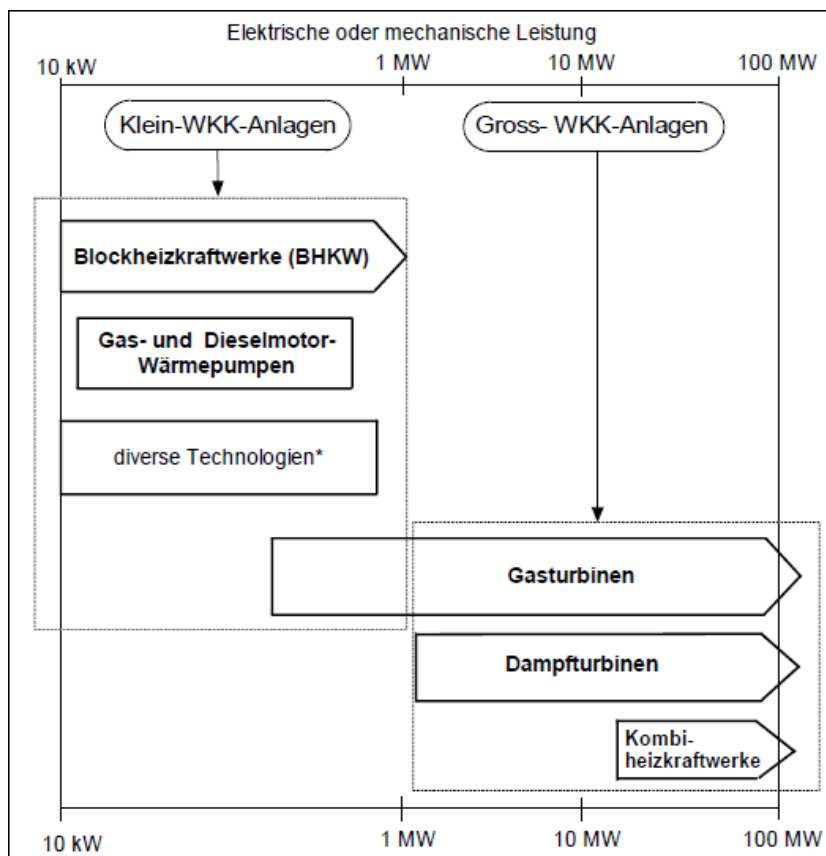


Abbildung 1: Aufteilung der Wärme-Kraft-Kopplungstechnologien und Leistungsbereiche in Klein- und Gross-WKK-Anlagen. Quelle: BFE 2011.
* zu diversen Technologien gehören beispielsweise Brennstoffzellen, ORC oder Stirling.

In der Schweiz sind zirka 900 WKK-Anlagen mit einer elektrischen Leistung von knapp 500 MW in Betrieb³. Aus wirtschaftlichen Gründen war die installierte Leistung in den letzten Jahren rückläufig. Einige Anlagen wurden ersatzlos stillgelegt. Die Anlagen produzieren zirka 1700 GWh Strom, was etwa 2,5 % der gesamten Elektrizitätserzeugung entspricht. Etwa die Hälfte der WKK-Stromproduktion stammt aus erneuerbaren Quellen wie Biogas, Klärgas und Deponiegas.

² Quelle: BFE 2017

³ Quelle: Gesamtenergiestatistik 2018, Tabelle 26, BFE

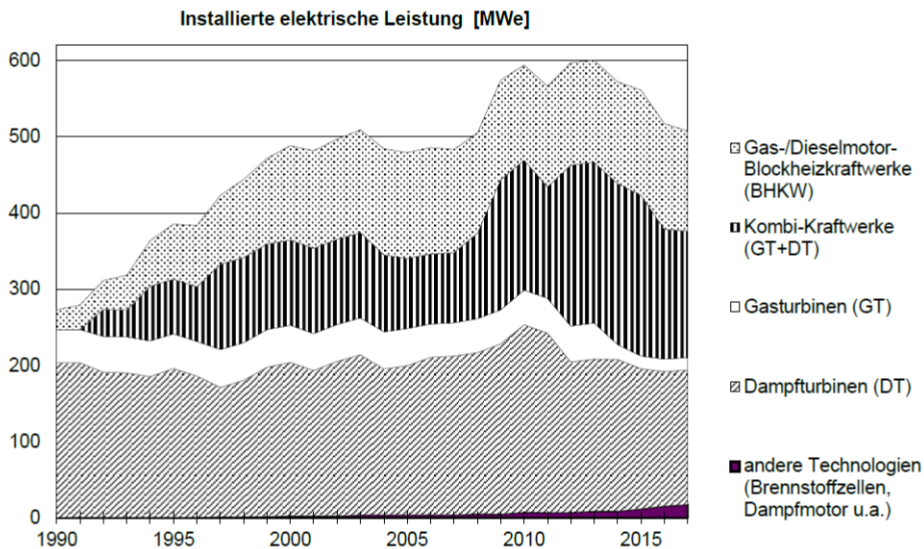


Abbildung 2: Entwicklung der elektrischen Leistung der WKK-Anlagen, unterschieden nach Technologien 2017, BFE

WKK-Anlagen sind verschiedenen gesetzlichen Grundlagen unterstellt: Bundesverfassung, Energiegesetz, Energieverordnung sowie der Verordnung über die CO₂-Abgabe. Komplexe Rahmenbedingungen sind in der Schweiz auch durch die strenge und unterschiedliche nationale, kantonale und kommunale Gesetzgebung vorhanden. Hingegen besteht generell kein Akzeptanzproblem für WKK-Anlagen in der Bevölkerung.

2.3 Hemmnisanalyse des BFE

WKK-Anwendungen konnten sich bisher in der Schweiz nicht durchsetzen. Die Gründe hierfür wurden in einer Studie des BFE untersucht.⁴ Dabei stand die Frage im Zentrum, welche Hemmnisse dem Einsatz der verschiedenen WKK-Technologien in einzelnen Anwendungsbereichen in der Schweiz entgegenstünden.

Das BFE hat Hemmnisse auf verschiedenen Ebenen eruiert:

- Juristisch: mehrere Gesetze, insbesondere CO₂-Gesetze, und Vorschriften auf den Ebenen Bund, Kanton und Gemeinde
- Technisch: Anlagen bei Einzelwohngebäuden mit vergleichsweise neuen Technologien; Image der Technik
- Ökonomisch: Energiepreise von Heizöl, Erdgas und Elektrizität; Rückliefertarife Elektrizität; Betreiberkompetenz bei Kleinanlagen; Kosten Wärmeverteilung bei Grossanlagen
- Politisch: Akzeptanz bei energiepolitischen Akteuren (Grossanlagen); Energiepolitisches Programm Bund; Bekanntheit und Akzeptanz bei Anwohnern bei Grossanlagen

Als Gesamtergebnis führte die Analyse zur Erkenntnis, dass die Hemmnisse so zahlreich und vielfältig sind, dass sich keine Anwendung erkennen lässt, die sich in den nächsten Jahren am Markt selbständig durchsetzen könnte.

⁴ Beseitigung von Hemmnissen bei der Verbreitung von Wärmekraftkopplung (WKK) in der Schweiz: BFE 2009

Eine Weiterentwicklung der Technologie wird dennoch stattfinden. In Kombination mit PV-Strom im Sommer können WKK-Anlagen in der Winterversorgung eine entscheidende Rolle spielen. Überschüssiger PV-Strom kann mittels Power-2-Gas-Technologie zu erneuerbarem Gas synthetisiert werden. Dieses wiederum kann im Winter mittels WKK-Anlagen in Wärme und Strom gewandelt werden. In der Substitution des fossilen Gases braucht es dazu nicht einmal saisonale Speicher. Die Umwandlung von Strom in synthetisches Gas ist mit hohen Umwandlungsverlusten (Abwärme) verbunden. Bei der Elektrolyse werden etwa 80 % der Energie in Wasserstoff gewandelt. Bei einer nachgelagerten Methanisierung ist der Wirkungsgrad wiederum bei etwa 80 %. Beide Wirkungsgrade sind nur dann so hoch, wenn die Abwärme genutzt wird. Ohne Abwärmenutzung liegen die Wirkungsgrade im Bereich von 30–50 % über beide Schritte. Die Erhöhung der Effizienz wird aktuell in zahlreichen Forschungsprojekten untersucht. Die anfallende Abwärme läuft dem saisonalen Bedarf an Wärme im Sommer entgegen. Die Wirtschaftlichkeit von Power-2-Gas ist neben dem Wirkungsgrad vor allem von den Investitionskosten abhängig. Aktuell sind diese noch zu hoch, was dazu führt, dass die Amortisation nur mit vielen Volllaststunden übers Jahr möglich ist. Dies wiederum läuft der Nutzung von Überschüssen von PV-Strom entgegen, da diese im Wesentlichen im Sommer und um die Mittagszeit auftreten.

WKK-Anlagen haben eine hohe Gesamtenergieeffizienz. Der Einsatz von WKK-Anlagen ist besonders dann sinnvoll, wenn hohe Vorlauftemperaturen benötigt werden, beispielsweise für Wärme in industriellen Prozessen oder für Komfortwärme in Altbauten. Solange keine günstigen Brennstoffzellen auf dem Markt sind, werden aber voraussichtlich vor allem Gross-WKK-Anlagen den WKK-Markt dominieren.

3. Stand und weitere Entwicklung der Technik

Die meisten WKK-Anlagen sind Blockheizkraftwerke (BHKW). Sie bestehen aus einem Verbrennungsmotor und einem Generator. Der Motor erzeugt mechanische Energie und treibt damit den Generator zur Stromproduktion an. Die Abwärme, die sich nutzen lässt, stammt aus der Motorenkühlung und den Abgasen. WKK-Anlagen können in der Industrie eingesetzt werden und versorgen dort die Betriebe mit Strom und Prozesswärme. Eine andere Anwendung ist der Wohnbereich. Dort liefern die Anlagen Wärme (Fern- und Nahwärme) für ganze Wohngebiete.

Zurzeit sind die grössten WKK-Anlagen in der Schweiz bei Kehrlichtverbrennungsanlagen und Industrieanlagen, bei denen Dampf durch die Verbrennung eines Abfall-Brennstoffs erzeugt wird und eine Dampfturbine antreibt (sogenannte Gaskombikraftwerke mit Wärmeauskopplung, siehe auch das Basiswissen-Dokument «Gas- und Dampf-Kombianlagen»). Als Antrieb für den Stromerzeuger können Verbrennungsmotoren, das heisst Diesel- oder Gasmotoren, aber auch Gasturbinen oder Stirlingmotoren eingesetzt werden. Stirlingmotoren und Brennstoffzellen gehören möglicherweise zu den künftigen Technologien.

Der **Stirlingmotor** ist eine Wärme-Kraft-Maschine mit zwei Zylindern, in der ein abgeschlossenes Arbeitsgas von aussen an zwei verschiedenen Bereichen abwechselnd erhitzt und gekühlt wird. Dadurch bewegen sich die Kolben und es wird mechanische Arbeit geleistet. Er arbeitet nach dem Prinzip eines geschlossenen Kreisprozesses und ist ein Beispiel für die Energieumwandlung von einer schlecht nutzbaren Energieform (thermische Energie) in die besser einsetzbare Energieform mechanischer Energie.

Auch **Brennstoffzellen** ermöglichen die Wärme-Kraft-Kopplung. Eine Brennstoffzelle ist eine galvanische Zelle, welche die chemische Reaktionsenergie eines Brennstoffes und eines Oxidationsmittels in elektrische Energie wandelt. Als Brennstoff wird im allgemeinen Wasserstoff genutzt und als Oxidationsmittel wird Sau-

erstoff eingesetzt. Der Aufschwung von Brennstoffzellen mit kleiner Leistung für Ein- und Zweifamilienhäuser ist seit langer Zeit angekündigt, eine Massenproduktion ist jedoch noch nicht in Sicht.

4. Potenzial

Das Szenario «Neue Energiepolitik» des BFE vom Mai 2011⁵ geht unter Annahme bestimmter einschränkender Rahmenbedingungen davon aus, dass der Raum- und Prozesswärmebedarf in den nächsten Jahrzehnten in Folge von Effizienzsteigerungen und besserer Wärmedämmung zurückgehen wird, und zwar um ungefähr 31 % bis 2035 und um 43 % bis 2050. Fossile Energieträger werden 2035 137 PJ und 2050 108 PJ beitragen. Würden nur WKK-Anlagen eingesetzt, könnten theoretisch im Jahr 2035 etwa 13,5 TWh Strom und im Jahr 2050 15 TWh erzeugt werden. In den Grundlagen für die Energiestrategie des Bundesrates (Frühjahr 2011) werden 13,45 TWh_{el} im Jahr 2050 in Betracht gezogen. Das entspricht beinahe dem theoretischen beziehungsweise technisch realisierbaren Wert⁶.

Der sinkende Energiebedarf von Gebäuden aufgrund verbesserter Gebäudeisolierungen wird künftig den Einsatz von WKK-Anlagen begrenzen, denn der Wirkungsgrad und die Wirtschaftlichkeit der Anlagen sinken mit abnehmenden Laufzeiten. Bei einem massiven Ausbau müssten bestehende Gebäude und Heizanlagen umgebaut werden. Obwohl technische Fortschritte in den nächsten Jahren den Wirkungsgrad der WKK-Anlagen und die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpen erhöhen werden, ist davon auszugehen, dass aus wirtschaftlichen und politischen Gründen das theoretische Potenzial nicht erreicht werden kann.

5. Einschätzung zu Leistungsverfügbarkeit und Energiequalität

WKK-Anlagen können theoretisch auf zwei Arten betrieben werden. Im wärmegeführten Betrieb ist der Wärmebedarf ausschlaggebend für die Produktion und der erzeugte Strom wird als Nebenprodukt in das Elektrizitätsnetz gespeist. So wird fast alle Nutzenergie verwendet. Die alternative Betriebsart ist stromgeführt, das heisst die Produktion richtet sich nach dem Strombedarf. Weil aber die Wärme im Gegensatz zum Strom nur lokal verwendet werden kann, muss zu viel produzierte Wärme gespeichert werden, wenn alle Nutzenergie Verwendung finden soll. Im stromgeführten Betrieb muss die Anlage also über einen Wärmespeicher oder eine zusätzliche Heizquelle verfügen, um die überschüssige Wärme zu nutzen oder fehlende Wärme zu decken. Aber auch wenn ein Speicher von genügender Grösse vorhanden ist, verringern die Wärmeverluste den Gesamtwirkungsgrad.

Um hohe Gesamtwirkungsgrade von bis zu 90 % zu erreichen, muss eine WKK-Anlage daher in der Regel wärmegeführt betrieben werden.

Die Betriebsstunden von heizwärmegeführten Anlagen liegen typischerweise zwischen 3000 und 4500 pro Jahr⁷. Gewisse Anlagen erreichen auch höhere Betriebsvolllaststunden (5000 Stunden pro Jahr und mehr). Dies sind allerdings Einzelfälle, zum Beispiel bei Spitälern oder Altersheimen, wo ein besonders hoher Wärmebedarf besteht (Komfort und eventuell Prozesswärme). Anlagen in Wohnsiedlungen, in Dienstleistungsgebäuden und in der Industrie erreichen rund 4000 Betriebsvolllaststunden pro Jahr.

⁵ Quelle: BFE 2011

⁶ In seiner Publikation «Wärme und Strom effizient kombinieren» (Frühling 2011) erwähnt der Verband V3E ein Potenzial von 12 % im Jahr 2030, was 7 GWh entspricht. Quelle: V3E 2011

⁷ Quelle: Gruneko 2010

6. Investitionskosten

Für neue Anlagen mit einer elektrischen Leistung über 200 kW liegen zurzeit die Investitionskosten um 900 Franken pro kW. Bei kleinere Anlagen mit einer Leistung von 110 kW betragen die Investitionskosten rund 1400 CHF.⁸

Bis 2035 werden die Kosten voraussichtlich sinken, dank der Erhöhung des elektrischen Wirkungsgrades und der Steigerung der mittleren Leistung von Neuanlagen.

Bis 2050 werden mit grösster Wahrscheinlichkeit Brennstoffzellen zur Verfügung stehen, die mit einem elektrischen Wirkungsgrad von 60 % arbeiten. Es ist anzunehmen, dass die Investitionskosten proportional zur Erhöhung des Wirkungsgrades sinken. Mit grösseren Leistungen sinken auch die Betriebs- und Unterhaltskosten (B&U-Kosten). Zudem gibt es in Brennstoffzellen keine Bewegung, dementsprechend werden keine mechanischen und lufttechnischen Abnutzungen vorhanden sein.

7. Rahmenbedingungen

Unter den heutigen Rahmenbedingungen werden sich WKK-Anlagen nur in spezifischen Bereichen wie Spitätern, Industrien mit Dampfprozessen oder Nah- und Fernwärme-Heizzentralen entwickeln, wo eine kontinuierliche Wärmeabnahme und damit hohe Laufzeiten gesichert sind.

⁸ Quelle. WKK Fachverband

8. Bewertung und SWOT-Analyse

Bewertungskriterium	2019	2035	2050
Investitions- und Geste- hungskosten	Gestehungskosten über Marktpreis, ab- hängig vom Wärme- lös	Kosten im Bereich des erwarteten Marktpreises	Kosten im Bereich des erwarteten Marktpreises
Umweltverträglichkeit	höhere CO ₂ -Belastung als Schweizer Strom- mix, sofern mit fossilen Energieträgern betrie- ben	höhere CO ₂ -Belastung als Schweizer Strom- mix, sofern mit fossilen Energieträgern betrie- ben	höhere CO ₂ -Belastung als Schweizer Strommix, so- fern mit fossilen Energie- trägern betrieben
Verfügbarkeit der Energie	Grund- und Mittellast- Erzeugung, besonders im Winter	Grund- und Mittellast- Erzeugung, besonders im Winter	Grund- und Mittellast- Erzeugung, besonders im Winter
Produktionspotenzial	ca. 1,7 TWh (2,5 % des Strombedarfs)	ca. 3,8 TWh	ca. 6 TWh
Gesellschaftliche Akzep- tanz	kein besonderes Prob- lem	kein besonderes Prob- lem	kein besonderes Problem
Politische Akzeptanz	Konflikt mit neuer Klimapolitik	Konflikt mit neuer Klimapolitik	Konflikt mit neuer Klimapo- litik

Tabelle 1: Bewertung der Stromproduktion mit Wärme-Kraft-Kopplung nach verschiedenen Kriterien für die Zeiträume. Grün: gut, orange: genügend, rot: schlecht.

extern	<p>Chancen</p> <ul style="list-style-type: none"> - Winterdefizit in der Stromversorgung - Ersatzbedarf zahlreicher (mehr als 10'000) Ölfeuerungen mit hohen thermischen Leistungen - Gas ist umweltverträglicher als Öl (als Ersatz von Ölfeuerungen) - Entwicklung der Brennstoffzelle - erneuerbare Brennstoffe - hohe Gesamtenergieeffizienz - einfache Bewilligung nötig 	<p>Risiken</p> <ul style="list-style-type: none"> - starke Erhöhung der CO₂-Abgabe - Lärmproblem - Abnahme des Wärmebedarfs durch verbesserte Wärmeisolierungen - Unsicherheit bezüglich Kosten bei Umbau von bestehenden Heizanlagen - Änderung CO₂-Gesetz, dadurch höhere CO₂-Kosten mit Auswirkungen auf Strom- und Wärmepreis - sinkende Nachfrage nach WKK-Lösungen führt zu kleinerem Angebot - konkurrierende Technologien wie Wärmepumpen in Kombination mit PV
intern	<p>Stärken</p> <ul style="list-style-type: none"> - ausgereifte Technologie, keine Überraschung - kann dank Contracting interessant für EVU sein - hohes Know-how bei EVU vorhanden - Einsparung des Netznutzungsentgelts bei Eigenverbrauch vor Ort 	<p>Schwächen</p> <ul style="list-style-type: none"> - geringe Regelfähigkeit falls wärmegeführt - Abhängigkeit vom Wärmebedarf - Gestehungskosten im Moment hoch - CO₂-Emissionen bei fossilen Brennstoffen - Ausbau Gasnetz beziehungsweise Vorrang von WKK und Verdichtung Gasanschlüsse nötig - starker Ausbau ist nur im Erneuerungsmarkt mit oft hohen Anpassungskosten möglich

Tabelle 2: SWOT-Analyse

9. Die wichtigsten Zahlen im Überblick

Kennzahl	Jahr	Quelle	Wert
Anzahl WKK-Anlagen in der Schweiz	2018	BFE, Gesamtenergiestatistik 2018, Tabelle 36	897
elektrische Leistung WKK-Anlagen in der Schweiz	2018	BFE, Gesamtenergiestatistik 2018, Tabelle 36	496 MW
Jahresstromproduktion aus WKK-Anlagen in der Schweiz	2018	BFE, Gesamtenergiestatistik 2018, Tabelle 36	1690 GWh
erneuerbare Anteil WKK-Stromproduktion in der Schweiz	2017	BFE, Thermische Stromproduktion inklusive Wärmekraftkopplung (WKK) in der Schweiz, Ausgabe 2017, Kapitel 3.3	48 %

10. Quellenverzeichnis

BFE 2009	Beseitigung von Hemmnissen bei der Verbreitung von Wärmekraftkopplung (WKK) in der Schweiz, Bundesamt für Energie BFE, Bern, 2009
BFE 2011	Grundlagen für die Energiestrategie des Bundesrates, Aktualisierung der Energieperspektiven 2035, Frühjahr 2011, Bundesamt für Energie BFE, Bern, 2011
BFE 2017	Thermische Stromproduktion inklusive Wärmekraftkopplung (WKK), Ausgabe 2017, Bundesamt für Energie BFE
BFE 2018	Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000–2017 nach Verwendungszwecken, BFE
BFE 2018*	Gesamtenergiestatistik 2018, BFE
Eurelectric 2007	Statistics and prospects for the European electricity sector (Eurprog 2007), Eurelectric, Brüssel, 2007
Gruneko 2010	Untersuchung der Wirtschaftlichkeit von BHKW-Anlagen, Gruneko Schweiz AG, Basel, 2010
WKK-Fachverband	Schweizerischer Fachverband für Wärmekraftkopplung, Oktober 2017
V3E 2011	Wärme und Strom effizient kombinieren, Verband effiziente Energieerzeugung, Sarnen, 2011