

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Fakultät Life Science
Department Umwelttechnik

Ein Beitrag zum besseren Verständnis der Kraft-Wärme-Kopplung hinsichtlich des Pri- märenergiebedarfs und der CO₂-Emissionen – Detailanalyse und Bildung von Kennzahlen

Bachelorarbeit
im Studiengang Umwelttechnik

vorgelegt von

Nicola Korth

Matrikel-Nr. XXXXXXXXXX

Hamburg

am 15. November 2017

Erstgutachter: Prof. Dr. Armin Gregorzewski – HAW Hamburg

Zweitgutachter: Prof. Dr. Heiner Kühle – HAW Hamburg

Kurzfassung

Die Substitution von Kohle durch regenerative Energiequellen wird in einer Übergangszeit vermutlich einen erhöhten Einsatz von Erdgas erfordern, welches bevorzugt zur gekoppelten Erzeugung von Strom und Wärme genutzt werden sollte (KWK: Kraft-Wärme-Kopplung). In dieser Arbeit wird analysiert, in welchem Maß der Primärenergiebedarf und die CO₂-Emissionen durch KWK auf der Basis von Erdgas-Motoren im Vergleich zur getrennten Erzeugung von Strom in konventionellen Kraftwerken und Wärme in Erdgas-Heizkesseln bzw. elektrischen Wärmepumpen reduziert werden können. Der Effekt der KWK beruht auf einer Vielzahl von Parametern, deren Einflüsse mathematisch analysiert, numerisch ausgewertet und in zahlreichen Diagrammen transparent dargestellt werden.

Die Analyse zeigt, dass die Einspareffekte in hohem Maß von der Leistung der Motoren – aufgrund der starken Abhängigkeit der elektrischen und thermischen Nutzungsgrade von der Motorleistung – und vom Anteil der Motoren an der Wärmeversorgung abhängen. Verteilungsverluste für Strom und Wärme spielen dagegen eine untergeordnete Rolle. Weiterhin wird gezeigt, dass die Einspareffekte sehr stark von den elektrischen Nutzungsgraden bzw. den stromspezifischen CO₂-Emissionen der Referenzstromerzeugung abhängen. Abschließend wird dargestellt, in wieweit KWK sich auch dann noch behaupten kann, wenn für die Referenzwärmeerzeugung elektrische Wärmepumpen anstelle einer Erdgas-Heizung angenommen werden

Aus den präsentierten Diagrammen können nahezu beliebige Fälle abgelesen werden. Vereinfachte Berechnungsgleichungen ermöglichen ein schnelles Nachrechnen. Aus der Vielzahl durchgeführter Berechnungen auf der Basis geeigneter Bezugsgrößen werden Kennwerte abgeleitet, die eine schnelle und dennoch gute Einschätzung der KWK ermöglichen.

Inhalt

Kurzfassung.....	II
Abbildungsverzeichnis	IV
Abkürzungsverzeichnis	VII
Formelzeichen	VIII
Indizes	IX
1 Einleitung und Zielsetzung	1
1.1 Entwicklung der KWK in Deutschland	1
1.2 KWK in Europa	3
2 Berechnungsgrundlagen.....	5
3 Datengrundlage	7
3.1 Wärmebedarf W_{th}	7
3.2 Anteil A der KWK-Anlage an der Wärmeversorgung	7
3.3 Nutzungsgrade	8
4 Primärenergieeinsparungen gegenüber Heizkesseln.....	13
4.1 Einfluss von Verteilungsverlusten.....	21
4.2 Einfluss der Referenzstromerzeugung.....	25
5 CO ₂ -Einsparungen gegenüber Heizkesseln	30
6 Referenzwärmeerzeugung mit Wärmepumpe.....	42
6.1 Primärenergieeinsparungen	42
6.2 CO ₂ -Einsparungen	45
7 Zusammenfassung.....	48
Literaturverzeichnis.....	50
Eidesstattliche Erklärung.....	52
Anhang	53
A1 Wertetabelle zur Übersicht	53
A2 Einfluss der Verteilungsverluste auf die CO ₂ -Einsparungen	54

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Entwicklung der KWK-Nettostromerzeugung von 2003 bis 2015 [3]	2
Abbildung 2: Entwicklung der KWK-Nettowärmezeugung von 2003 bis 2015 [3].....	3
Abbildung 3: Wärmeleistungsbedarf eines Verbrauchers der Größe nach geordnet (Jahresdauerlinie).....	7
Abbildung 4: Thermische, elektrische und Gesamtwirkungsgrade von KWK-Anlagen [7]	9
Abbildung 5: Vergleich der thermischen Wirkungsgrade dieser Arbeit mit denen aus [7].....	10
Abbildung 6: Zusammenhang zwischen thermischer und elektrischer Leistung der KWK- Anlagen.....	11
Abbildung 7: Strom-/Wärmeverhältnis der KWK-Anlagen für unterschiedliche Anteile A...	12
Abbildung 8: Prozentuale Primärenergieeinsparungen durch KWK-Anlagen	13
Abbildung 9: Spezifische Primärenergieeinsparungen durch KWK-Anlagen.....	14
Abbildung 10: Primärenergieeinsparungen bezogen auf die Strom- bzw. Wärmeerzeugung.	15
Abbildung 11: Jährliche PE-Einsparungen und Wärmemengen einer KWK-Anlage für $A = 1$ und $VBD_{KWK} = 5000$ h	16
Abbildung 12: Anzahl der für einen Wärmebedarf von $W_{th} = 10$ TWh benötigten KWK- Anlagen für $A = 1$	17
Abbildung 13: Anzahl der Wohneinheiten mit $W_{th} = 10$ MWh die von einer KWK-Anlage versorgt werden können.....	17
Abbildung 14: PE-Mehrbedarf der KWK-Anlage, PE-Einsparung im Kraftwerk und die tatsächliche PE-Einsparung	18
Abbildung 15: PE-Einsparung im Kraftwerk ($\eta_{elKW} = 0,4$) im Verhältnis zum PE-Mehrbedarf der KWK-Anlage.....	19
Abbildung 16: Zusätzliche Stromerzeugung durch KWK-Anlagen bei gleichem Gesamt-PE- Einsatz	20
Abbildung 17: Zusätzliche Stromerzeugung durch KWK-Anlagen bei gleichem Gesamt-PE- Einsatz für $A = 1$	20
Abbildung 18: Einfluss der Stromverteilungsverluste auf die Primärenergieeinsparungen	21
Abbildung 19: Einfluss der Stromverteilungsverluste auf die Primärenergieeinsparungen für $A = 1$	22
Abbildung 20: Einfluss thermischer Verteilungsverluste auf die Primärenergieeinsparungen	23

Abbildung 21: Einfluss thermischer Verteilungsverluste auf die Primärenergieeinsparungen für $A = 1$	24
Abbildung 22: Einfluss thermischer Verteilungsverluste und des Anteils A auf die PE-Einsparungen	24
Abbildung 23: Einfluss der Referenzstromerzeugung auf die PE-Einsparungen (strom- und wärmebezogen).....	25
Abbildung 24: Einfluss der Referenzstromerzeugung auf die PE-Einsparungen (strom- und wärmebezogen).....	26
Abbildung 25: Primärenergieeinsparung im Kraftwerk pro MWh PE-Mehrbedarf der KWK-Anlage ($A = 1$).....	27
Abbildung 26: Zusätzliche Stromerzeugung durch KWK bei gleichem Gesamt-PE-Einsatz für $A = 1$	28
Abbildung 27: Einfluss der Stromverteilungsverluste auf die PE-Einsparungen für $\eta_{elKW} = 0,6$ und $A = 0,75$	29
Abbildung 28: Einfluss der thermischen Verteilungsverluste auf die PE-Einsparungen für $\eta_{elKW} = 0,6$ und $A = 0,75$	29
Abbildung 29: Prozentuale Einsparungen an CO_2 -Emissionen für $f^*_{KW} = 0,9$	32
Abbildung 30: Spezifische Einsparungen an CO_2 -Emissionen für $f^*_{KW} = 0,9$	33
Abbildung 31: Einfluss der Referenzstromerzeugung auf die CO_2 -Einsparungen (strom- und wärmebezogen).....	35
Abbildung 32: Jährliche CO_2 -Emissionseinsparungen einzelner KWK-Anlagen für $A = 1$ und $VBD_{KWK} = 5000$ h	35
Abbildung 33: Zusätzlicher CO_2 -Ausstoß durch KWK, CO_2 -Einsparung im Kraftwerk und tatsächliche CO_2 -Einsparung für $f^*_{KW} = 0,9$ und $A = 1$	37
Abbildung 34: CO_2 -Emissionseinsparungen pro MWh PE-Mehrbedarf der KWK-Anlage....	38
Abbildung 35: Zusätzliche Stromerzeugung durch KWK bei gleichem Gesamtausstoß an CO_2 -Emissionen für $A = 1$	39
Abbildung 36: Einsparungen an CO_2 -Emissionen unter Einfluss der Stromverteilungsverluste für $f^*_{KW} = 0,9$	40
Abbildung 37: Einsparungen an CO_2 -Emissionen unter Einfluss thermischer Verteilungsverluste für $f^*_{KW} = 0,9$	40
Abbildung 38: Spezifische PE-Einsparungen für $\eta_{elKW} = \eta_{elKW-WP} = 0,4$ und $\epsilon_{WP} = 4$	43
Abbildung 39: Darstellung dreier Szenarien für die spezifischen PE-Einsparungen für $A = 0,75$	44

Abbildung 40: Spezifische Einsparungen an CO ₂ -Emissionen für $f_{KW}^* = f_{WP}^* = 0,9$ und $\varepsilon_{WP} = 4$	45
Abbildung 41: Darstellung dreier Szenarien der CO ₂ -Emissionseinsparungen für $A = 0,75$..	46

Abkürzungsverzeichnis

CO ₂	Kohlenstoffdioxid
GuD	Gas-und-Dampfturbinen-Kraftwerk
GW	Gigawatt
H	Referenzwärmeerzeugung
KA	Kapazitätsauslastung
kW	Kilowatt
KW	Referenzstromerzeugung
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
KWKG	Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz
MWh	Megawattstunde
PE	Primärenergie
TWh	Terrawattstunde
VBD	Vollbenutzungsdauer
ZH	Zusatzheizung

Formelzeichen

A	Anteil der KWK an der Wärmeversorgung
Δm	CO ₂ -Emissionseinsparung
ΔW_{PE}	Primärenergieeinsparung
ε	Arbeitszahl
η	Nutzungsgrad
f	primärenergiespezifische CO ₂ -Emissionen
f^*	stromspezifische CO ₂ -Emissionen
KA	Kapazitätsauslastung
m	CO ₂ -Emissionen
m_+	CO ₂ -Emissionsmehrausstoß
σ	Stromkennzahl
VBD	Vollbenutzungsdauer
W_{el}	elektrisch erzeugte Energie
W_{el+}	zusätzlich erzeugter Strom bei gleicher Gesamtprimärenergie
\dot{W}_{el}	elektrische Leistung
W_{PE}	Primärenergiebedarf
W_{PE+}	Primärenergie mehrbedarf
W_{th}	Wärmebedarf
\dot{W}_{th}	thermische Leistung

Indizes

BK	Braunkohle
EG	Erdgas
el	elektrisch
H	Referenzwärmeerzeugung
KW	Referenzstromerzeugung
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
KW-WP	Kraftwerk welches die Energie für die Wärmepumpe bereitstellt
PE	Primärenergie
SK	Steinkohle
th	thermisch
V	Verteilungsverluste
WP	Wärmepumpe
ZH	Zusatzheizung

1 Einleitung und Zielsetzung

Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) wird immer wieder pauschal als ein geeignetes Mittel propagiert, den Primärenergieverbrauch und die CO₂-Emissionen zu senken. Mit Hilfe einfacher Energiebilanzen, häufig in Form ansprechender bunter Sankey-Diagramme, werden gegenüber der getrennten Erzeugung von Strom und Wärme Primärenergieeinsparungen von 25 bis 40% und oftmals noch sehr viel höhere CO₂-Einsparungen angegeben. Meistens wird dabei unterstellt, dass KWK-Anlagen die alleinige Wärmeversorgung übernehmen, was i. d. R. aber aus technischen und/oder ökonomischen Gründen nicht der Fall ist, sondern ein nicht unerheblicher Anteil durch konventionelle Heizkessel abgedeckt wird.

Auch von Seiten der Politik wird KWK als wichtiger Baustein der Energiewende betrachtet, was nicht zuletzt durch das Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung (Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz – KWKG) [1] zum Ausdruck kommt, mit dessen Hilfe der Anteil des in KWK erzeugten Stromes deutlich erhöht werden soll.

Die vorliegende Arbeit verfolgt das Ziel, den Unterschied zwischen der gekoppelten Erzeugung von Strom und Wärme einerseits und der getrennten Erzeugung von Strom und Wärme andererseits heraus zu arbeiten. Die Betrachtung beschränkt sich dabei auf die am häufigsten eingesetzten KWK-Anlagen auf der Basis von Verbrennungsmotoren. Dampfturbinen, Gasturbinen, Brennstoffzellen und Stirlingmotoren sind nicht Gegenstand dieser Untersuchung.

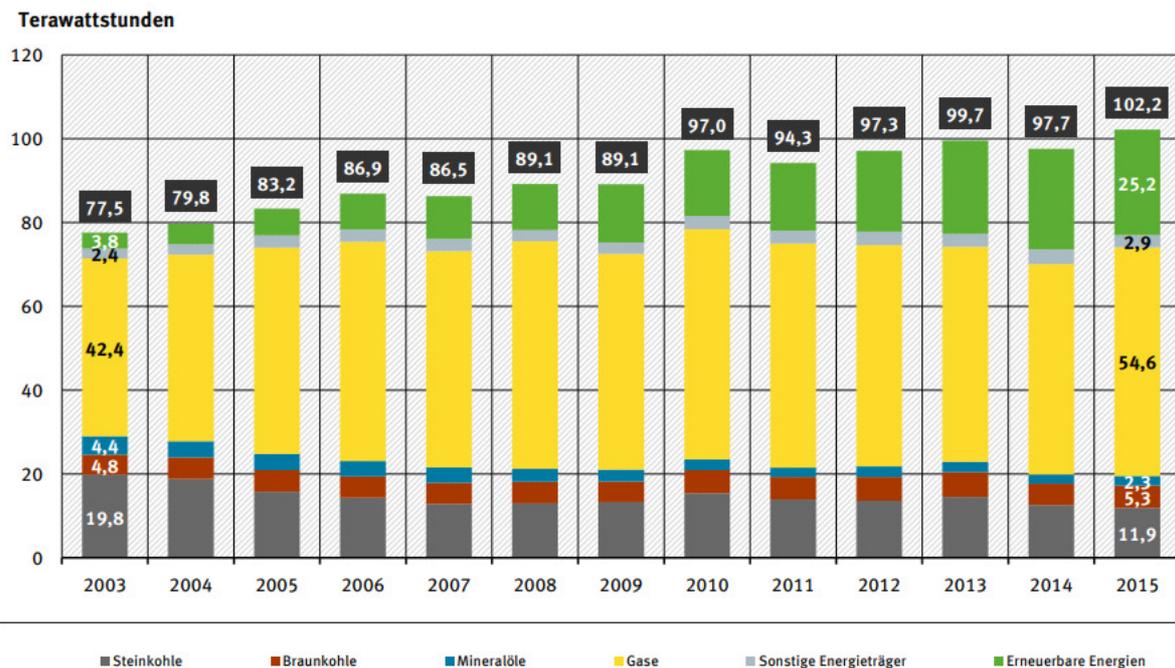
Es soll deutlich gemacht werden, dass die große Bandbreite an Motoren mit großen Unterschieden in den elektrischen und thermischen Leistungen sowie den elektrischen und thermischen Nutzungsgraden, die unterschiedlichsten Versorgungsbedingungen und die meist nicht eindeutige Situation auf Seiten der getrennten Erzeugung von Strom und Wärme keine Pauschalaussage über Einsparungen zulässt und dass die üblicherweise in Prozentangaben gemachten Aussagen nicht besonders aussagekräftig sind. Mit Hilfe umfangreicher, systematischer Berechnungen sollen die Wirkungen aller wesentlichen Einflussgrößen untersucht und die Ergebnisse möglichst so transparent dargestellt werden, dass der Leser eigene Konfigurationen daraus ablesen kann, ohne eigene Berechnungen anstellen zu müssen. Außerdem soll der Versuch unternommen werden, aus den Ergebnissen Kennzahlen zu bilden, so dass am Ende doch gewisse Pauschalaussagen möglich sind.

1.1 Entwicklung der KWK in Deutschland

Die Nutzung von KWK in Deutschland verzeichnet in den vergangenen Jahren einen Zuwachs. Alleine das KWKG hat von 2009 bis 2012 den Neubau und die Modernisierung von 18.687 KWK-Anlagen mit einer Gesamt-Nettleistung von 2,3 GW_{el} gefördert [2]. Der durch KWK-Anlagen erzeugte Nettostrom ist in den Jahren 2003 bis 2010 kontinuierlich angestiegen (s. Abb. 1). Dieser Anstieg wird vor allem der vermehrten Nutzung von Biomasse und der

Errichtung von mit Erdgas betriebenen KWK-Anlagen zugeschrieben. Die Anzahl der KWK-Anlagen, welche mit Steinkohle oder Mineralölen betrieben werden, ist in den vergangenen Jahren rückläufig. In den Jahren 2010 bis 2015 ist die Nettostromerzeugung aus KWK auf einem ähnlichen Niveau geblieben. Für das Jahr 2016 wird aufgrund niedrigerer Temperaturen und eines niedrigeren Erdgaspreises mit einem erheblichen Anstieg gegenüber dem Jahr 2015 gerechnet [3]. Die KWK-Nettostromerzeugung hat einen Anteil von etwa 8,2% (vorläufige Angabe für 2017) an der Gesamt-Nettostromerzeugung in Deutschland [4].

KWK-Nettostromerzeugung nach Energieträgern*



*ohne Berücksichtigung der mit der Fermenterwärme

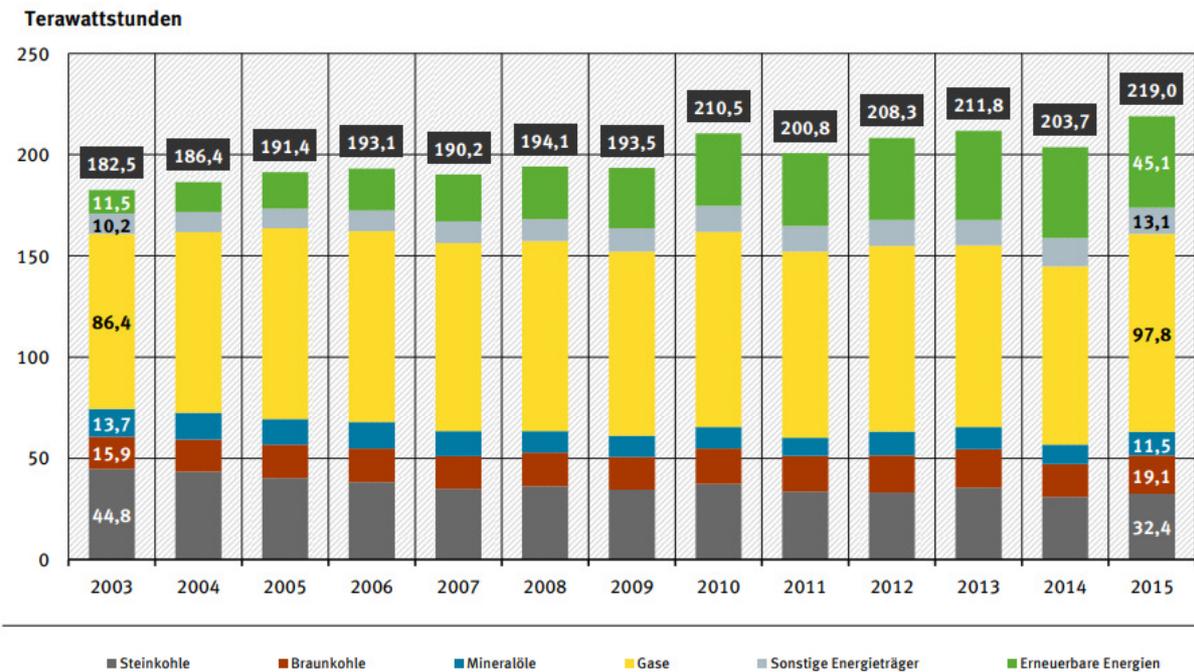
Quelle: Statistisches Bundesamt; Öko-Institut; Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW); Energy Environment Forecast Analysis Institut (EEFA), Stand 04/2017

Abbildung 1: Entwicklung der KWK-Nettostromerzeugung von 2003 bis 2015 [3]

Die KWK-Nettostromerzeugung soll bis 2020 auf 110 TWh und bis zum Jahr 2025 auf 120 TWh ausgebaut werden. Dies sind die angestrebten, durch das KWKG 2016 vorgegebenen Ziele [3].

Dementsprechend verzeichnet auch die in KWK erzeugte Wärme eine Zunahme (s. Abb. 2). Die Bereitstellung von Nah- und Fernwärme erfolgt in Deutschland zu etwa 82% aus KWK-Anlagen [4].

KWK-Nettowärmeerzeugung nach Energieträgern*



*ohne Berücksichtigung der Fermenterwärme

Quelle: Statistisches Bundesamt; Öko-Institut; Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW); Energy Environment Forecast Analysis Institut (EEFA), Stand 04/2017

Abbildung 2: Entwicklung der KWK-Nettowärmeerzeugung von 2003 bis 2015 [3]

Durch die zunehmend besser werdenden Gebäudedämmungen wird der Wärmebedarf in Deutschland in den nächsten Jahren weiter zurückgehen. KWK-Anlagen müssen in der Zukunft flexibel einsetzbar sein, um in Phasen, in denen keine Wärme aus Erneuerbaren Energien zur Verfügung steht, von Bedeutung zu bleiben [3].

1.2 KWK in Europa

Betrachtet man die gesamte KWK-Bruttostromerzeugung der EU 28, so ist diese in den Jahren 2005 bis 2015 auf einem ähnlichen Niveau geblieben. In einigen Ländern gibt es starke Zunahmen wie z.B. in Belgien, Litauen und der Slowakei, in anderen Ländern gibt es Rückläufe wie in Dänemark, Rumänien und Ungarn, in wieder anderen Ländern gab es kurzzeitig einen Anstieg gefolgt von einem Rückgang (z.B. Bulgarien) und in noch anderen Ländern gibt es kaum eine Entwicklung (z.B. Niederlande, Portugal). Es gibt auch Länder, die keinen nennenswerten Anteil an KWK-Strom haben, wie z.B. Frankreich und Norwegen. Frankreich erzeugt seinen Strom überwiegend aus Kernenergie, Norwegen fast ausschließlich aus Wasserkraft. Deutschland liegt mit etwa 12% KWK-Anteil an der Bruttostromerzeugung im Mittelfeld der EU 28 [5].

In den Niederlanden liegt die KWK-Bruttostromerzeugung bei ca. 27%, in Dänemark liegt diese bei ca. 40%. In diesen beiden Ländern hat der Zuwachs an KWK-Strom nicht erst in den 1990er Jahren mit der Energiewende begonnen, sondern schon zuvor. Die Niederlande besitzen das zweitgrößte Erdgasvorkommen in Europa, seit Entdeckung dieses Vorkommens

1959 wurde massiv in den Ausbau von Gasleitungen investiert, und erdgasbefeuerte Heizkessel dominieren seitdem die Wärmeversorgung. Ab 1978 wurde in den Bereichen Landwirtschaft, Industrie und Gewerbe in den Ausbau von KWK-Anlagen investiert. Durch Investitionszuschüsse ergab sich ein Wachstum von 30%, 1988 wurden 15% des Stromes durch industrielle KWK-Anlagen bereitgestellt. Das Energiewirtschaftsgesetz der Niederlande von 1989 förderte den KWK-Anlagenbau und die Nutzung von KWK-Strom erneut. 1998 änderte sich die Wettbewerbssituation in den Niederlanden drastisch. Durch die Novelle des niederländischen Energiewirtschaftsgesetzes von 1998 im Rahmen des Liberalisierungsprozesses der Strom und Gasmärkte der EU, wurden keine hohen Einspeisevergütungen für KWK-Strom mehr zugesichert. Hierdurch waren die KWK-Anlagen in Schwachlastzeiten oft nicht mehr konkurrenzfähig. Durch ein von der EU abgesegnetes Maßnahmenpaket konnte der Bestand an KWK-Anlagen weitgehend erhalten bleiben. Einen weiteren Zubau hat es seitdem allerdings nicht gegeben [6].

Dänemark wurde durch die beiden Ölkrisen in den Jahren 1973 und 1979 schwer in Mitleidenschaft gezogen, da über 90% der für Strom und Wärme genutzten Primärenergie aus importierten Mineralölen stammte. Im Zuge dessen wurden 1976 und 1981 nationale Energiepläne entwickelt, um die Unabhängigkeit von importierter Primärenergie zu stärken. Der Zubau von KWK-Anlagen und der Umbau von bestehenden kohlebetriebenen KWK-Anlagen auf Erdgasbetrieb wurden in den folgenden Jahren extrem gefördert. Es gab Anlagenzuschüsse und Zuschüsse für die Verstromung von Erdgas, Hackschnitzel und Stroh. Außerdem gab es Subventionen für den Bau von Fernwärmenetzen und industriellen KWK-Anlagen. Die Energiebesteuerung wurde 1990 in Dänemark geändert, fortan war diese CO₂-abhängig, was wiederum einen enormen Zuwachs an industrieller sowie dezentraler KWK zur Folge hatte [6].

2 Berechnungsgrundlagen

In dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass die KWK-Anlage wärmeorientiert ausgelegt ist, die in dieser Anlage erzeugte Wärme also immer vollständig von den angeschlossenen Verbrauchern genutzt wird. Etwaiger Überschussstrom kann jederzeit ins Netz zur weiteren Verteilung eingespeist werden. Eine stromorientierte Auslegung dagegen würde bedeuten, dass die KWK-Anlage wärmeseitig entweder überdimensioniert ist, die verfügbare Wärme also nicht vollständig genutzt wird und teilweise über Notkühler abgeführt wird oder aber die KWK-Anlage wärmeseitig unterdimensioniert ist. In beiden Fällen wird das Potential der KWK-Anlage nicht vollständig genutzt. Rein ökonomisch betrachtet kann eine stromorientierte Auslegung in bestimmten Situationen durchaus vorteilhaft sein, energetisch betrachtet in der Regel aber nicht.

Für die Berechnung von Primärenergieeinsparungen durch KWK gegenüber der getrennten Erzeugung von Strom und Wärme müssen die Primärenergiebedarfe der KWK-Anlage (KWK), der fast immer vorhandenen Zusatzheizung (ZH), der reinen Stromerzeugung in Kraftwerken (KW) und der Wärmeerzeugung in reinen Heizsystemen (H) berechnet werden. Hierfür sind fünf Nutzungsgrade für die Umwandlung von Primärenergie in Strom bzw. Wärme erforderlich:

η_{elKWK} : elektrischer Nutzungsgrad der KWK-Anlage (KWK)

η_{thKWK} : thermischer Nutzungsgrad der KWK-Anlage (KWK)

η_{thZH} : thermischer Nutzungsgrad der Zusatzheizung (ZH)

η_{elKW} : elektrischer Nutzungsgrad der Referenzstromerzeugung (KW)

η_{thH} : thermischer Nutzungsgrad der Referenzwärmeerzeugung (H)

Bei genaueren Betrachtungen müssen auch noch die Verluste für die Verteilung von Strom bzw. Wärme berücksichtigt werden, die hier ebenfalls in Form von Nutzungsgraden – das ist das Verhältnis zwischen der am Ende der Leitung abgegebenen Energie und der eingespeisten Energie – in die Berechnungen einfließen:

η_{elVKWK} : Nutzungsgrad der Stromverteilung KWK

η_{thVKWK} : Nutzungsgrad der Wärmeverteilung KWK

η_{thVZH} : Nutzungsgrad der Wärmeverteilung ZH

η_{elVKW} : Nutzungsgrad der Stromverteilung KW

η_{thVH} : Nutzungsgrad der Wärmeverteilung H

Außerdem muss der Wärmebedarf W_{th} bekannt sein, und es muss bekannt sein, in welchem Verhältnis KWK-Anlage und Zusatzheizung den Wärmebedarf decken. Letzteres wird hier über den Anteil A der KWK-Anlage an der Wärmeversorgung definiert, die Zusatzheizung liefert dann den entsprechenden Komplementäranteil $1 - A$. Insgesamt sind somit 12 Größen erforderlich, um Primärenergieeinsparungen zu berechnen. Wie später noch gezeigt wird, sind für die Berechnungen der CO_2 -Emissionen noch weitere Größen erforderlich.

Die Primärenergiebedarfe der vier Anlagen berechnen sich aus:

$$W_{PEKWK} = \frac{A \cdot W_{th}}{\eta_{thKWK} \cdot \eta_{thVKWK}} \quad (1)$$

$$W_{PEZH} = \frac{(1-A) \cdot W_{th}}{\eta_{thZH} \cdot \eta_{thVZH}} \quad (2)$$

$$W_{PEKW} = \frac{\eta_{elKWK} \cdot \eta_{elVKWK} \cdot A \cdot W_{th}}{\eta_{elKW} \cdot \eta_{elVKW} \cdot \eta_{thKWK} \cdot \eta_{thVKWK}} \quad (3)$$

$$W_{PEH} = \frac{W_{th}}{\eta_{thH} \cdot \eta_{thVH}} \quad (4)$$

und die erzeugte elektrische Energie aus

$$W_{elKWK} = \frac{\eta_{elKWK} \cdot \eta_{elVKWK} \cdot A \cdot W_{th}}{\eta_{thKWK} \cdot \eta_{thVKWK}} \quad (5)$$

Die Einsparung an Primärenergie ergibt sich dann ganz einfach aus

$$\Delta W_{PE} = (W_{PEKW} + W_{PEH}) - (W_{PEKWK} + W_{PEZH}) \quad (6)$$

und die prozentualen Primärenergieeinsparungen betragen

$$\Delta W_{PE} = \frac{\Delta W_{PE}}{(W_{PEKW} + W_{PEH})} \cdot 100\% \quad (7)$$

Absolute und prozentuale Einsparungen werden in dieser Arbeit also als positive Werte angegeben.

3 Datengrundlage

3.1 Wärmebedarf W_{th}

KWK-Anlagen versorgen einzelne Wohngebäude bis hin zu großen Wohnsiedlungen, Nichtwohngebäude und Produktionsbetriebe. Dementsprechend unterschiedlich sind auch die Wärmebedarfe. In dieser Arbeit geht es jedoch nicht um konkrete Einzelfallbetrachtungen, vielmehr sollen generellere Aussagen getroffen werden. In der Regel wird deshalb der Wärmebedarf einfach auf $W_{th} = 1$ MWh normiert.

3.2 Anteil A der KWK-Anlage an der Wärmeversorgung

Prinzipiell gilt $0 \leq A \leq 1$. Dabei bedeutet $A = 1$, dass die KWK-Anlage den kompletten Wärmebedarf alleine ohne Zusatzheizung deckt. Der andere Grenzfall $A = 0$ bedeutet, dass keine KWK-Anlage in Betrieb ist. In dieser Arbeit wird die gesamte Bandbreite untersucht, da A auch in der Praxis stark unterschiedlich sein kann. Abb. 3 veranschaulicht diesen Zusammenhang.

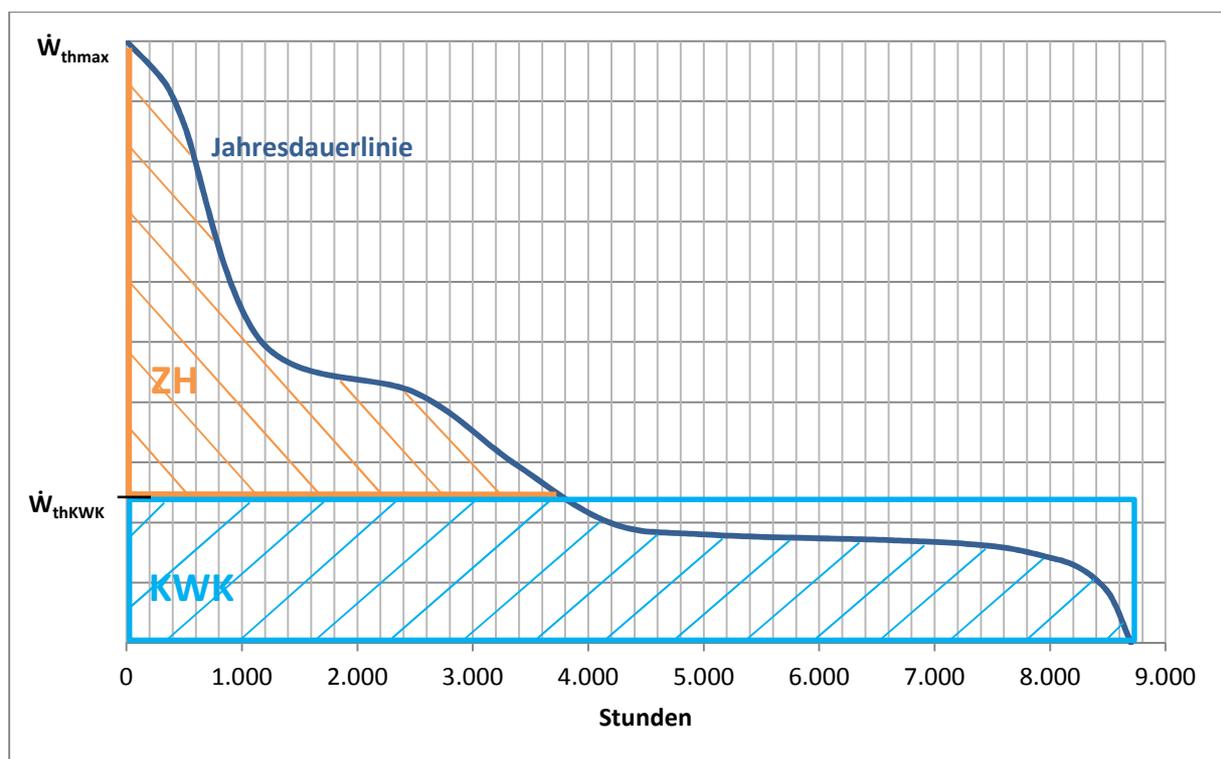


Abbildung 3: Wärmeleistungsbedarf eines Verbrauchers der Größe nach geordnet (Jahresdauerlinie)

Die obere Linie beschreibt den der Größe nach geordneten Wärmeleistungsbedarf eines Verbrauchers (Jahresdauerlinie). Die KWK-Anlage wird in der Regel nicht auf den maximalen Wärmeleistungsbedarf ausgelegt, so dass der obere Leistungsbereich durch eine Zusatzheizung abgedeckt werden muss. Die gesamte Fläche unter der Jahresdauerlinie entspricht dem Jahreswärmebedarf des Verbrauchers, die Fläche zwischen Jahresdauerlinie und Wärmeleistung der KWK-Anlage entspricht der Wärme aus der Zusatzheizung und die Fläche darunter

der Wärme aus der KWK-Anlage. Der Anteil A ergibt sich damit ganz einfach aus einem Flächenverhältnis. Erhöht man die Wärmeleistung der KWK-Anlage, so steigt der Anteil A . Gleichzeitig aber ist die KWK-Anlage weniger gut ausgelastet, d. h. ihre Kapazität wird weniger ausgenutzt. Aus dem Verhältnis zwischen der genutzten Wärme und der theoretisch bei Volllast lieferbaren Wärme ergibt sich die dimensionslose Kapazitätsauslastung KA_{KWK} , die üblicherweise in eine jährliche Vollbenutzungsdauer VBD_{KWK} , häufig auch als Volllaststunden bezeichnet, umgerechnet wird:

$$VBD_{KWK} = KA_{KWK} \cdot 8760 \text{ h} \quad (8)$$

Einer beliebigen Vergrößerung von A steht somit eine sinkende VBD_{KWK} entgegen, welche sich negativ auf die Wirtschaftlichkeit auswirkt, da die zunehmende Anlagenkapazität – verbunden mit höheren Kapitalkosten – immer schlechter ausgenutzt wird. Die Dimensionierung einer KWK-Anlage hängt ganz wesentlich vom Verlauf der Jahresdauerlinie sowie von den Preisen für Strom, Wärme und Primärenergie und nicht zuletzt auch vom Planungsaufwand bzw. der Planungsqualität ab. So werden häufig schlicht Erfahrungswerte aus anderen Projekten für die VBD_{KWK} gewählt, woraus sich dann der Anteil A ergibt und das Primärenergieeinsparpotential nicht ausgeschöpft wird.

3.3 Nutzungsgrade

Die Verteilungsverluste werden zunächst vernachlässigt, d. h.:

$$\eta_{elVKWK} = \eta_{thVKWK} = \eta_{thVZH} = \eta_{elVKW} = \eta_{thVH} = 1$$

Für Heizung (H), Zusatzheizung (ZH) und Stromerzeugung in reinen Kraftwerken (KW) gilt zunächst:

$$\eta_{thH} = \eta_{thZH} = 0,95 \quad \eta_{elKW} = 0,40$$

Die Nutzungsgrade für KWK-Anlagen wurden aus der Arbeit von M. Aslami [7] abgeleitet. Die nachstehende Grafik aus dieser Arbeit (s. Abb. 4) basiert auf der Auswertung von Daten aus „BHKW-Kenndaten 2014/2015 Module, Anbieter, Kosten“ [8]. Deutlich zu erkennen ist, dass der elektrische Wirkungsgrad mit der elektrischen Leistung ansteigt.

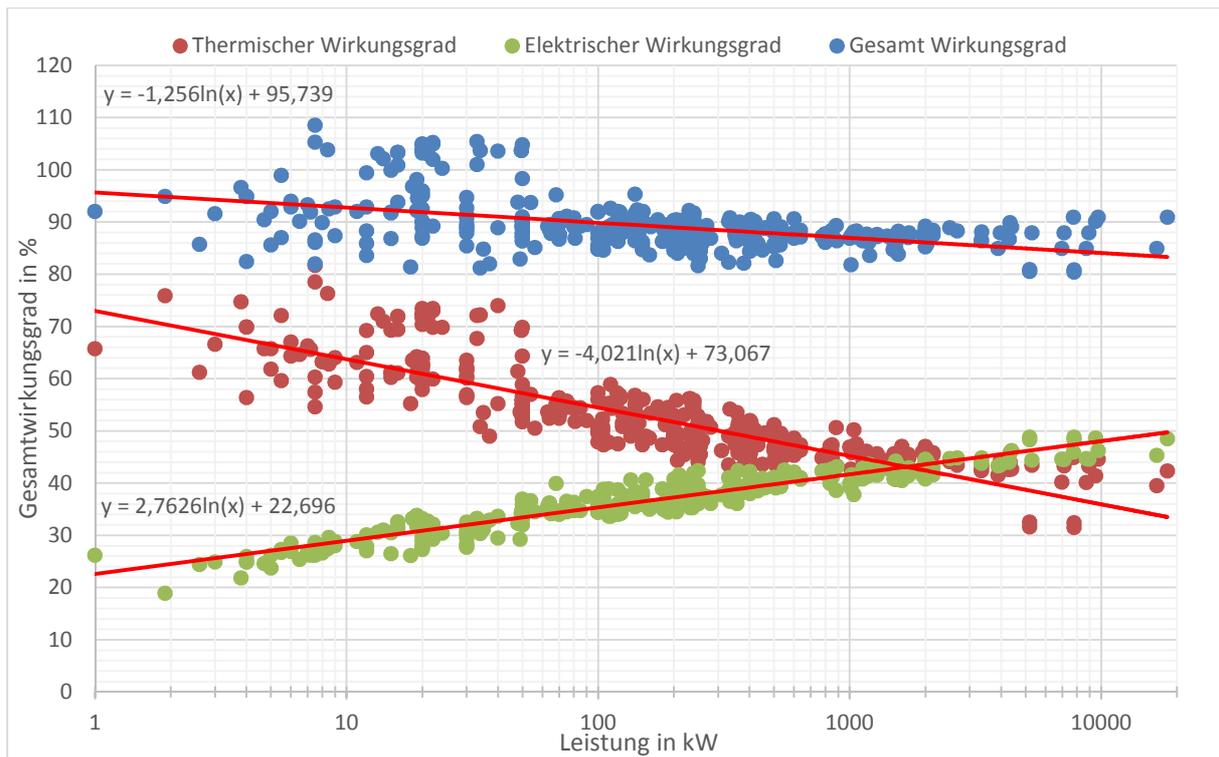


Abbildung 4: Thermische, elektrische und Gesamtwirkungsgrade von KWK-Anlagen [7]

Der Zusammenhang

$$\eta_{elKWK} = 0,027626 \cdot \ln(\dot{W}_{elKWK}) + 0,22696 \quad (9)$$

wurde für die in dieser Arbeit durchgeführten Berechnungen übernommen. Für den thermischen Wirkungsgrad wurde ein eigener Zusammenhang definiert:

$$\eta_{thKWK} = 1,075 - 1,5 \cdot \eta_{elKWK} \quad (10)$$

Abb. 5 zeigt, dass dieser einfache Zusammenhang in hoher Übereinstimmung mit der in Abb. 4 enthaltenen Ausgleichsfunktion ist. Die maximale Abweichung beträgt 0,74%-Punkte. Einem Zuwachs des elektrischen Wirkungsgrades um 1%-Punkt steht eine Abnahme des thermischen Wirkungsgrades um 1,5%-Punkte gegenüber.

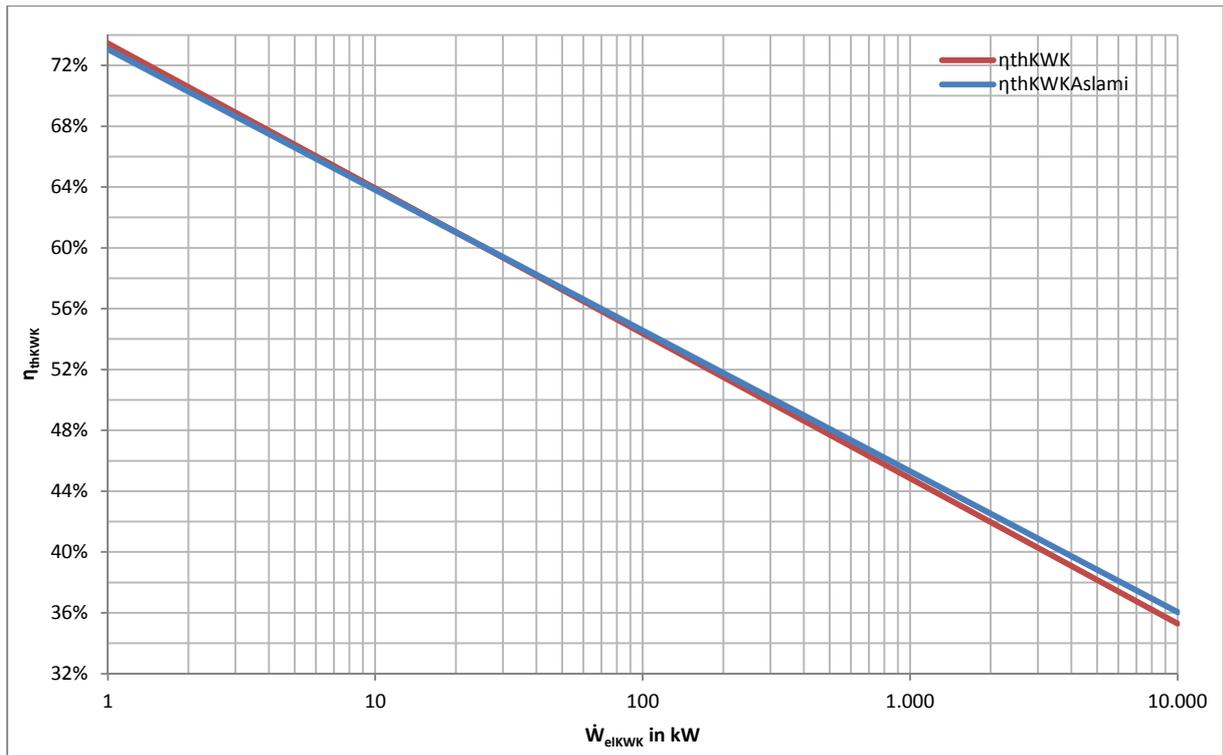


Abbildung 5: Vergleich der thermischen Wirkungsgrade dieser Arbeit mit denen aus [7]

Die thermische Leistung ergibt sich aus

$$\dot{W}_{thKWK} = \frac{\eta_{thKWK} \cdot \dot{W}_{elKWK}}{\eta_{elKWK}} \quad (11)$$

Die Abb. 6 zeigt den Zusammenhang zwischen thermischer und elektrischer Leistung für den Bereich von 1 kW bis 10.000 kW. Während kleine KWK-Anlagen deutlich mehr Wärme als Strom erzeugen, nimmt dieser Unterschied mit zunehmender Größe ab. Sehr große Anlagen erzeugen sogar mehr Strom als Wärme.

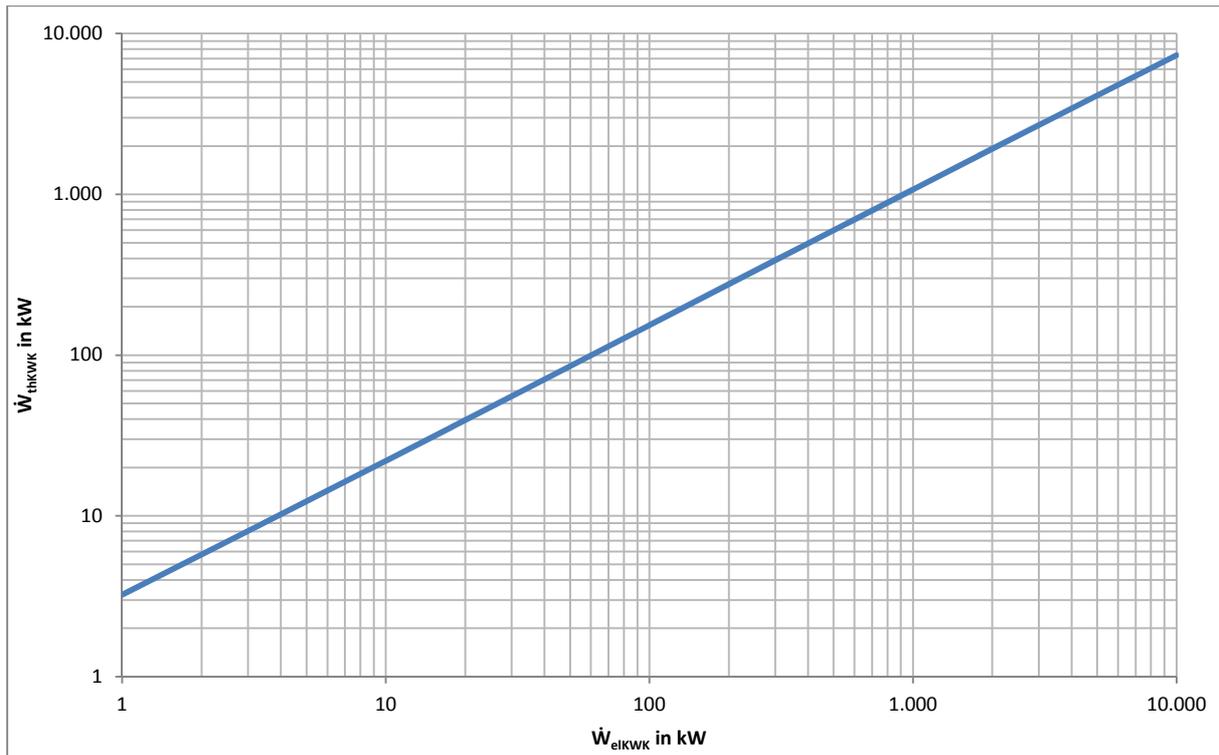


Abbildung 6: Zusammenhang zwischen thermischer und elektrischer Leistung der KWK-Anlagen

Aufgrund wechselnder Umgebungsbedingungen, insbesondere aber durch Teillastbetrieb und Taktung sind die Jahresnutzungsgrade in der Regel etwas kleiner als die entsprechenden Wirkungsgrade. Da hier aber die durchschnittlichen Wirkungsgrade verwendet werden, deren Werte von wenig effizienten Anlagen nach unten gezogen werden ist davon auszugehen, dass die besseren Anlagen Jahresnutzungsgrade erreichen, die den durchschnittlichen Wirkungsgraden entsprechen, die durchgeführten Berechnungen also realistisch und nicht zu optimistisch sind.

Der Zusammenhang zwischen Strom- und Wärmeproduktion einer KWK-Anlage wird häufig auch als Verhältnis durch die sogenannte Stromkennzahl ausgedrückt:

$$\sigma = \frac{W_{elKWK}}{W_{thKWK}} = \frac{\eta_{elKWK}}{\eta_{thKWK}} \quad (12)$$

Berücksichtigt man zusätzlich die Verluste bei der Verteilung von Strom und Wärme und dass KWK-Anlagen i. d. R. nur einen Anteil A des gesamten Wärmebedarfs W_{th} decken, so berechnet sich das Verhältnis von Strom zu Wärme aus:

$$\frac{W_{elKWK}}{W_{th}} = \frac{\eta_{elKWK} \cdot \eta_{elVKWK}}{\eta_{thKWK} \cdot \eta_{thVKWK}} \cdot A \quad (13)$$

In Abb. 7 sind die Strom-/Wärmeverhältnisse, abhängig von der Anlagengröße und dem Anteil A der KWK-Anlage an der Wärmeversorgung unter Vernachlässigung der Verluste für die Strom- und Wärmeverteilung dargestellt.

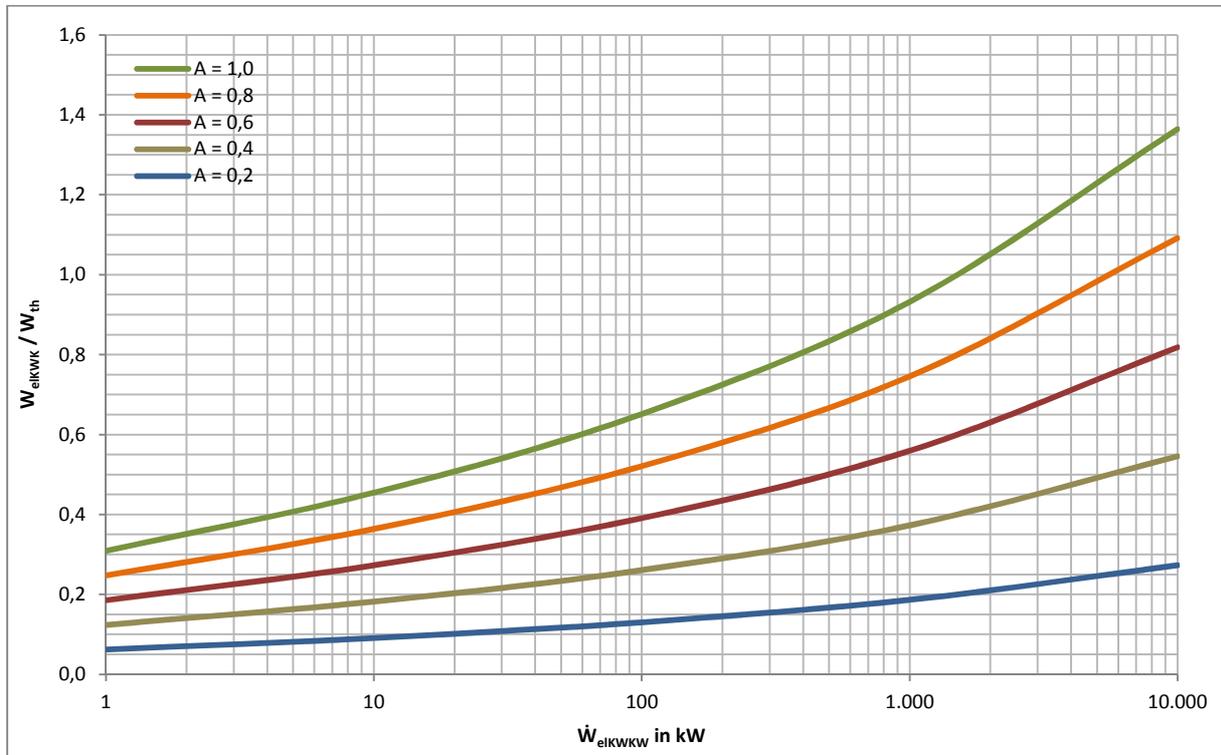


Abbildung 7: Strom-/Wärmeverhältnis der KWK-Anlagen für unterschiedliche Anteile A

4 Primärenergieeinsparungen gegenüber Heizkesseln

Die Primärenergieeinsparungen von KWK-Anlagen gegenüber der getrennten Erzeugung von Strom und Wärme werden meistens in Form einfacher Beispiele in Prozenten formuliert. Abb. 8 dagegen zeigt darüber hinaus zusätzlich den Einfluss der Anlagengröße und gleichzeitig den Einfluss des Anteils A der KWK-Anlage an der Wärmeversorgung.

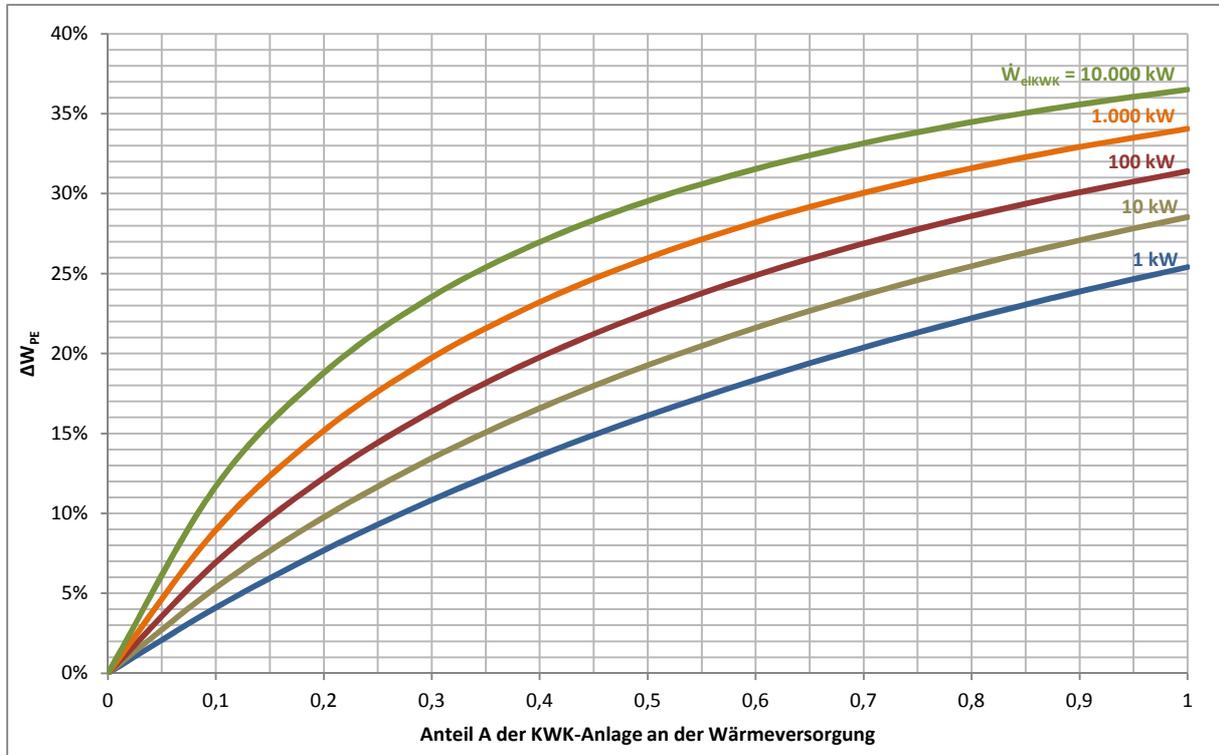


Abbildung 8: Prozentuale Primärenergieeinsparungen durch KWK-Anlagen

Wie zu erwarten steigen die Einsparungen mit zunehmendem Anteil A. Außerdem ist zu erkennen, dass mit zunehmender Anlagengröße die Einsparungen steigen, allerdings lassen sich daraus keine absoluten PE-Einsparungen ableiten. Der Zusammenhang zwischen den prozentualen Einsparungen und dem Anteil A ist nicht linear.

Betrachtet man die absoluten PE-Einsparungen, so ergibt sich aus den Gleichungen (1) bis (4) und (6)

$$\Delta W_{PE} = \left(\frac{\eta_{elKWK} \cdot \eta_{elVKWK} \cdot A \cdot W_{th}}{\eta_{elKW} \cdot \eta_{elVKW} \cdot \eta_{thKWK} \cdot \eta_{thVKWK}} + \frac{W_{th}}{\eta_{thH} \cdot \eta_{thVH}} \right) - \left(\frac{A \cdot W_{th}}{\eta_{thKWK} \cdot \eta_{thVKWK}} + \frac{(1-A) \cdot W_{th}}{\eta_{thZH} \cdot \eta_{thVZH}} \right) \quad (14)$$

bzw. etwas umgeformt

$$\Delta W_{PE} = \left[\left(\frac{\eta_{elKWK} \cdot \eta_{elVKWK}}{\eta_{elKW} \cdot \eta_{elVKW} \cdot \eta_{thKWK} \cdot \eta_{thVKWK}} + \frac{1}{\eta_{thZH} \cdot \eta_{thVZH}} - \frac{1}{\eta_{thKWK} \cdot \eta_{thVKWK}} \right) \cdot A + \left(\frac{1}{\eta_{thH} \cdot \eta_{thVH}} - \frac{1}{\eta_{thZH} \cdot \eta_{thVZH}} \right) \right] \cdot W_{th} \quad (15)$$

Da die PE-Einsparungen ΔW_{PE} proportional zu W_{th} sind, werden sie im Folgenden auf W_{th} bezogen:

$$\frac{\Delta W_{PE}}{W_{th}} = \left(\frac{\eta_{elKWK} \cdot \eta_{elVKWK}}{\eta_{elKW} \cdot \eta_{elVKW} \cdot \eta_{thKWK} \cdot \eta_{thVKWK}} + \frac{1}{\eta_{thZH} \cdot \eta_{thVZH}} - \frac{1}{\eta_{thKWK} \cdot \eta_{thVKWK}} \right) \cdot A + \left(\frac{1}{\eta_{thH} \cdot \eta_{thVH}} - \frac{1}{\eta_{thZH} \cdot \eta_{thVZH}} \right) \quad (16)$$

Vernachlässigt man sämtliche Verteilungsverluste, so folgt

$$\frac{\Delta W_{PE}}{W_{th}} = \left(\frac{\eta_{elKWK}}{\eta_{elKW} \cdot \eta_{thKWK}} + \frac{1}{\eta_{thZH}} - \frac{1}{\eta_{thKWK}} \right) \cdot A + \left(\frac{1}{\eta_{thH}} - \frac{1}{\eta_{thZH}} \right) \quad (17)$$

Die spezifischen PE-Einsparungen sind eine lineare Funktion von A. Der Achsenabschnitt der Geradengleichung ergibt sich aus dem Effizienzunterschied zwischen Heizung und Zusatzheizung, die Steigung aus den Nutzungsgraden von Kraftwerk, KWK-Anlage und Zusatzheizung. Bei gleichen Nutzungsgraden für Heizung und Zusatzheizung ($\eta_{thH} = \eta_{thZH}$) vereinfacht sich der Zusammenhang zu

$$\frac{\Delta W_{PE}}{W_{th}} = \left(\frac{\eta_{elKWK}}{\eta_{elKW} \cdot \eta_{thKWK}} + \frac{1}{\eta_{thZH}} - \frac{1}{\eta_{thKWK}} \right) \cdot A \quad (18)$$

Abb. 9 zeigt eine Auswertung von Gleichung (18).

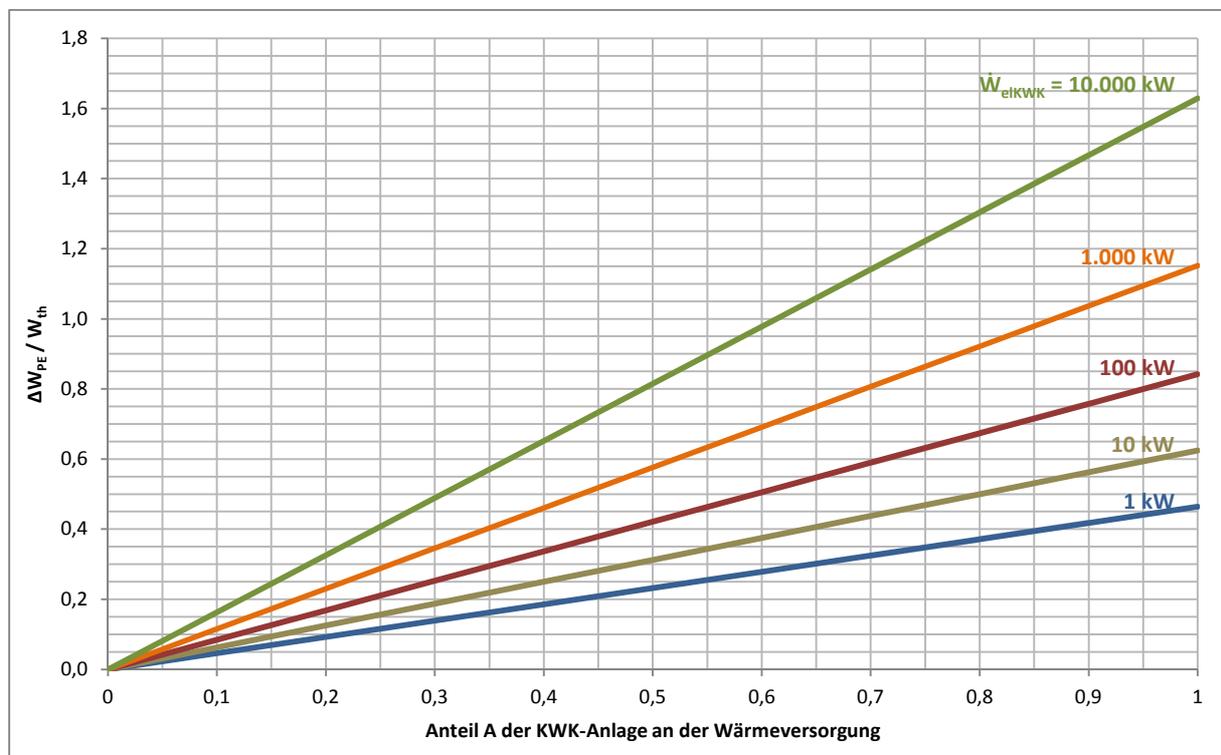


Abbildung 9: Spezifische Primärenergieeinsparungen durch KWK-Anlagen

In der folgenden Abb. 10 ist der Einfluss der Anlagengröße wesentlich deutlicher zu erkennen. Bezieht man die PE-Einsparungen auf die insgesamt zur Verfügung gestellte Wärme (KWK + ZH), so verringern sich die Werte um den Faktor A. Die entsprechenden Werte können durch lineare Interpolation zwischen der Kurve und der Nulllinie unmittelbar aus dem Diagramm abgeschätzt werden.

In dem Diagramm sind zusätzlich die PE-Einsparungen auf die erzeugte elektrische Energie bezogen dargestellt. Diese berechnen sich, wie aus Gleichung (13) (für $\eta_{elVKWK} = 1$ und $\eta_{thVKWK} = 1$) und (18) folgt, unabhängig vom Anteil A zu

$$\frac{\Delta W_{PE}}{W_{elKWK}} = \frac{1}{\eta_{elKW}} + \frac{\eta_{thKWK}}{(\eta_{elKWK} \cdot \eta_{thZH})} - \frac{1}{\eta_{elKWK}} \quad (19)$$

Aus Abb. 10 können die beiden folgenden orientierenden Abschätzungen für eine Referenzstromerzeugung mit $\eta_{elKW} = 0,4$ gewonnen werden:

Jede in KWK erzeugte MWh_{th} spart den Einsatz von 0,5 bis 1,6 MWh_{PE}.

Jede in KWK erzeugte MWh_{el} spart den Einsatz von 1,2 bis 1,5 MWh_{PE}.

Die Einflüsse der Verteilungsverluste (Strom bzw. Wärme), insbesondere aber der dominierende Einfluss der Referenzstromerzeugung (η_{elKW}), werden später noch näher untersucht.

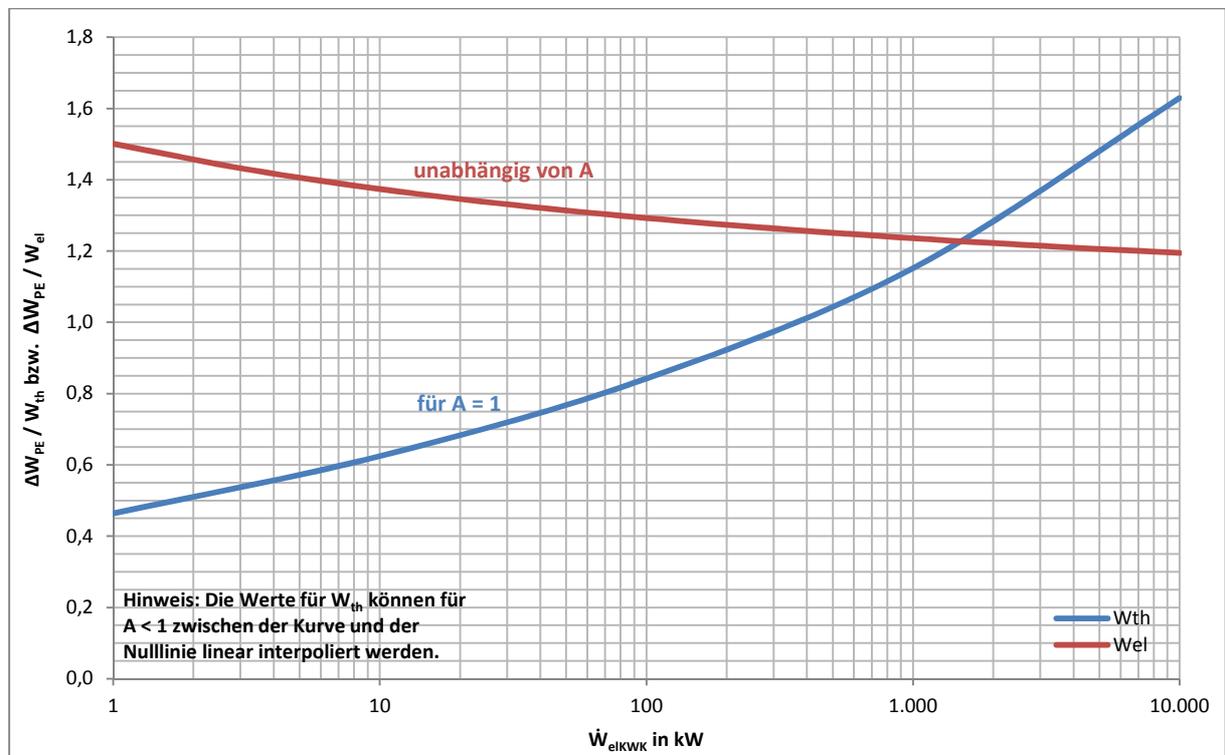


Abbildung 10: Primärenergieeinsparungen bezogen auf die Strom- bzw. Wärmeerzeugung

In Abb. 11 ist dargestellt, wie groß die jährlich erzeugte Wärmemenge und die daraus resultierenden PE-Einsparungen einzelner Anlagen sind. Den Berechnungen wurde ein Anteil $A = 1$ und eine jährliche Vollbenutzungsdauer von $VBD_{KWK} = 5000$ h zugrunde gelegt. Aus der Vollbenutzungsdauer und der elektrischen Leistung der KWK-Anlagen berechnet sich die jährlich erzeugte Wärmemenge wie folgt:

$$W_{th} = \frac{\eta_{thKWK} \cdot \dot{W}_{elKWK}}{\eta_{elKWK}} \cdot 5000 \text{ h} \quad \text{für } A = 1 \quad (20)$$

Die dargestellten jährlichen PE-Einsparungen ergeben sich aus den Gleichungen (18) und (20). Für $A < 1$ vergrößert sich die insgesamt erzeugte Wärmemenge (KWK + ZH) um den Faktor $1/A$, die PE-Einsparungen sind davon unabhängig.

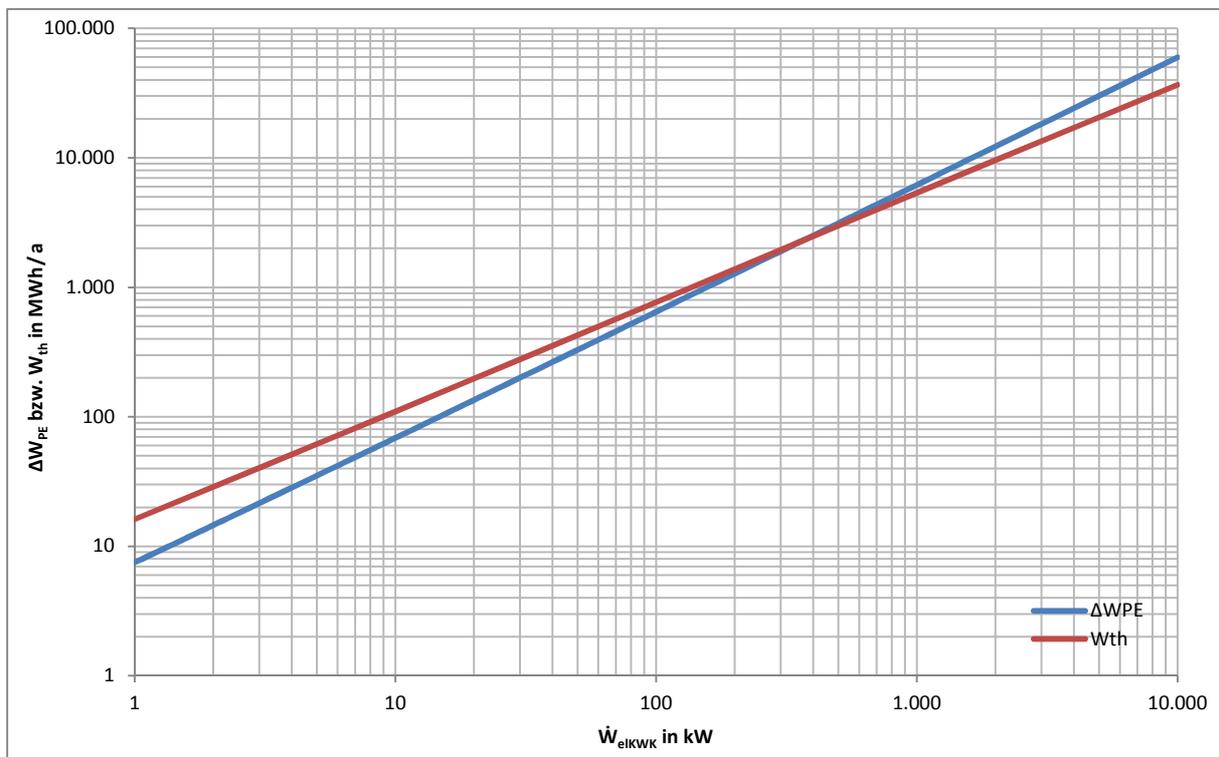


Abbildung 11: Jährliche PE-Einsparungen und Wärmemengen einer KWK-Anlage für $A = 1$ und $VBD_{KWK} = 5000$ h

In Abb. 12 ist die erforderliche Anzahl an KWK-Anlagen ($A = 1$, $VBD_{KWK} = 5000$ h) für die Erzeugung von $W_{th} = 10$ TWh (entsprechend 1 Mio. Wohneinheiten mit einem spezifischen Wärmebedarf von $100 \text{ kWh/m}^2 \text{ a}$) dargestellt. Für $A < 1$ verringert sich die Anzahl der KWK-Anlagen um den Faktor A , da der Komplementäranteil $1 - A$ durch die Zusatzheizung bereitgestellt wird.

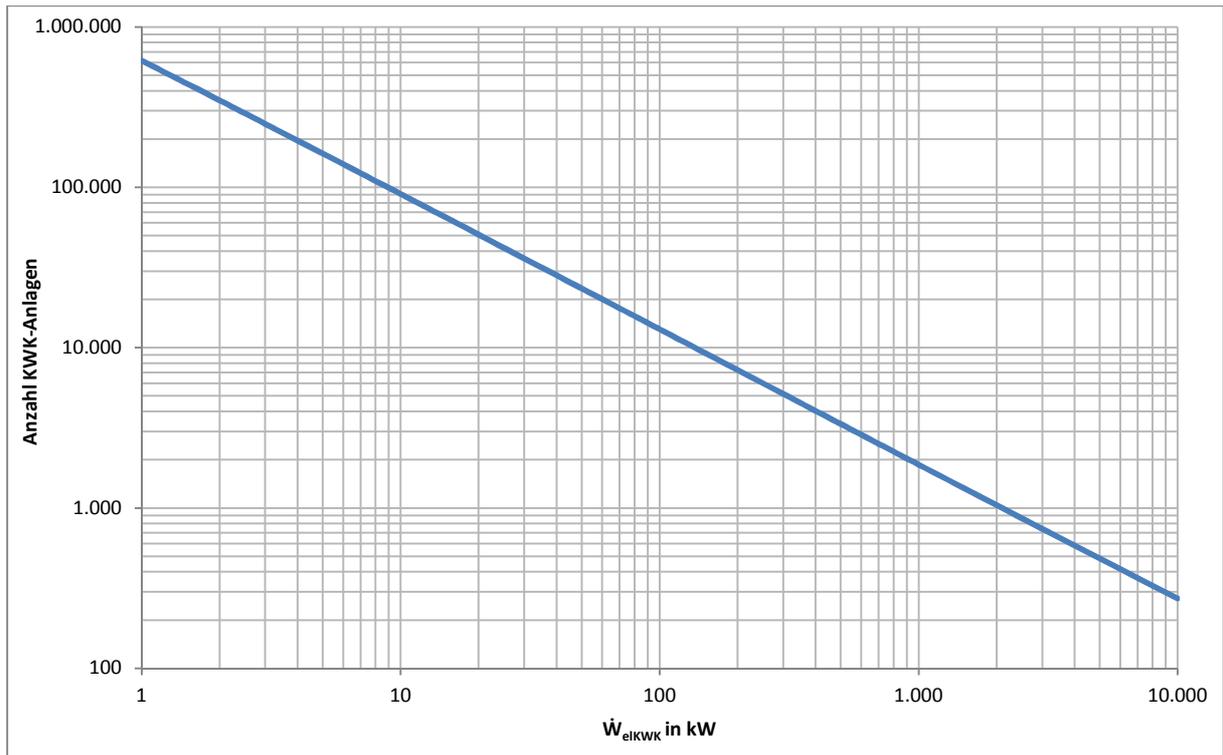


Abbildung 12: Anzahl der für einen Wärmebedarf von $W_{th} = 10$ TWh benötigten KWK-Anlagen für $A = 1$

Abb. 13 zeigt, wie viele Wohneinheiten mit einem jährlichen Wärmebedarf von 10 MWh (100 m^2 , $100 \text{ kWh/m}^2 \text{ a}$) von einer KWK-Anlage versorgt werden können. Für $A < 1$ erhöht sich die Anzahl der Wohneinheiten um den Faktor $1/A$.

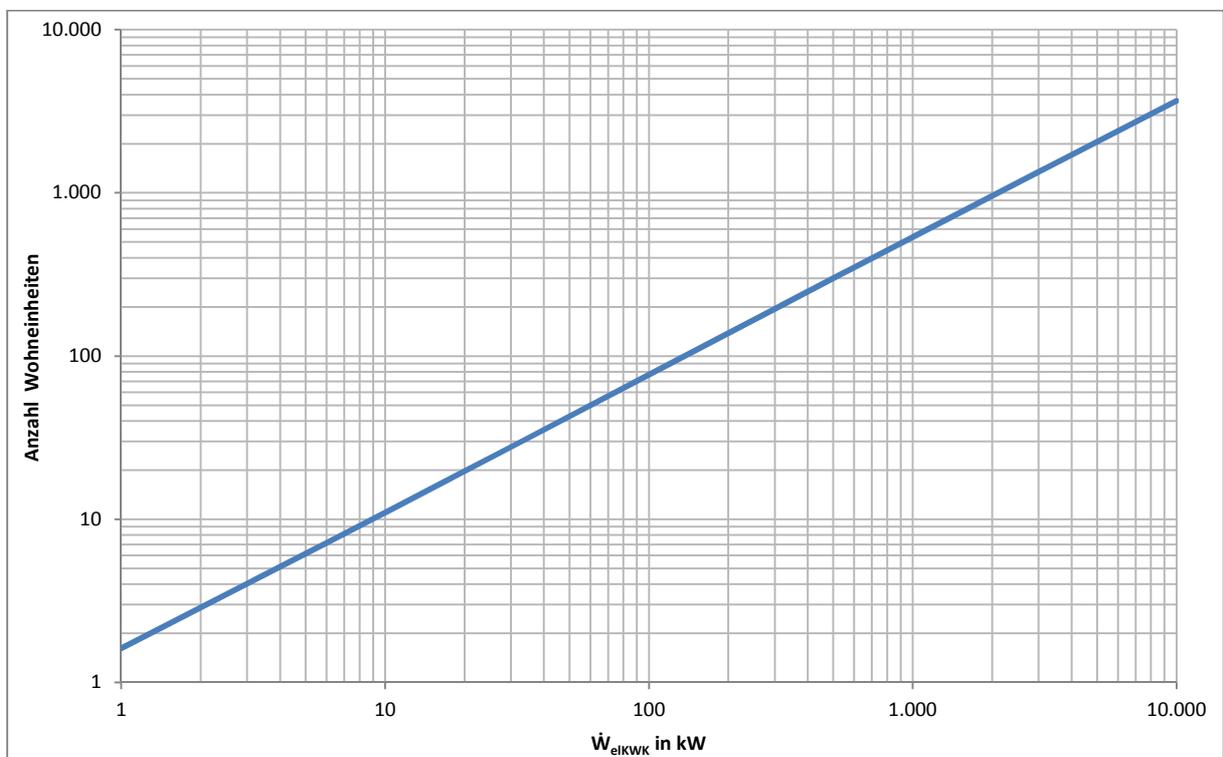


Abbildung 13: Anzahl der Wohneinheiten mit $W_{th} = 10$ MWh die von einer KWK-Anlage versorgt werden können

Durch den Einsatz einer KWK-Anlage entsteht zunächst ein Mehrbedarf an Primärenergie (W_{PE+}) gegenüber einer normalen Heizung, da der thermische Nutzungsgrad einer KWK-Anlage immer kleiner als der einer normalen Heizung ist.

$$W_{PE+} = W_{PEKW} + W_{PEZH} - W_{PEH} \quad (21)$$

Mit diesem Mehreinsatz an Primärenergie wird aber gleichzeitig Strom erzeugt, wodurch Primärenergie bei der Stromerzeugung in Kraftwerken eingespart wird. In der Regel ist der PE-Mehrbedarf kleiner als die Einsparung im Kraftwerk, so dass insgesamt betrachtet Primärenergie eingespart wird.

$$\Delta W_{PE} = W_{PEKW} - W_{PE+} \quad (22)$$

Bei gleichen Nutzungsgraden für Zusatzheizung und Heizung und Vernachlässigung sämtlicher Verteilungsverluste ergibt sich für den PE-Mehrbedarf der folgende einfache Zusammenhang:

$$W_{PE+} = W_{th} \cdot A \cdot \left(\frac{1}{\eta_{thKWK}} - \frac{1}{\eta_{thZH}} \right) \quad (23)$$

In Abb. 14 sind der PE-Mehrbedarf W_{PE+} , die im Kraftwerk eingesparte Primärenergie W_{PEKW} sowie die daraus resultierende PE-Einsparung ΔW_{PE} , jeweils bezogen auf W_{th} für $A = 1$ dargestellt. Da alle Größen proportional zu A sind, können aus dem Diagramm auch Werte für beliebige Anteile $A < 1$ ermittelt werden.

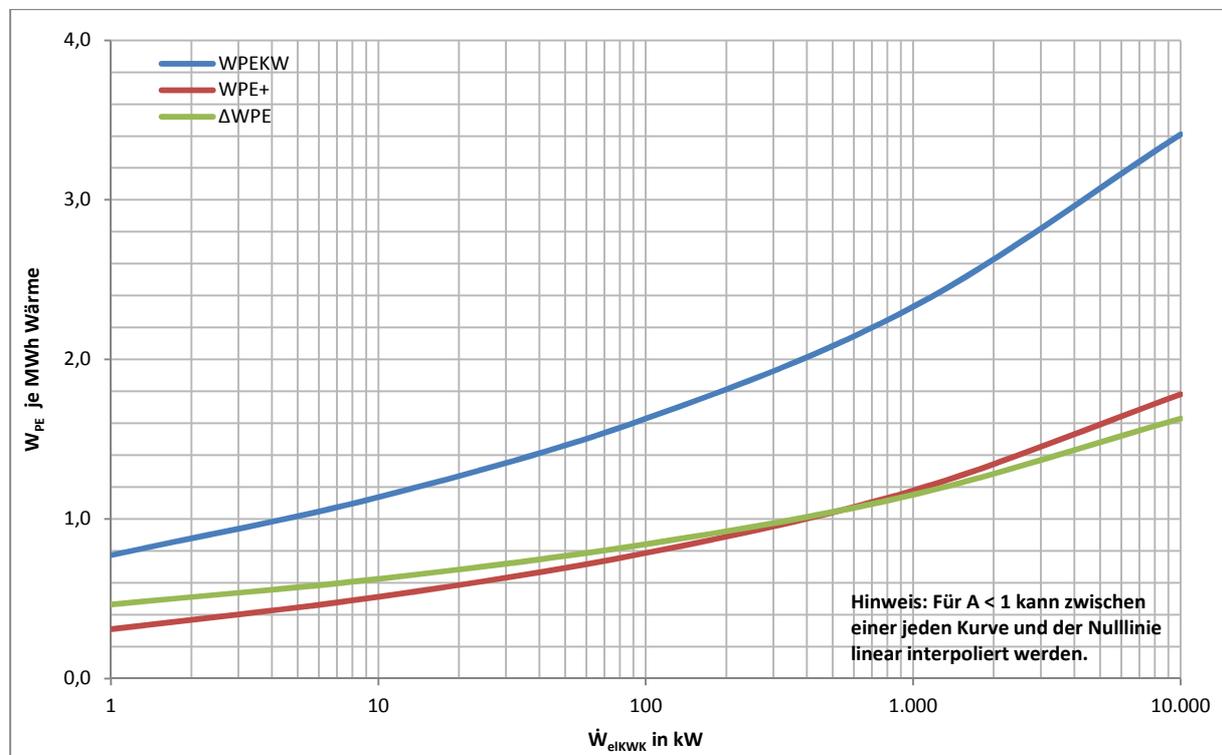


Abbildung 14: PE-Mehrbedarf der KWK-Anlage, PE-Einsparung im Kraftwerk und die tatsächliche PE-Einsparung

Bildet man das Verhältnis zwischen der im Kraftwerk eingesparten Primärenergie und dem PE-Mehrbedarf einer KWK-Anlage mit Zusatzheizung gegenüber einer normalen Heizung (W_{PEKW}/W_{PE+}), siehe Abb. 15, so ergibt sich, dass jede zusätzliche in KWK investierte MWh Primärenergie durchschnittlich etwas mehr als zwei MWh Primärenergie in Kraftwerken einspart. Diese Aussage ist unabhängig vom Anteil A und unabhängig von der insgesamt erzeugten Wärmemenge W_{th} , da sich beide Größen bei der Verhältnisbildung gegeneinander kürzen.

Dass die Werte mit zunehmender Anlagengröße abnehmen liegt darin begründet, dass die thermischen Nutzungsgrade stärker abnehmen als die elektrischen Nutzungsgrade ansteigen, wodurch der Mehrbedarf relativ stärker zunimmt als die eingesparte Primärenergie in Kraftwerken.

Jede MWh_{PE} Mehrbedarf einer KWK gegenüber einer Heizung spart den Einsatz von 1,9 bis 2,5 MWh_{PE} in Kraftwerken (bei $\eta_{elKW} = 0,4$).

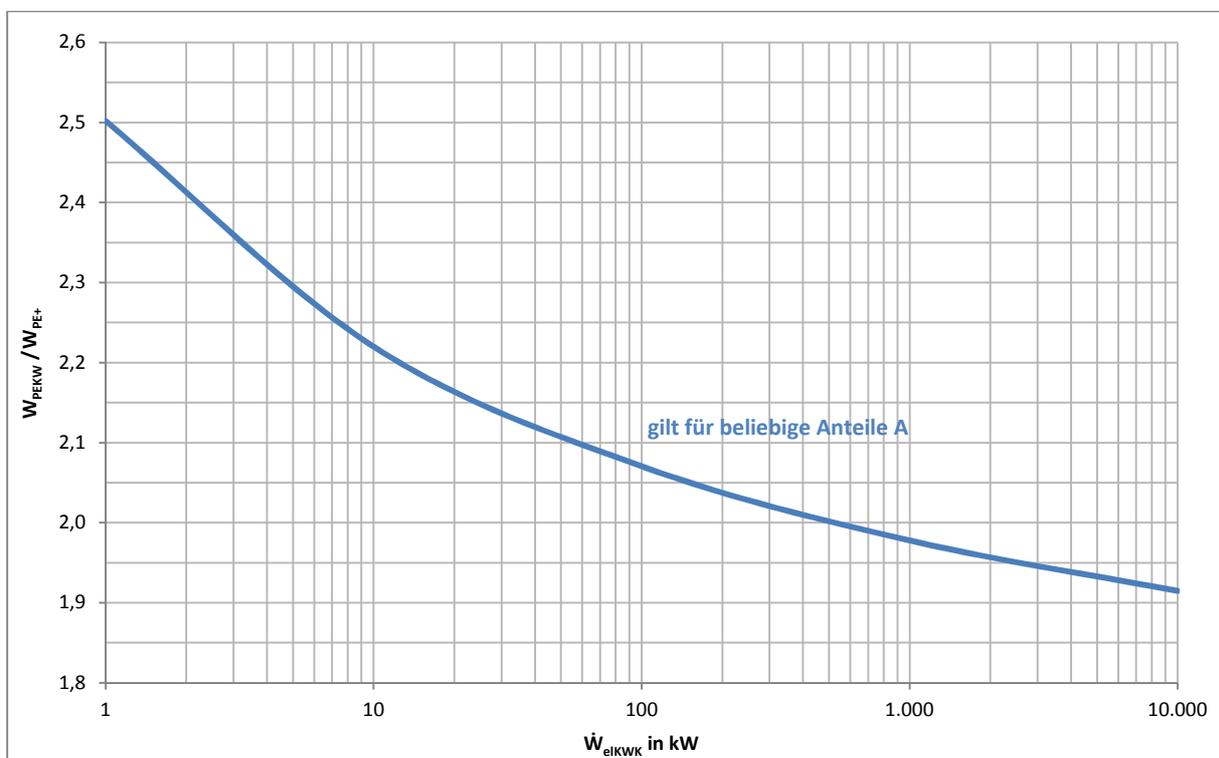


Abbildung 15: PE-Einsparung im Kraftwerk ($\eta_{elKW} = 0,4$) im Verhältnis zum PE-Mehrbedarf der KWK-Anlage

Eine weitere interessante Aussage ist, wie viel mehr Strom die gekoppelte gegenüber der getrennten Erzeugung von Strom und Wärme bei gleichem PE-Einsatz generiert. Bei dieser Betrachtung wird also mit beiden Systemen gleich viel Wärme bereitgestellt, für das Kraftwerk steht aber nur der PE-Mehrbedarf des KWK-Systems gegenüber einer normalen Heizung zur Verfügung. Die zusätzlich erzeugte Strommenge ergibt dann (wieder für $\eta_{thH} = \eta_{thZH}$ und unter Vernachlässigung sämtlicher Verteilungsverluste):

$$W_{el+} = W_{elKWK} - \eta_{elKW} \cdot W_{PE+} = \left(\frac{\eta_{elKWK}}{\eta_{thKWK}} - \left(\frac{\eta_{elKW}}{\eta_{thKWK}} - \frac{\eta_{elKW}}{\eta_{thZH}} \right) \right) \cdot A \cdot W_{th} \quad (24)$$

Die Abbildungen 16 und 17 stellen die zusätzlich erzeugte Strommenge bezogen auf W_{th} dar.

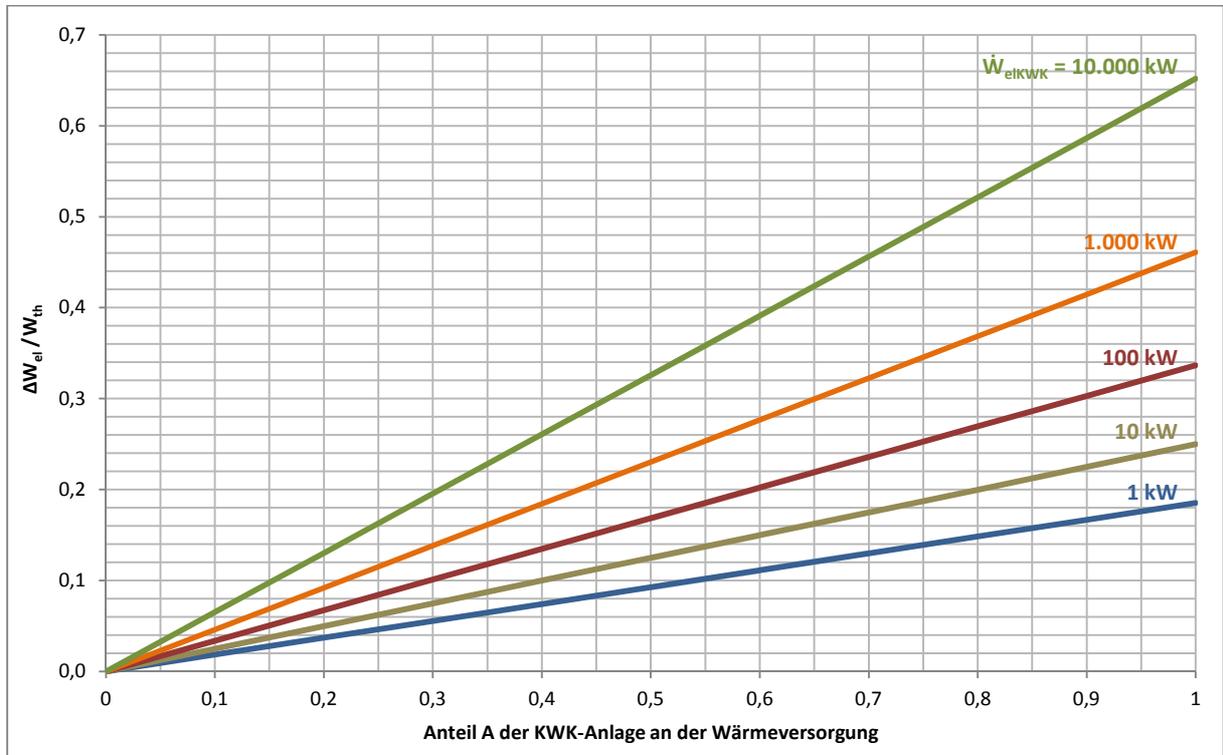


Abbildung 16: Zusätzliche Stromerzeugung durch KWK-Anlagen bei gleichem Gesamt-PE-Einsatz

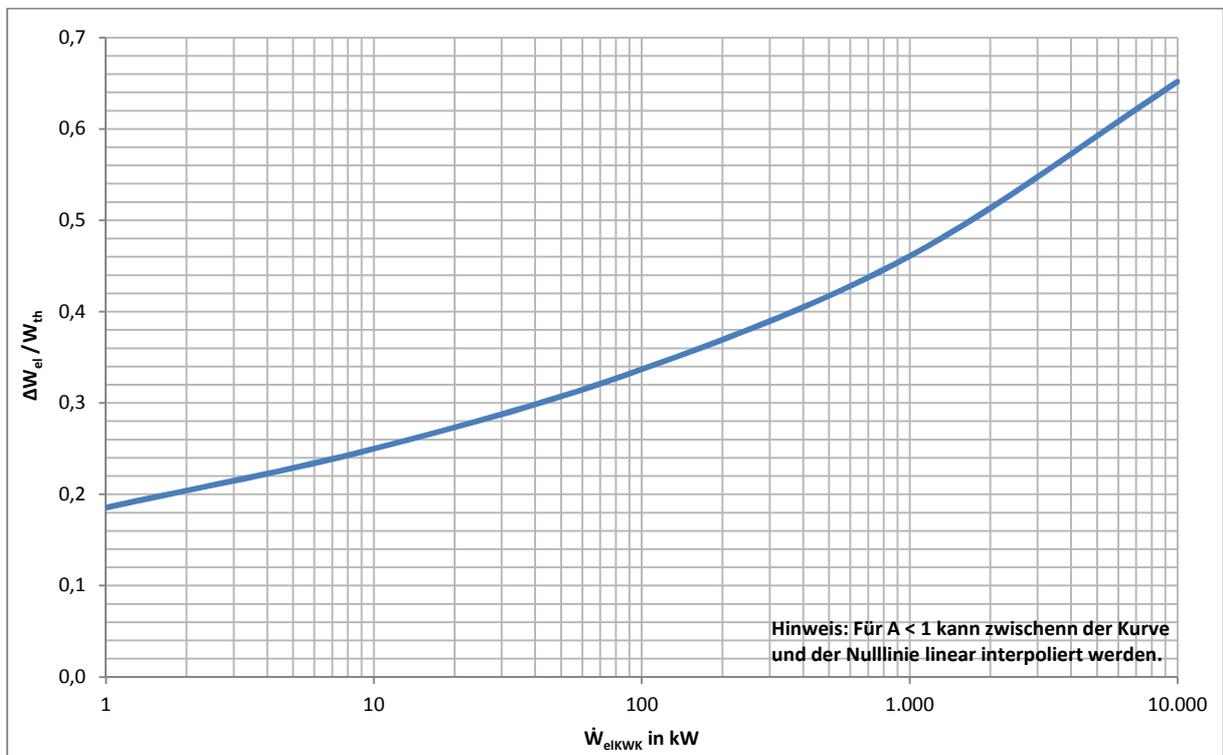


Abbildung 17: Zusätzliche Stromerzeugung durch KWK-Anlagen bei gleichem Gesamt-PE-Einsatz für $A = 1$

Aus Abb. 17 ist zu entnehmen, dass für jede in einer KWK-Anlage erzeugte MWh Wärme je nach Anlagengröße zusätzlich 0,2 bis 0,6 MWh elektrische Energie erzeugt werden können, ohne den Primärenergieverbrauch zu erhöhen. Auf die Gesamtwärme bezogen verringern sich die Werte entsprechend dem Anteil A.

KWK generiert bei gleichem PE-Einsatz je MWh_{th} 0,2 bis 0,6 MWh_{el} mehr Strom als ein Kraftwerk mit $\eta_{elKW} = 0,4$.

4.1 Einfluss von Verteilungsverlusten

In den bisherigen Berechnungen wurden Verteilungsverluste für Strom und Wärme nicht berücksichtigt.

Die Abbildungen 18 und 19 zeigen den Einfluss der Stromverteilungsverluste auf die PE-Einsparungen. Hierfür ist das Verhältnis $\eta_{elVKWK}/\eta_{elVKW}$ entscheidend. Vereinfachend wurden die Verteilungsverluste des dezentral erzeugten KWK-Stroms vernachlässigt (0%, entsprechend $\eta_{elVKWK} = 1$) und die Verteilungsverluste der Referenzstromerzeugung zwischen 0 und 10% (entsprechend $1 > \eta_{VKW} > 0,9$) variiert. Dennoch kann prinzipiell auch der Einfluss von KWK-Stromverteilungsverlusten mit hoher Genauigkeit abgeschätzt werden, indem man die Differenz der Prozentwerte von KWK und KW bildet. 10% Verteilungsverluste für KW und 5% für KWK ergeben nahezu das gleiche Ergebnis wie 5% für KW und 0% für KWK.

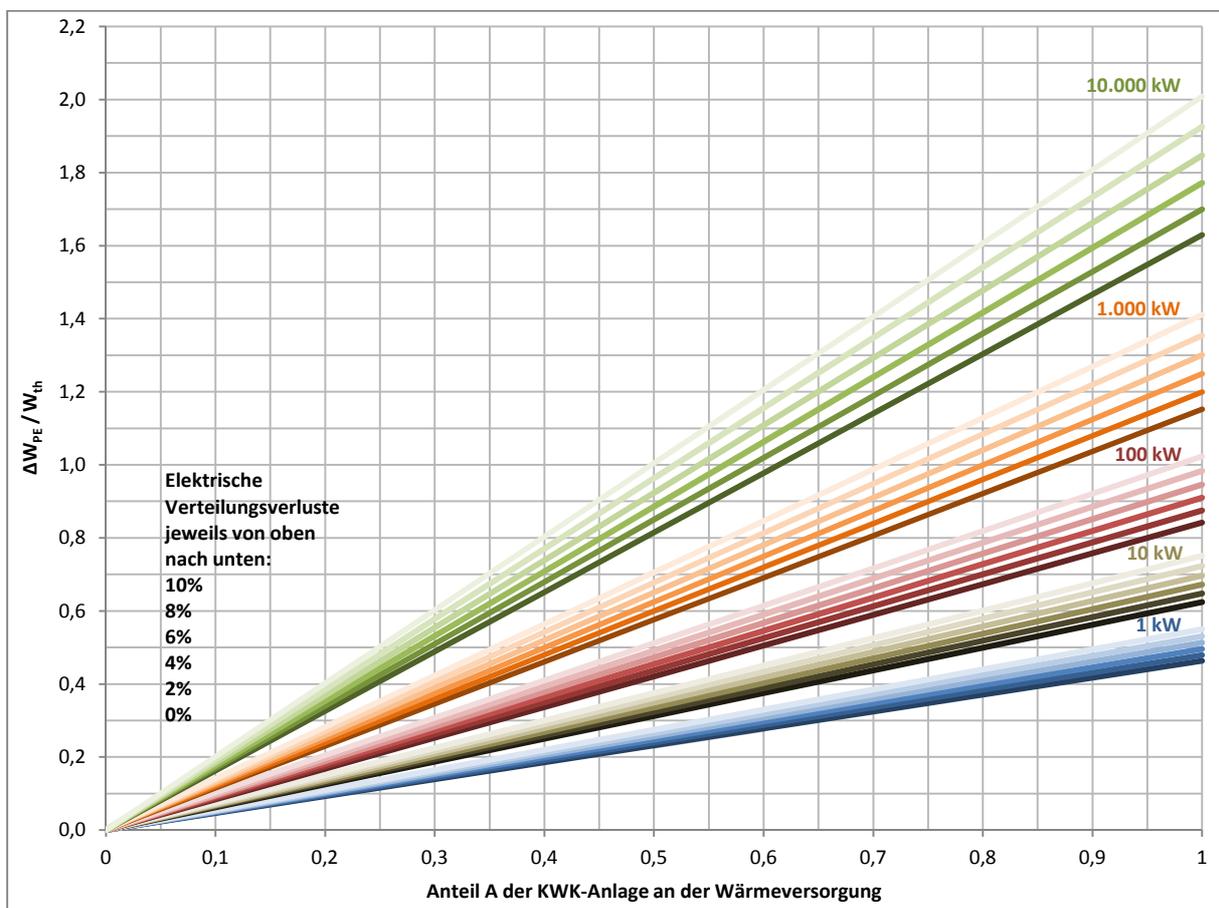


Abbildung 18: Einfluss der Stromverteilungsverluste auf die Primärenergieeinsparungen

Die beiden Darstellungen vermitteln einen Eindruck, wie viel Primärenergie dezentrale KWK-Systeme zusätzlich einsparen, wenn man die Übertragungsverluste zentraler Stromerzeugung mit einbezieht. In der Bundesrepublik Deutschland betragen diese ca 4 %, in anderen Ländern sind sie z.T. erheblich größer [9]. Aus Abb. 19 ergibt sich die folgende Abschätzung:

1 % mehr Verteilungsverluste auf Seiten der normalen Stromerzeugung erhöhen die Primärenergieeinsparungen durch KWK um ca. 2 %.

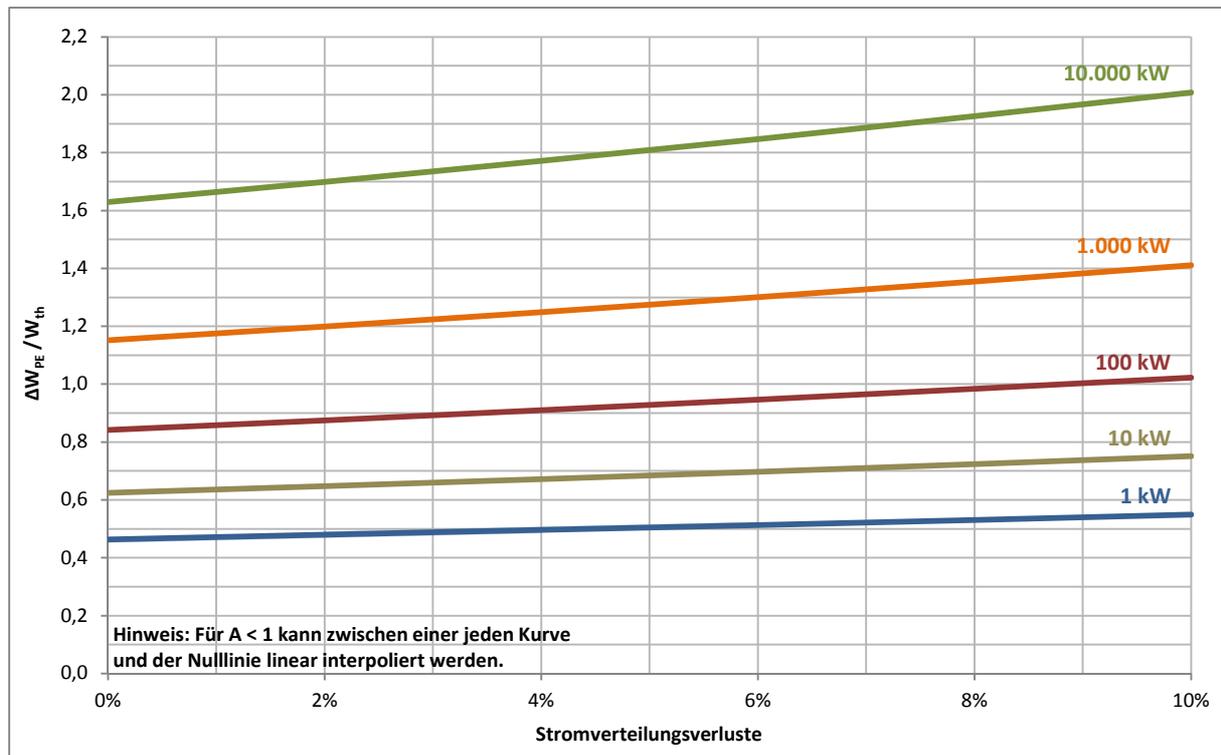


Abbildung 19: Einfluss der Stromverteilungsverluste auf die Primärenergieeinsparungen für A = 1

Die folgenden Abbildungen 20, 21 und 22 zeigen den Einfluss der thermischen Verteilungsverluste auf die PE-Einsparungen. Vereinfachend wurden die Verteilungsverluste der Referenzwärmeerzeugung vernachlässigt (0%, entsprechend $\eta_{thVH} = 1$) und die thermischen Verteilungsverluste der KWK und der Zusatzheizung zwischen 0 und 20% (entsprechend $1 > \eta_{thKWK} = \eta_{thVZH} > 0,8$) variiert. D.h. die thermischen Verteilungsverluste wurden für die KWK und die Zusatzheizung immer gleich gewählt, da sie in das gleiche Verteilungssystem einspeisen und in der Regel direkt nebeneinander stehen. In Fernwärmenetzen der Bundesrepublik Deutschland betragen die Wärmeverteilungsverluste in etwa 8 bis 10%, in Nahwärmenetzen liegen sie deutlich darunter [10].

Aus Abb. 20 wird ersichtlich, dass ein Mindestanteil von A nötig ist, um vor allem bei sehr kleinen KWK-Anlagen PE-Einsparungen zu erzielen. Allerdings erzielen bei üblichen Anteilen A zwischen 0,6 und 0,8 KWK-Anlagen jeder dargestellten Größe PE-Einsparungen. Weiterhin zeigt die Abbildung, dass mit wachsenden Anteilen A der Einfluss der thermischen

Verteilungsverluste abnimmt. Dieser Effekt geht soweit, dass sich die Geraden einer KWK-Anlage in dem Punkt $1/\eta_{thH}$ treffen und die negativen Auswirkungen der thermischen Verteilungsverluste auf einmal eine positive Auswirkung auf die PE-Einsparungen haben. Zu beobachten ist dies bei den großen KWK-Anlagen mit 1.000 kW oder 10.000 kW Leistung, für die kleineren Anlagen liegen die Schnittpunkte bei Anteilen $A > 1$, sind also in der Realität nicht erreichbar. Bei den Anlagen mit 1.000 kW und 10.000 kW ist $\eta_{elKWK} > \eta_{elKW}$. Die zur Deckung der Verteilungsverluste zusätzlich benötigte Primärenergie erzeugt zusätzlich Strom, für dessen Erzeugung die Referenzstromerzeugung aber mehr zusätzliche Primärenergie benötigt.

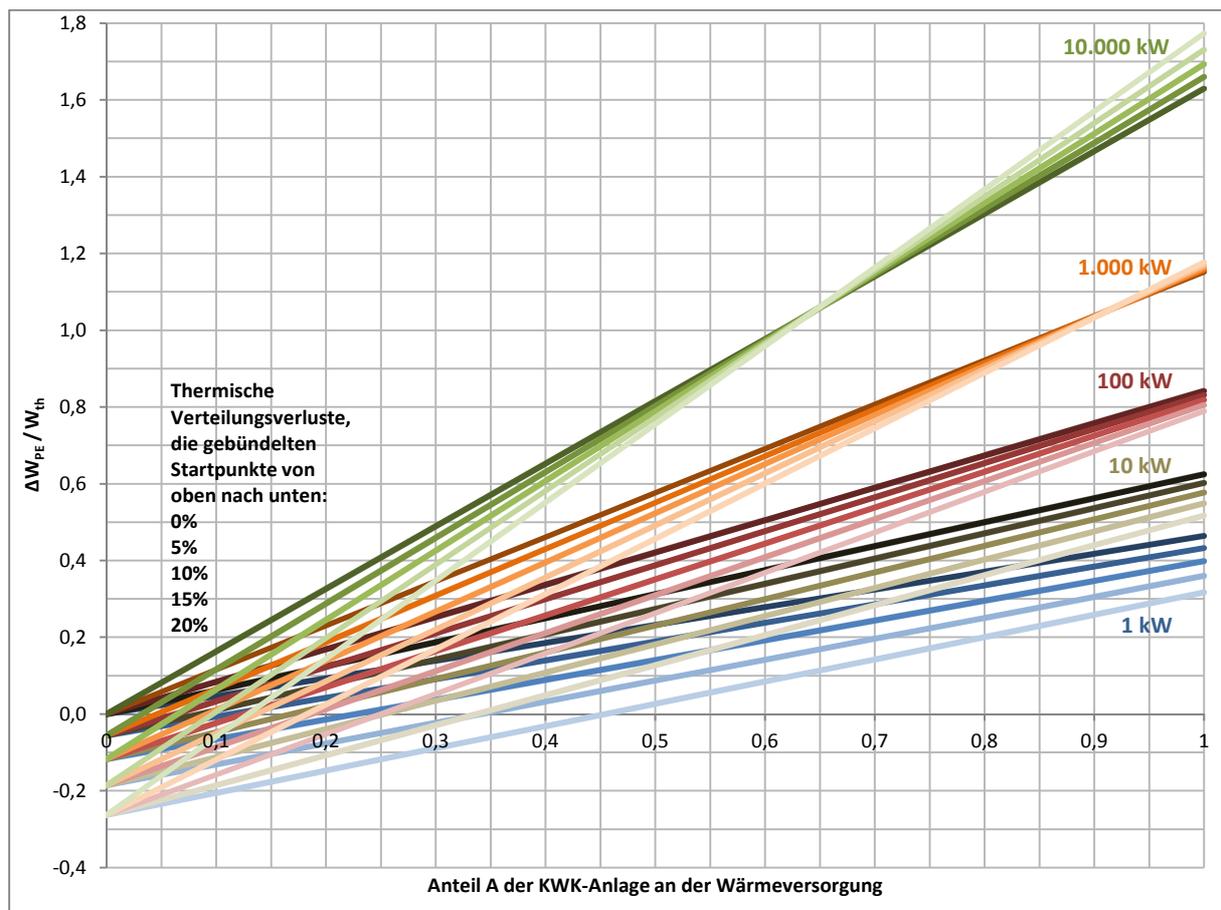


Abbildung 20: Einfluss thermischer Verteilungsverluste auf die Primärenergieeinsparungen

Prinzipiell können die PE-Einsparungen auch als Funktion der elektrischen Leistung dargestellt werden (s. Abb. 21). Dabei zeigt sich allerdings, dass der Einfluss des Anteils A nur grob durch Interpolation abgeschätzt werden kann.

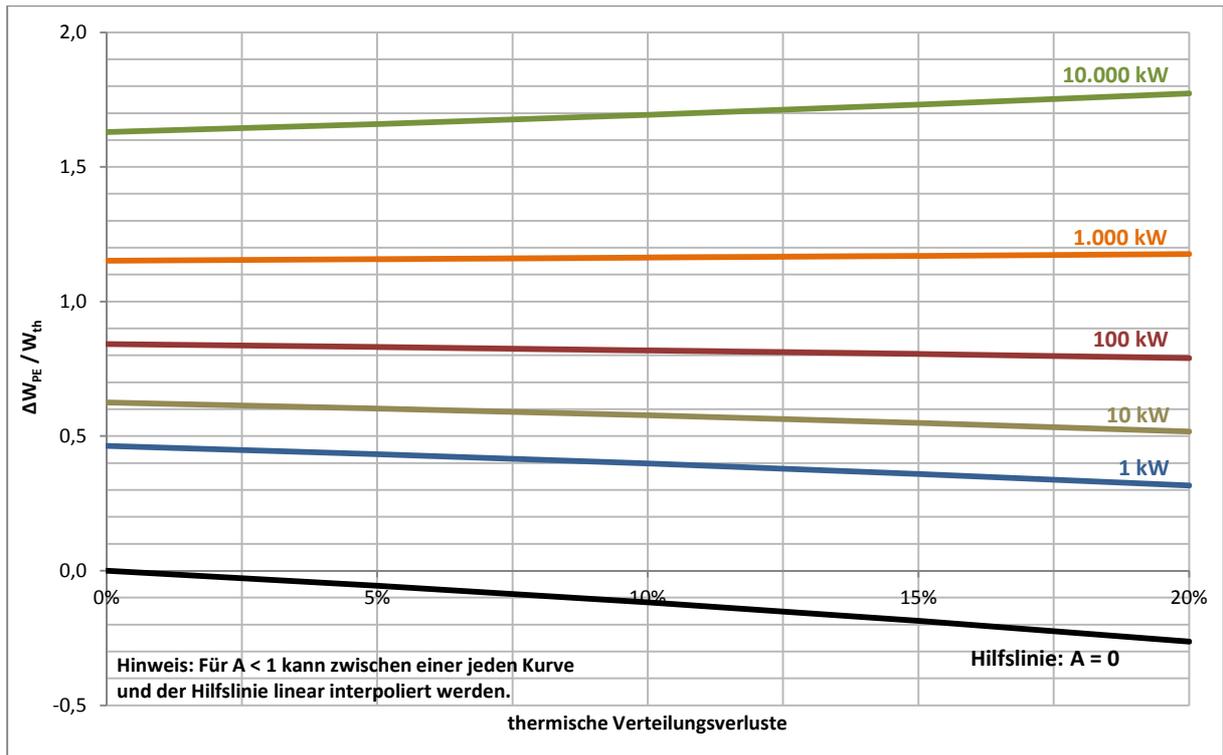


Abbildung 21: Einfluss thermischer Verteilungsverluste auf die Primärenergieeinsparungen für $A = 1$

Aus diesem Grund wird eine zusätzliche Darstellung (s. Abb. 22) für einen Wert $A = 0,75$ präsentiert, um den Effekt der thermischen Verteilungsverluste besser einschätzen zu können.

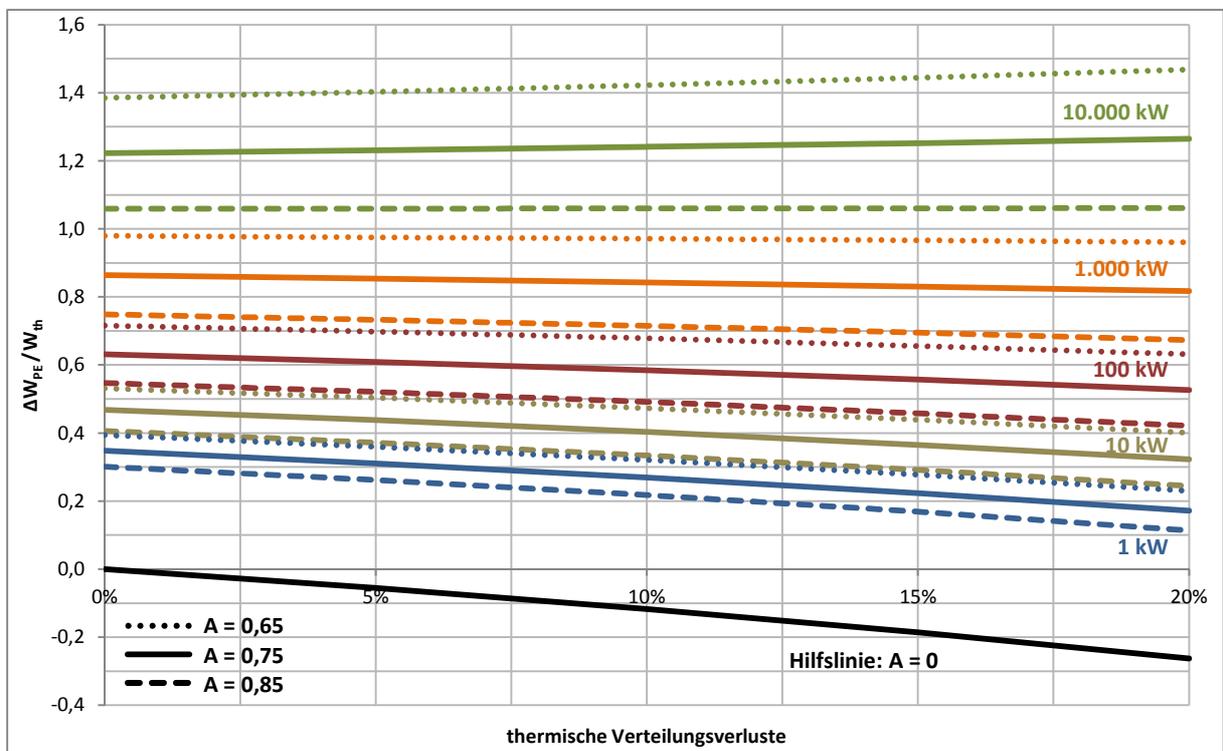


Abbildung 22: Einfluss thermischer Verteilungsverluste und des Anteils A auf die PE-Einsparungen

Daraus wird ersichtlich, dass der Einfluss bei großen Anlagen äußerst gering ist. Bei sehr kleinen Anlagen (1 kW und 10 kW) dagegen verringern sich die PE-Einsparungen deutlich mit zunehmenden thermischen Verteilungsverlusten. Allerdings sind gerade bei diesen kleinen Anlagen keine nennenswerten Verluste zu erwarten. Insgesamt betrachtet kann also festgestellt werden, dass thermische Verteilungsverluste keine bedeutende Rolle spielen. Alle zuvor unter Vernachlässigung sämtlicher Verteilungsverluste präsentierten Ergebnisse sind demzufolge keineswegs zu optimistisch, sondern eher pessimistisch, da die höheren elektrischen Verteilungsverluste der Referenzstromerzeugung KWK begünstigen.

4.2 Einfluss der Referenzstromerzeugung

Im Folgenden wird der Einfluss der Referenzstromerzeugung näher untersucht. Je höher deren elektrischer Nutzungsgrad ist, umso mehr schwindet der Vorteil der Kraft-Wärme-Kopplung. Dennoch erweisen sich KWK-Anlagen selbst gegenüber einer modernen GuD-Anlage mit $\eta_{elKW} = 0,6$ noch als vorteilhaft (s. Abb. 23, vergl. auch Abb. 10).

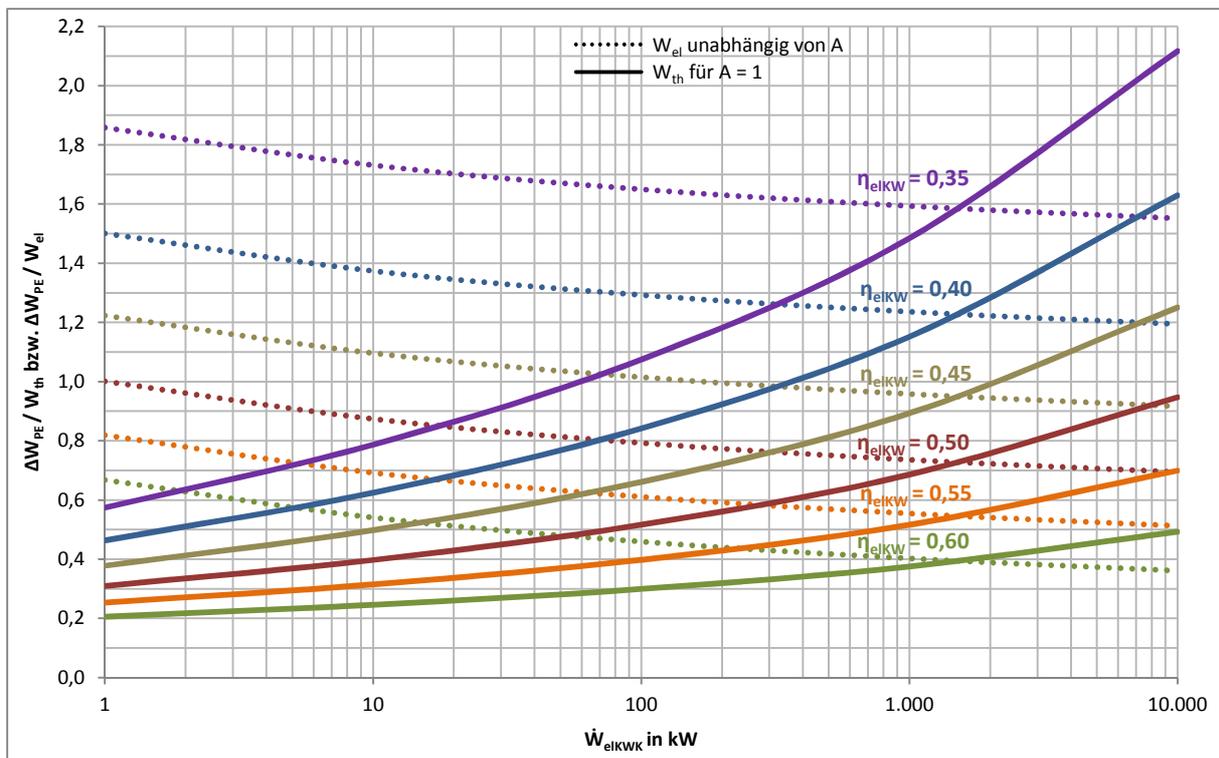


Abbildung 23: Einfluss der Referenzstromerzeugung auf die PE-Einsparungen (strom- und wärmebezogen)

Abb. 24 stellt den gleichen Sachverhalt wie Abb. 23 dar, Argumente und Parameterwerte sind lediglich vertauscht.

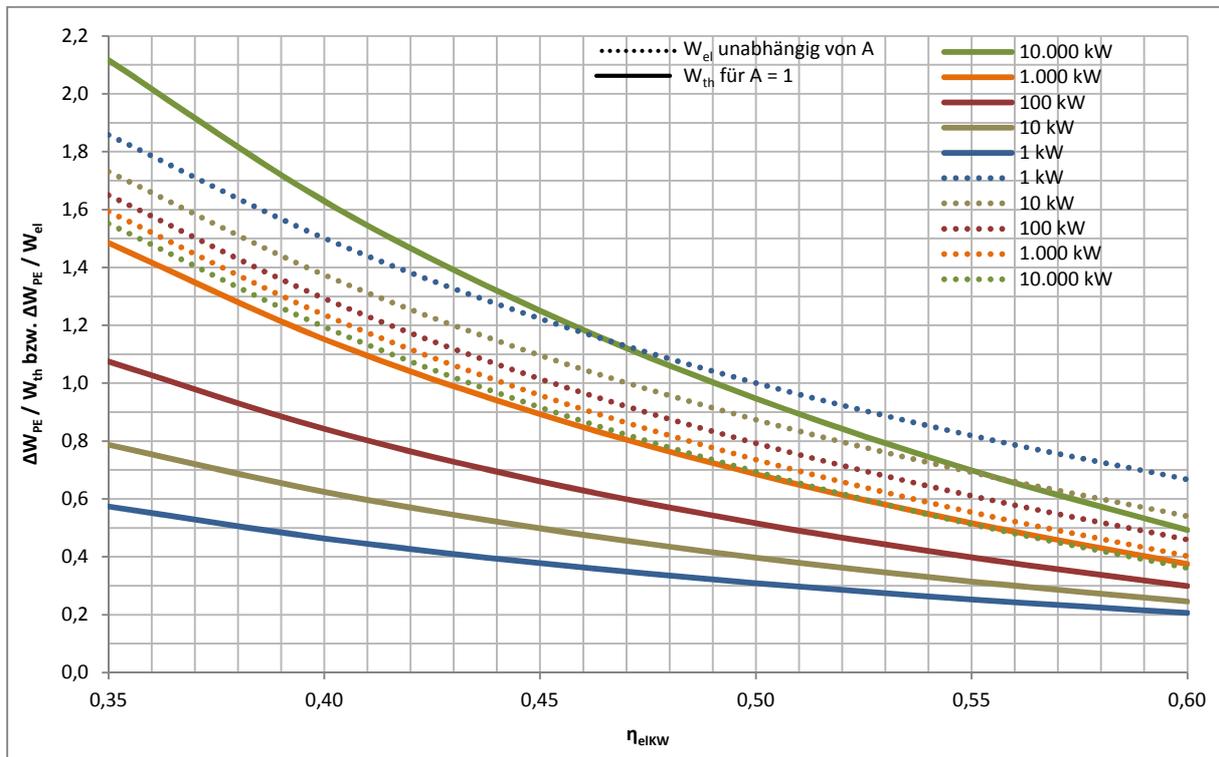


Abbildung 24: Einfluss der Referenzstromerzeugung auf die PE-Einsparungen (strom- und wärmebezogen)

Aus der folgenden Abb. 25 (vergl. auch Abb. 15) kann für elektrische Nutzungsgrade der Referenzstromerzeugung im Bereich von $0,4 < \eta_{elKW} < 0,5$ folgende Aussage getroffen werden:

Jede zusätzlich – gegenüber einer normalen Erdgasheizung – in KWK investierte MWh Erdgas kann den Einsatz von 1,5 bis 2,5 MWh Kohle in Großkraftwerken substituieren bzw. die Substitution von einer MWh Kohle erfordert den Einsatz von 0,4 bis 0,65 MWh Erdgas in KWK.

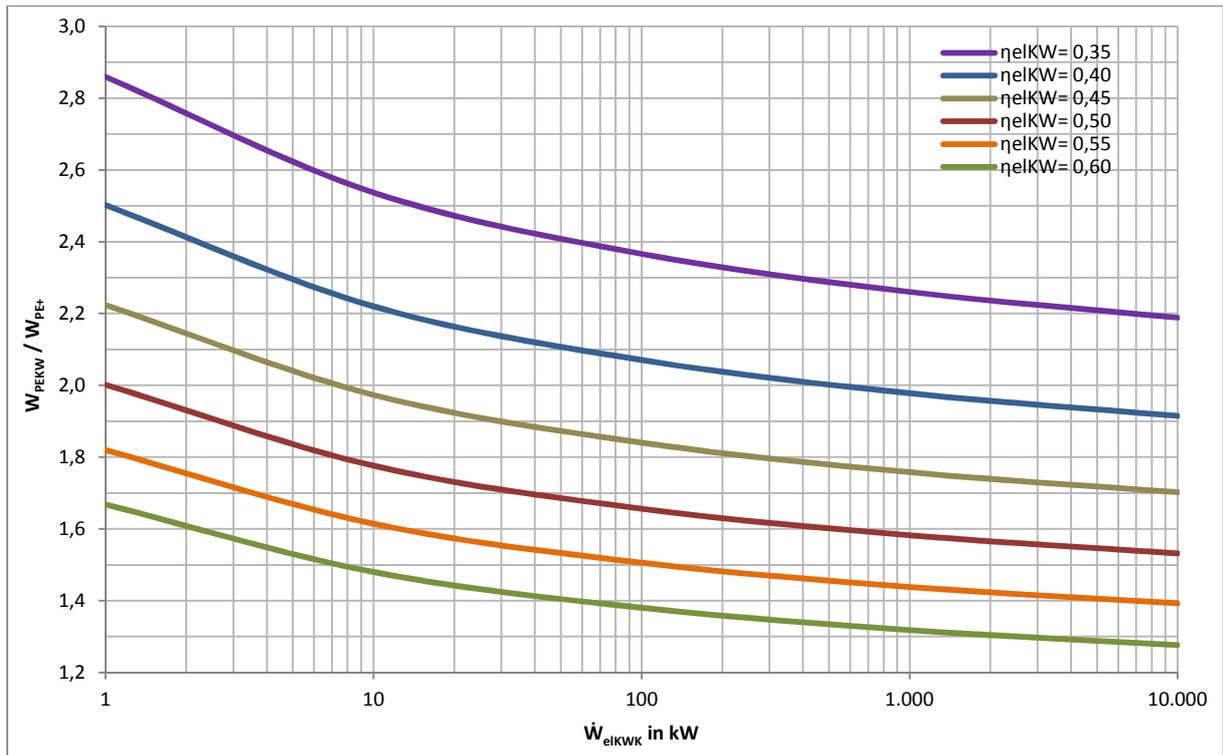


Abbildung 25: Primärenergieeinsparung im Kraftwerk pro MWh PE-Mehrbedarf der KWK-Anlage ($A = 1$)

Wie in Abb. 17 gezeigt, erzeugt KWK bei gleichem Gesamt-PE-Einsatz 0,2 bis 0,6 MWh mehr Strom je MWh Wärme als Kraftwerke mit $\eta_{elKW} = 0,4$. Mit zunehmendem elektrischen Nutzungsgrad der Referenzstromerzeugung verringert sich dieser Effekt (s. Abb. 26). Gegenüber einer modernen GuD-Anlage mit $\eta_{elKW} = 0,6$ sind es nur 0,1 bis 0,3 MWh_{el}/MWh_{th} .

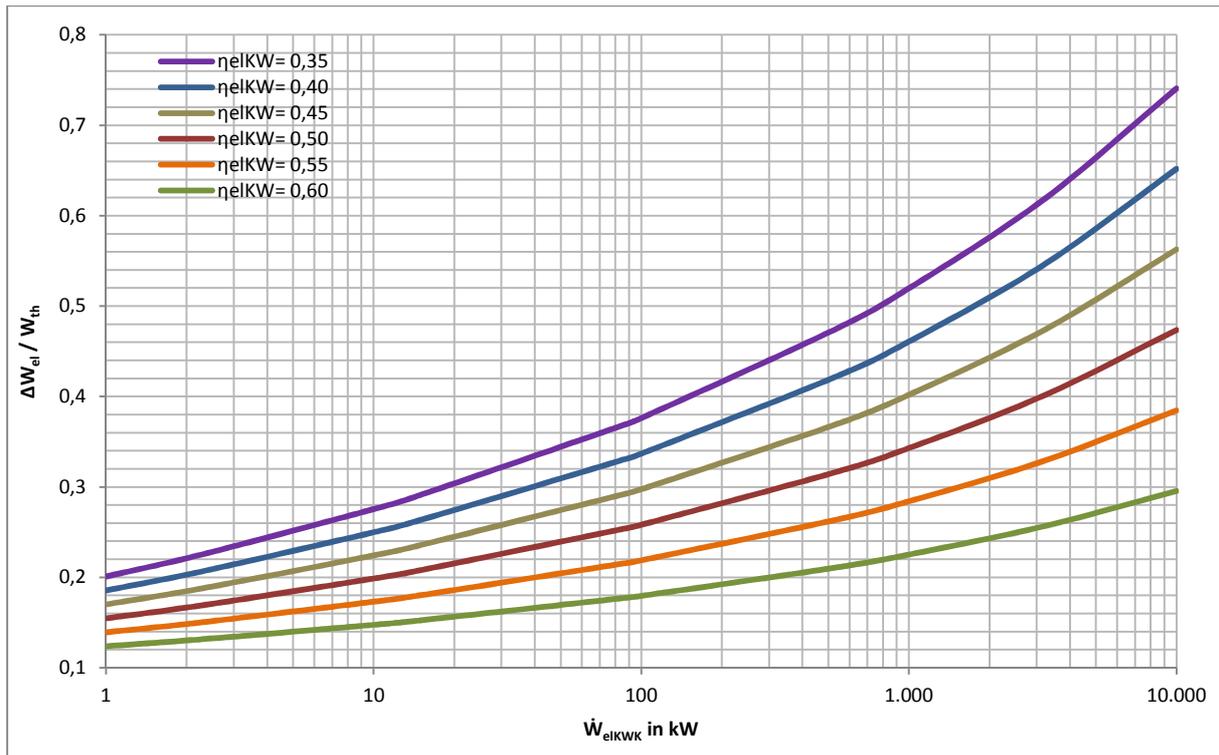


Abbildung 26: Zusätzliche Stromerzeugung durch KWK bei gleichem Gesamt-PE-Einsatz für $A = 1$

Abschließend zum Thema PE-Einsparungen sollen noch kurz die Auswirkungen der Verteilungsverluste für Strom bei hohen elektrischen Nutzungsgraden der Referenzstromerzeugung am Beispiel $\eta_{elKW} = 0,6$ behandelt werden. Hierbei zeigt sich, dass die thermischen Verteilungsverluste eine wesentlich größere Wirkung haben als bei $\eta_{elKW} = 0,4$. Durch den erhöhten PE-Bedarf – zur Deckung der Wärmeverluste – wird mehr Strom erzeugt, dieser zusätzliche Strom kann aber im Kraftwerk mit erheblich weniger PE-Aufwand erzeugt werden, da $\eta_{elKW} > \eta_{elKWK}$ ist.

Die beiden folgenden Abbildungen 27 und 28 zeigen die Ergebnisse der Berechnungen für $A = 0,75$. Dabei wird deutlich, dass eine Pauschalaussage hier kaum möglich ist. In vielen Fällen dürfte der negative Effekt der thermischen Verteilungsverluste auf Seiten der KWK gegenüber dem positiven Effekt der elektrischen Verteilungsverluste auf Seiten der Referenzstromerzeugung überwiegen. Klarheit kann hier nur eine genaue Berechnung des Einzelfalls bringen.

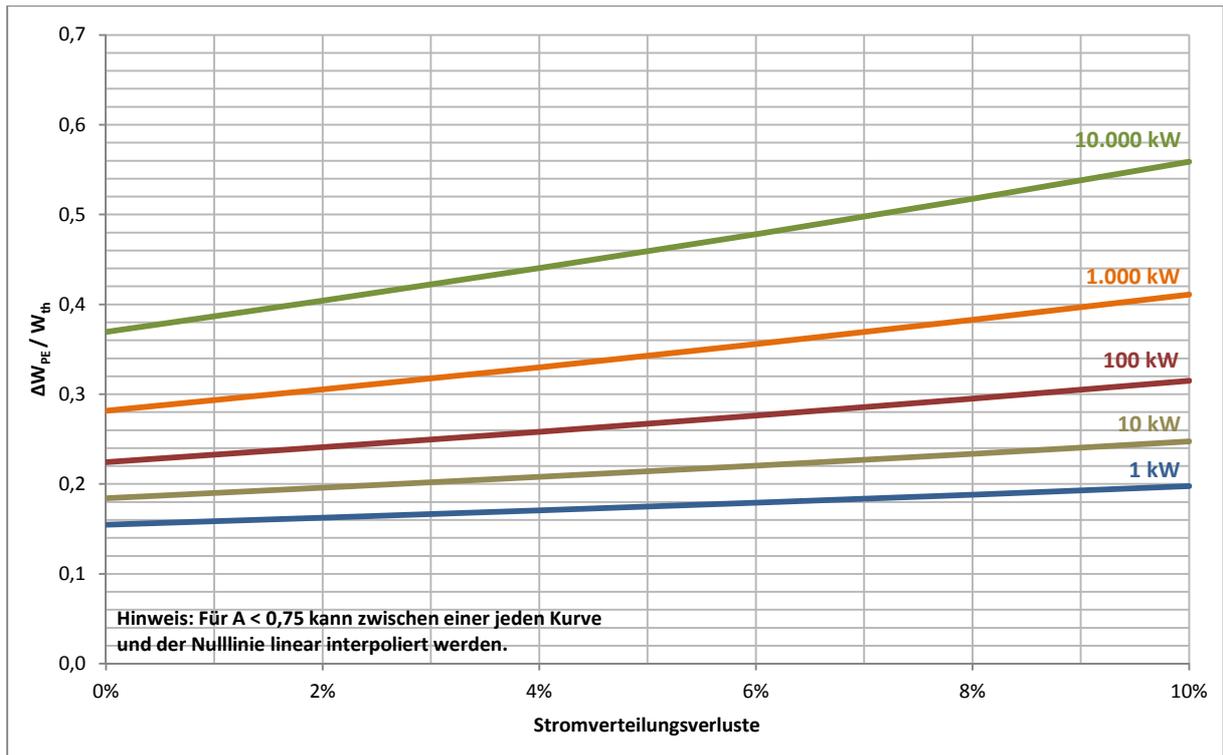


Abbildung 27: Einfluss der Stromverteilungsverluste auf die PE-Einsparungen für $\eta_{elKW} = 0,6$ und $A = 0,75$

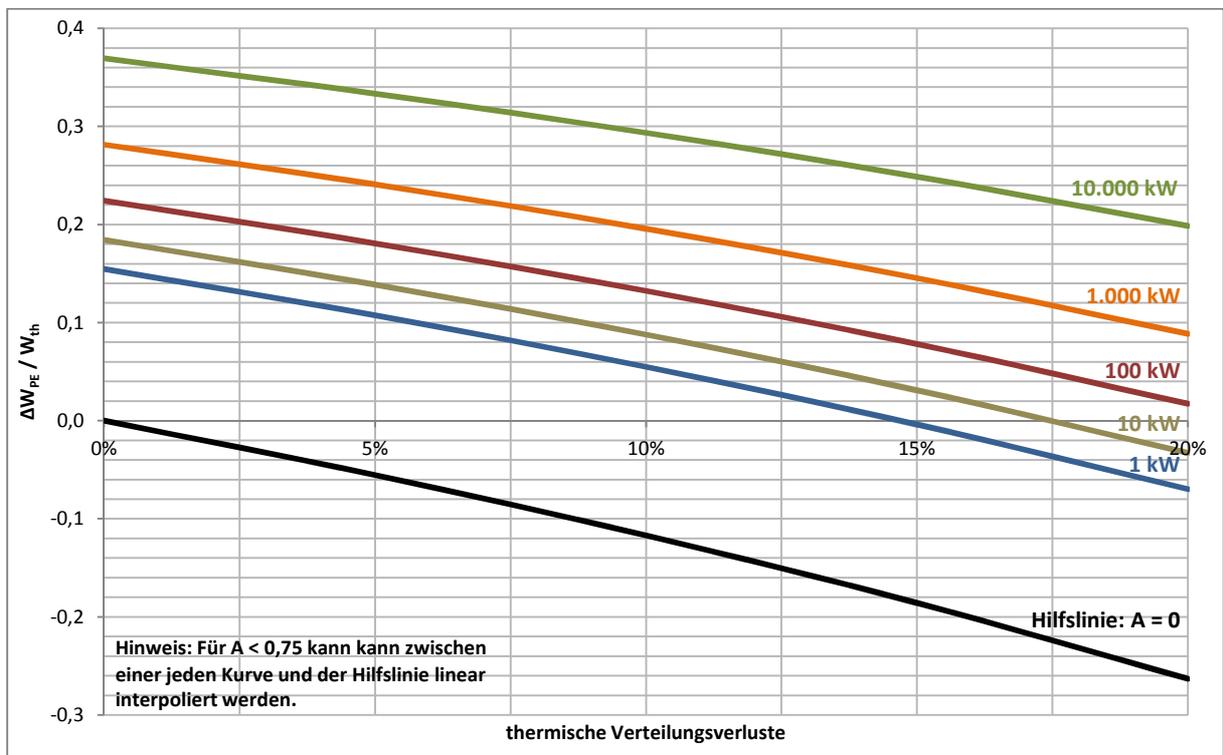


Abbildung 28: Einfluss der thermischen Verteilungsverluste auf die PE-Einsparungen für $\eta_{elKW} = 0,6$ und $A = 0,75$

5 CO₂-Einsparungen gegenüber Heizkesseln

Während vor noch nicht allzu langer Zeit die Endlichkeit fossiler Energieträger und damit das Streben nach Ressourcenschonung ein zentrales Thema war, steht heute die Reduktion von CO₂-Emissionen im Vordergrund. Aufgrund des geringeren PE-Bedarfs gegenüber der getrennten Erzeugung von Strom und Wärme und der Nutzung von Erdgas anstelle von Braun- und Steinkohle kann KWK in einer Übergangphase (Energiewende) einen wichtigen Beitrag zur Reduktion der CO₂-Emissionen leisten.

Die folgenden spezifischen CO₂-Emissionen der zur Strom- und Wärmeerzeugung eingesetzten fossilen Energieträger wurden den „Kohlendioxid-Emissionsfaktoren für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen“ [11] entnommen:

$$f_{EG} = 0,20 \frac{tCO_2}{MWh_{PE}} \quad (\text{Erdgas})$$

$$f_{SK} = 0,34 \frac{tCO_2}{MWh_{PE}} \quad (\text{Steinkohle})$$

$$f_{BK} = 0,41 \frac{tCO_2}{MWh_{PE}} \quad (\text{Braunkohle, Maximalwert})$$

Die in KWK, ZH und H freigesetzten CO₂-Mengen ergeben sich durch Multiplikation der primärenergiespezifischen CO₂-Emissionen f in tCO₂/MWh_{PE} und der Menge eingesetzter Primärenergie W_{PE} . Für KWK-Anlage, Zusatzheizung und Heizung wurde ausnahmslos Erdgas zugrunde gelegt.

$$f_{KWK} = f_{ZH} = f_H = 0,2 \frac{tCO_2}{MWh_{PE}} = f_{EG}$$

Für die Referenzstromerzeugung wurden an Stelle unterschiedlichster Kombinationen von elektrischen Nutzungsgraden η_{elKW} und primärenergiespezifischen Emissionen f stromspezifische Emissionen f^*_{KW} zugrunde gelegt.

$$f^*_{KW} = \frac{f}{\eta_{elKW}} \quad f = f^*_{KW} \cdot \eta_{elKW} \quad \eta_{elKW} = \frac{f}{f^*_{KW}} \quad (25)$$

Damit wird der Tatsache Rechnung getragen, dass i. d. R. keine eindeutige Aussage möglich ist, welche Art von Stromerzeugung durch KWK verdrängt wird bzw. dieser Strom aus Kraftwerken mit unterschiedlichen Nutzungsgraden und unterschiedlichen Primärenergien stammt.

Folgende Werte wurden gewählt:

$$f_{KW}^* = 0,333 / 0,5 / 0,7 / 0,9 / 1,1 \frac{tCO_2}{MWh_{el}}$$

Dabei entspricht

$f_{KW}^* = 0,333$ der Stromerzeugung in einer modernen GuD-Anlage

mit $\eta_{elKW} = f_{EG} / f_{KW}^* = 0,2 / 0,333 = 0,60$,

$f_{KW}^* = 0,5$ in etwa dem bundesdeutschen Strommix [12] (bzw. einem Erdgaskraftwerk mit $\eta_{elKW} = 0,2 / 0,5 = 0,40$),

$f_{KW}^* = 0,7$ einem hochmodernen Steinkohlekraftwerk mit $\eta_{elKW} = 0,34 / 0,7 = 0,486$,

$f_{KW}^* = 1,1$ einem alten Braunkohlekraftwerk mit $\eta_{elKW} = 0,41 / 1,1 = 0,373$,

$0,7 < f_{KW}^* < 0,9$ deckt die Bandbreite von Steinkohlekraftwerken und

$0,9 < f_{KW}^* < 1,1$ die Bandbreite von Braunkohlekraftwerken ab.

Aus den Gleichungen (1) bis (4) folgt für die CO₂-Emissionen der einzelnen Anlagen

$$m_{KWK} = f_{EG} \cdot \frac{A \cdot W_{th}}{\eta_{thKWK} \cdot \eta_{thVKWK}} \quad (26)$$

$$m_{ZH} = f_{EG} \cdot \frac{(1-A) \cdot W_{th}}{\eta_{thZH} \cdot \eta_{thVZH}} \quad (27)$$

$$m_{KW} = f_{KW}^* \cdot \frac{\eta_{elKWK} \cdot \eta_{elVKWK} \cdot A \cdot W_{th}}{\eta_{elVKWK} \cdot \eta_{thKWK} \cdot \eta_{thVKWK}} \quad (28)$$

$$m_H = f_{EG} \cdot \frac{W_{th}}{\eta_{thH} \cdot \eta_{thVH}} \quad (29)$$

Die Einsparungen an CO₂-Emissionen ergeben sich dann aus

$$\Delta m = (m_{KW} + m_H) - (m_{KWK} + m_{ZH}) \quad (30)$$

und die prozentualen CO₂-Emissionenseinsparungen betragen

$$\Delta m = \frac{\Delta m}{(m_{KW} + m_H)} \cdot 100 \% \quad (31)$$

Abb. 29 zeigt beispielhaft eine Auswertung von Gleichung (31) für stromspezifische CO₂-Emissionen $f_{KW}^* = 0,9 \text{ tCO}_2/\text{MWh}_{el}$ der Referenzstromerzeugung. Die Kurvenverläufe ähneln logischerweise denen der prozentualen PE-Einsparungen (s. Abb.8). Für $f_{KW}^* = 0,5 \text{ tCO}_2/\text{MWh}_{el}$ wären sie sogar identisch, da dieser Wert einer Verstromung von Erdgas mit $\eta_{elKW} = 0,4$ entspricht.

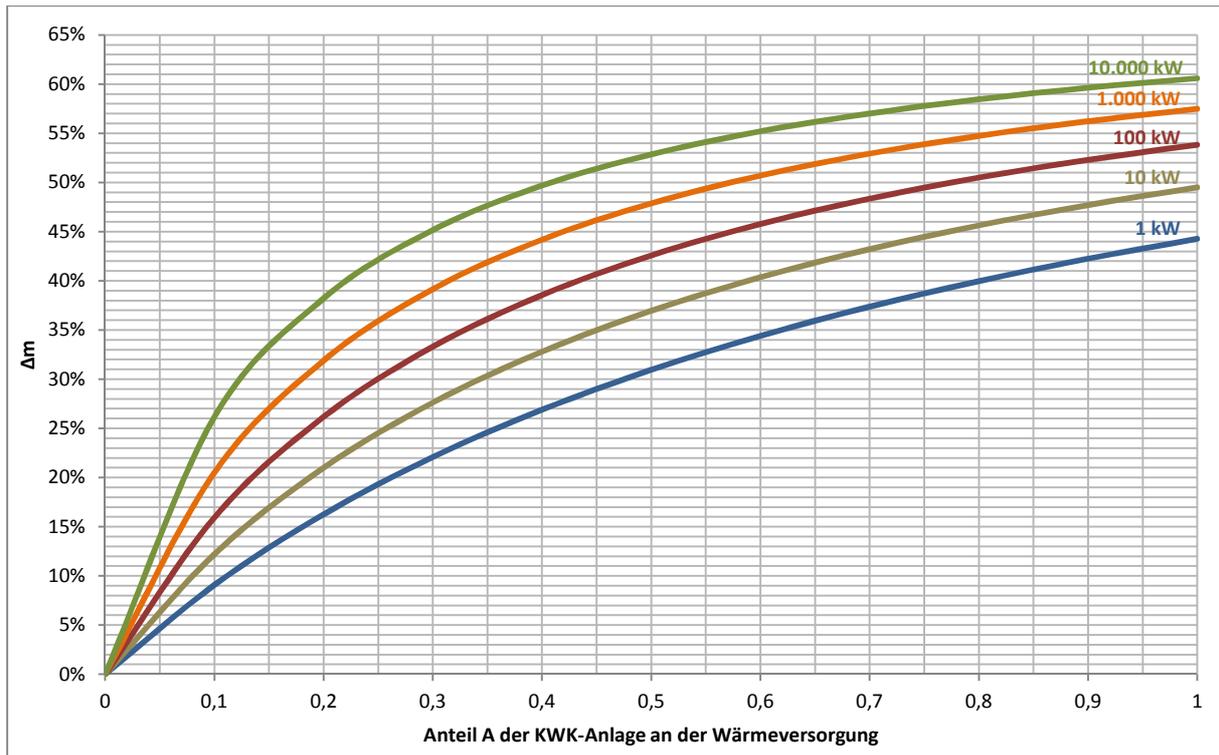


Abbildung 29: Prozentuale Einsparungen an CO₂-Emissionen für $f_{KW}^* = 0,9$

Um ähnlich klare Aussagen wie bei den PE-Einsparungen treffen zu können, werden auch hier absolute bzw. spezifische, auf die insgesamt erzeugte Wärme W_{th} bezogene Werte für die CO₂-Einsparungen berechnet. Die den Gleichungen (14) bis (18) für die Primärenergie entsprechenden Gleichungen lauten:

$$\Delta m = \left(f_{KW}^* \cdot \frac{\eta_{elKWK} \cdot \eta_{elVKWK} \cdot A \cdot W_{th}}{\eta_{elVKW} \cdot \eta_{thKWK} \cdot \eta_{thVKWK}} + f_{EG} \cdot \frac{W_{th}}{\eta_{thH} \cdot \eta_{thVH}} \right) - \left(f_{EG} \cdot \frac{A \cdot W_{th}}{\eta_{thKWK} \cdot \eta_{thVKWK}} + f_{EG} \cdot \frac{(1-A) \cdot W_{th}}{\eta_{thZH} \cdot \eta_{thVZH}} \right) \quad (32)$$

bzw. etwas umgeformt

$$\Delta m = \left[\left(f_{KW}^* \cdot \frac{\eta_{elKWK} \cdot \eta_{elVKWK}}{\eta_{elVKW} \cdot \eta_{thKWK} \cdot \eta_{thVKWK}} + \frac{f_{EG}}{\eta_{thZH} \cdot \eta_{thVZH}} - \frac{f_{EG}}{\eta_{thKWK} \cdot \eta_{thVKWK}} \right) \cdot A + \left(\frac{f_{EG}}{\eta_{thH} \cdot \eta_{thVH}} - \frac{f_{EG}}{\eta_{thZH} \cdot \eta_{thVZH}} \right) \right] \cdot W_{th} \quad (33)$$

sowie

$$\frac{\Delta m}{W_{th}} = \left(f_{KW}^* \cdot \frac{\eta_{elKWK} \cdot \eta_{elVKWK}}{\eta_{elVKW} \cdot \eta_{thKWK} \cdot \eta_{thVKWK}} + \frac{f_{EG}}{\eta_{thZH} \cdot \eta_{thVZH}} - \frac{f_{EG}}{\eta_{thKWK} \cdot \eta_{thVKWK}} \right) \cdot A + \left(\frac{f_{EG}}{\eta_{thH} \cdot \eta_{thVH}} - \frac{f_{EG}}{\eta_{thZH} \cdot \eta_{thVZH}} \right) \quad (34)$$

bzw. unter Vernachlässigung sämtlicher Verteilungsverluste

$$\frac{\Delta m}{W_{th}} = \left(f_{KW}^* \cdot \frac{\eta_{elKWK}}{\eta_{thKWK}} + \frac{f_{EG}}{\eta_{thZH}} - \frac{f_{EG}}{\eta_{thKWK}} \right) \cdot A + \left(\frac{f_{EG}}{\eta_{thH}} - \frac{f_{EG}}{\eta_{thZH}} \right) \quad (35)$$

und bei gleichen Nutzungsgraden für Heizung und Zusatzheizung ($\eta_{thH} = \eta_{thZH}$)

$$\frac{\Delta m}{W_{th}} = \left(f_{KW}^* \cdot \frac{\eta_{elKWK}}{\eta_{thKWK}} + f_{EG} \cdot \left(\frac{1}{\eta_{thZH}} - \frac{1}{\eta_{thKWK}} \right) \right) \cdot A \quad (36)$$

Es ergibt sich, wie zu erwarten, wieder eine lineare Abhängigkeit vom Anteil A und unter den zuletzt genannten Voraussetzungen eine Proportionalität zu A.

Abb. 30 zeigt beispielhaft eine Auswertung von Gleichung (36) für $f_{KW}^* = 0,9 \text{ tCO}_2/\text{MWh}_{el}$. Für $f_{KW}^* = 0,5 \text{ tCO}_2/\text{MWh}_{el}$ wären die Werte kleiner und könnten auch aus Abb. 9 durch Multiplizieren mit $f_{EG} = 0,2 \text{ tCO}_2/\text{MWh}_{PE}$ ermittelt werden.

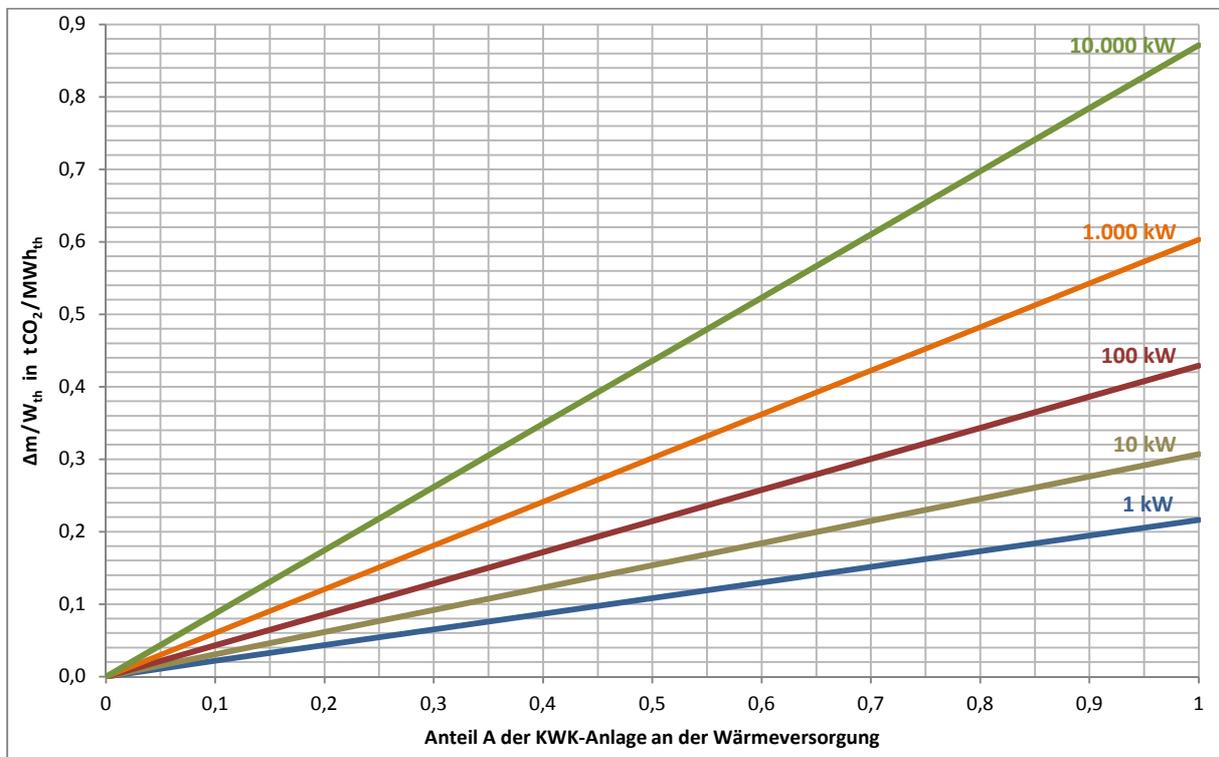


Abbildung 30: Spezifische Einsparungen an CO₂-Emissionen für $f_{KW}^* = 0,9$

In Abb. 31 sind erheblich mehr Informationen untergebracht. Der Einfluss der Anlagengröße ist besser zu erkennen, es werden Ergebnisse für verschiedene f_{KW}^* -Werte dargestellt und zusätzlich sind die CO₂-Emissionen auf die elektrische Energie bezogen dargestellt. Diese berechnen sich aus den Gleichungen (13) (für $\eta_{elVKWK} = 1$ und $\eta_{thVKWK} = 1$) und (36), unabhängig vom Anteil A zu:

$$\frac{\Delta m}{W_{elKWK}} = f_{KW}^* + f_{EG} \cdot \left(\frac{\eta_{thKWK}}{\eta_{elKWK} \cdot \eta_{thZH}} - \frac{1}{\eta_{elKWK}} \right) \quad (37)$$

Die auf die Wärme bezogenen CO₂-Emissionseinsparungen können für Werte $A < 1$ zwischen der jeweiligen Kurve und der Nulllinie linear interpoliert werden.

Kleine KWK-Anlagen können je erzeugter MWh_{th} ca. 0,2 bis 0,4 tCO₂ und große 0,5 bis 1 tCO₂ gegenüber Kohlekraftwerken einsparen.

Wie auch bei den PE-Einsparungen (s. Abb. 23) ist der starke Einfluss der KWK-Anlagengröße auf die CO₂-Einsparungen wärmebezogen und der deutlich weniger starke Einfluss strombezogen zu erkennen.

Gegenüber Strom aus Kohlekraftwerken und Wärme aus Erdgasheizkesseln verursachen Erdgas-KWK-Anlagen 0,4 bis 0,9 Tonnen weniger CO₂ je erzeugter MWh Strom.

Besonders bemerkenswert ist, dass die stromspezifischen CO₂-Einsparungen sehr gut durch die Gleichung

$$\frac{\Delta m}{W_{elKWK}} = f_{KW}^* - 0,25 \text{ tCO}_2 \text{ je MWh}_{el} \quad (38)$$

beschrieben werden können. D.h. für einen konkreten Fall können die absoluten CO₂-Einsparungen ohne komplexe Berechnungen in guter Näherung mit der folgenden Gleichung ermittelt werden:

$$\Delta m = (f_{KW}^* - 0,25) \cdot W_{elKWK} \text{ in tCO}_2 \quad (39)$$

Dieser Zusammenhang kann auch wie folgt formuliert werden:

Die stromspezifischen CO₂-Emissionen von KWK-Anlagen betragen ca. 0,25 tCO₂/MWh_{el}.

Sie sind damit drei- bis viermal geringer als die von Kohlekraftwerken, etwa halb so groß wie die des derzeitigen bundesdeutschen Strommixes und um ein Viertel geringer als die moderner GuD-Kraftwerke.

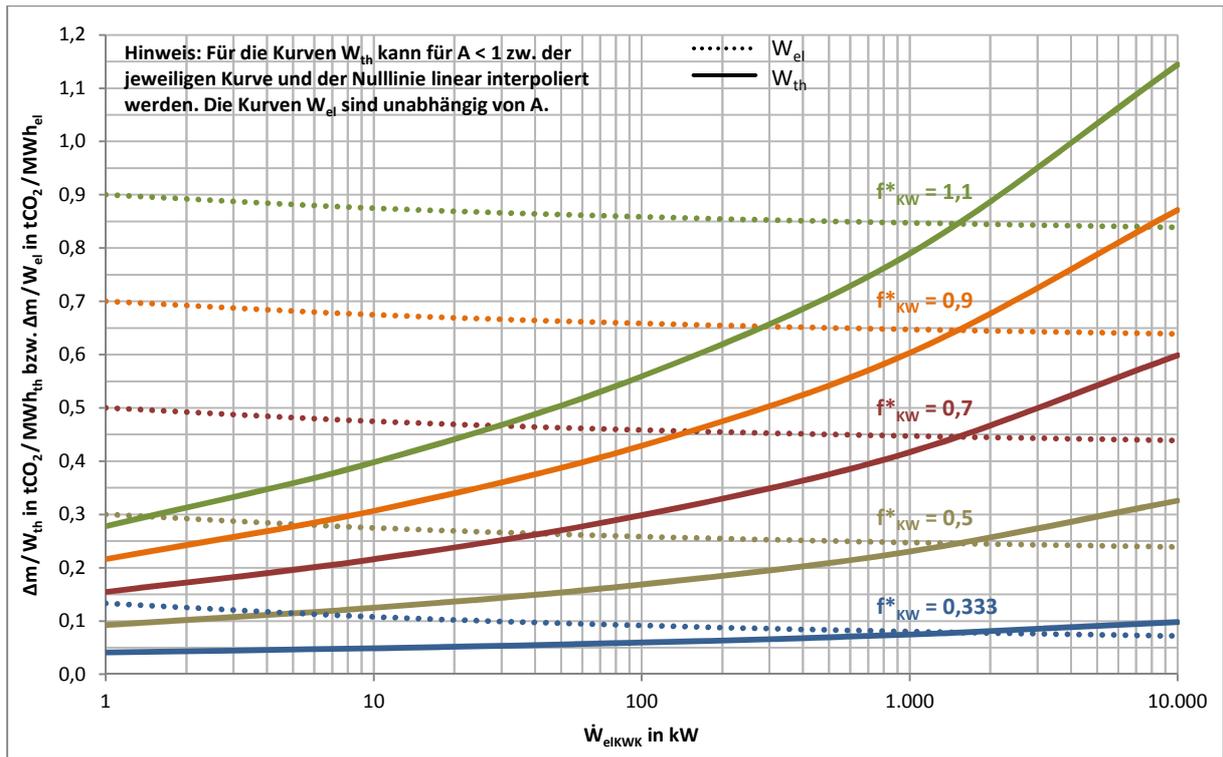


Abbildung 31: Einfluss der Referenzstromerzeugung auf die CO₂-Einsparungen (strom- und wärmebezogen)

In der folgenden Abbildung 32 ist die jährliche Ersparnis an CO₂-Emissionen einzelner Anlagen dargestellt. Den Berechnungen wurden, wie auch im Abschnitt der PE-Einsparungen, ein Anteil $A = 1$ und eine jährliche Vollbenutzungsdauer von $VBD_{KWK} = 5000$ h zugrunde gelegt.

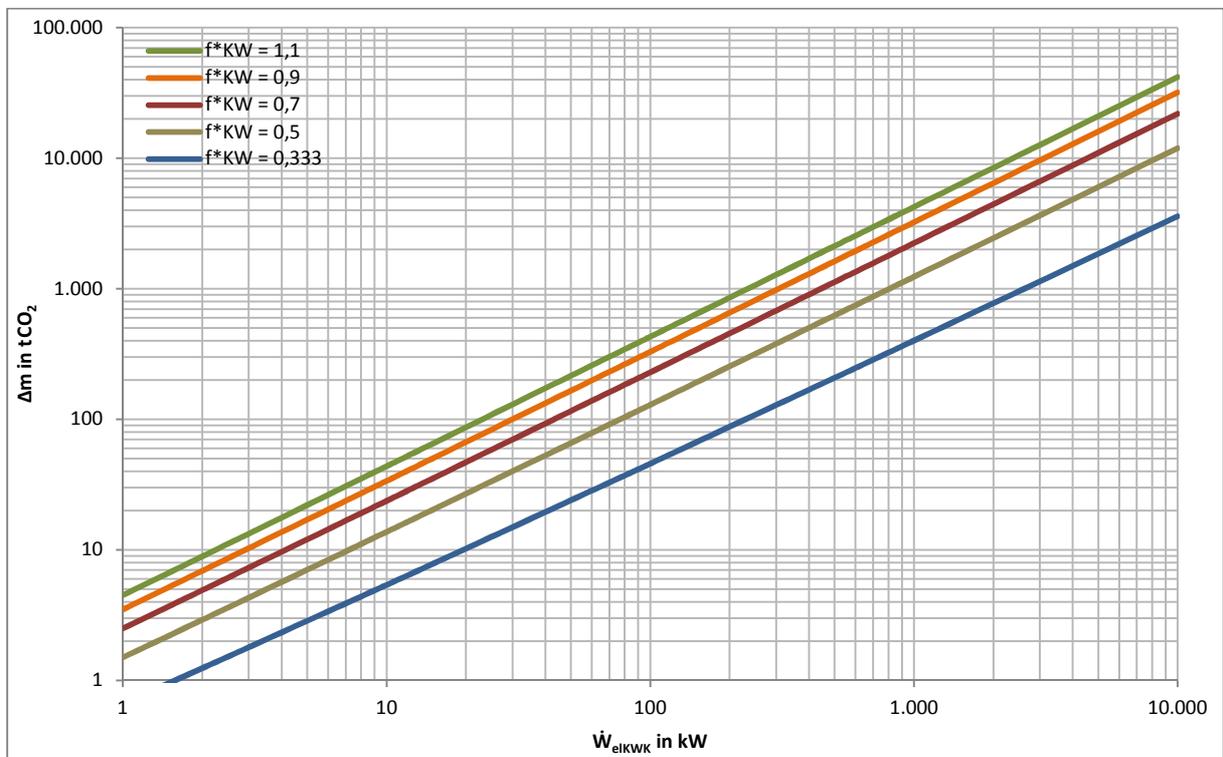


Abbildung 32: Jährliche CO₂-Emissionseinsparungen einzelner KWK-Anlagen für $A = 1$ und $VBD_{KWK} = 5000$ h

Wie sich leicht überprüfen lässt, liefert die zuvor erwähnte Näherungsformel (mit $W_{elKWK} = \dot{W}_{elKWK} \cdot VBD_{KWK}$) sehr ähnliche Werte.

Im Folgenden wird dargestellt, dass durch den Einsatz einer KWK-Anlage zunächst ein CO₂-Mehrausstoß (m_+) gegenüber einer normalen Heizung entsteht, da der thermische Nutzungsgrad einer KWK-Anlage immer kleiner als der einer normalen Heizung ist und somit mehr Primärenergie benötigt wird.

$$m_+ = m_{KWK} + m_{ZH} - m_H \quad (40)$$

Mit dem Primärenergiemehreinsatz und den daraus resultierendem CO₂-Mehrausstoß wird aber gleichzeitig Strom erzeugt, wodurch CO₂-Emissionen bei der Stromerzeugung in Kraftwerken eingespart werden. In der Regel ist der CO₂-Mehrausstoß kleiner als die CO₂-Einsparung im Kraftwerk, so dass insgesamt betrachtet CO₂-Emissionen eingespart werden.

$$\Delta m = m_{KW} - m_+ \quad (41)$$

Bei gleichen Nutzungsgraden für Zusatzheizung und Heizung und Vernachlässigung sämtlicher Verteilungsverluste ergibt sich für den CO₂-Mehrausstoß der folgende einfache Zusammenhang:

$$m_+ = f_{EG} \cdot W_{th} \cdot A \cdot \left(\frac{1}{\eta_{thKWK}} - \frac{1}{\eta_{thZH}} \right) \quad (42)$$

In Abb. 33 sind der CO₂-Mehrausstoß m_+ , die Menge der im Kraftwerk eingesparten CO₂-Emissionen m_{KW} sowie die daraus resultierende CO₂-Einsparung Δm , jeweils bezogen auf W_{th} für $f_{KW}^* = 0,9 \text{ tCO}_2/\text{MWh}_{el}$ und $A = 1$ dargestellt. Da alle Größen proportional zu A sind, können aus dem Diagramm auch Werte für beliebige Anteile $A < 1$ ermittelt werden.

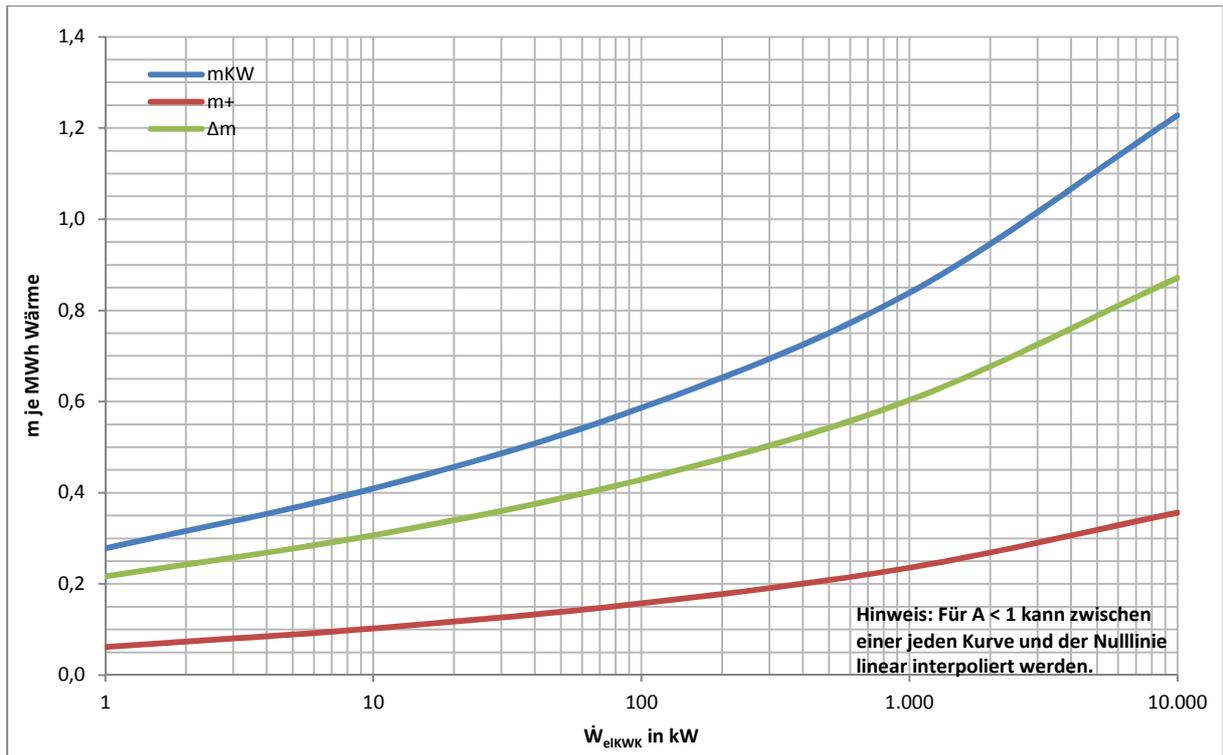


Abbildung 33: Zusätzlicher CO₂-Ausstoß durch KWK, CO₂-Einsparung im Kraftwerk und tatsächliche CO₂-Einsparung für $f_{KW}^* = 0,9$ und $A = 1$

In Abb. 34 ist dargestellt, wie viele Tonnen CO₂ bezogen auf den PE-Mehrbedarf der KWK-Anlage eingespart werden, wenn unterschiedliche stromspezifische CO₂-Emissionen für die Referenzstromerzeugung zugrunde gelegt werden.

Für Strom aus Kohlekraftwerken ($0,7 < f_{KW}^* < 1,1$) kann die folgende Aussage getroffen werden:

Der Mehreinsatz von Erdgas in KWK-Anlagen gegenüber Erdgasheizungen bringt eine Ersparnis von ca. 0,4 bis 0,8 tCO₂ je MWh Erdgas.

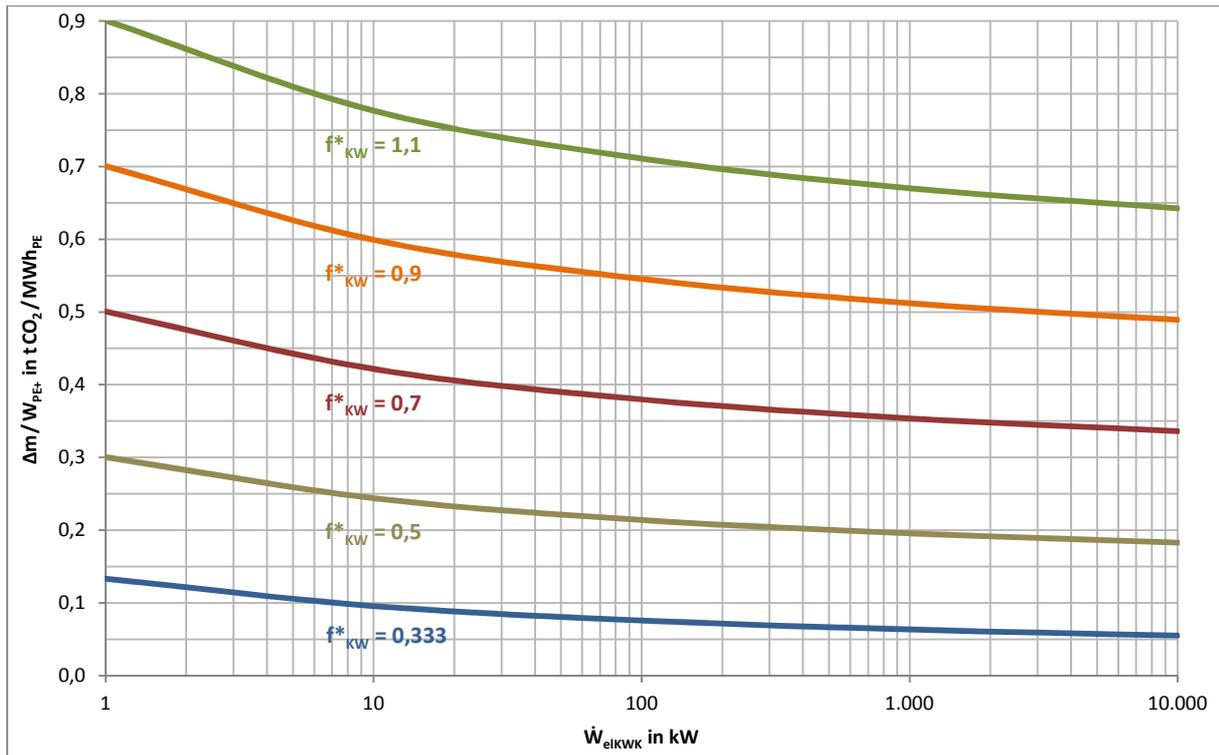


Abbildung 34: CO₂-Emissionseinsparungen pro MWh PE-Mehrbedarf der KWK-Anlage

Zum Thema PE-Einsparung wurde der Frage nachgegangen, wie viel zusätzlicher Strom durch KWK erzeugt werden kann, ohne den Einsatz an Primärenergie zu erhöhen. Dem entsprechend soll hier die Frage beantwortet werden, wie viel Strom in KWK erzeugt werden kann, ohne den CO₂-Ausstoß zu erhöhen (s. Abb. 35). Die in beiden Systemen erzeugte Wärmemenge ist gleich groß, das Kraftwerk darf aber nur die Menge an CO₂-Emissionen ausstoßen, die das KWK-System gegenüber einer normalen Heizung mehr ausstößt. Die zusätzlich erzeugte Strommenge berechnet sich wie folgt:

$$\Delta W_{el} = W_{elKWK} - \left(\frac{m_{KWK} + m_{ZH} - m_H}{f_{KW}^*} \right) \quad (43)$$

Aus Abb. 35 lässt sich exemplarisch die folgende Aussage ableiten:

Gegenüber Kohlekraftwerken ($0,7 < f_{KW}^* < 1,1$) können mittelgroße KWK-Anlagen bis zu $0,5 \text{ MWh}_{el}/\text{MWh}_{th}$ und sehr große KWK-Anlagen bis zu $1 \text{ MWh}_{el}/\text{MWh}_{th}$ zusätzlichen Strom erzeugen, ohne die CO₂-Emissionen zu erhöhen.

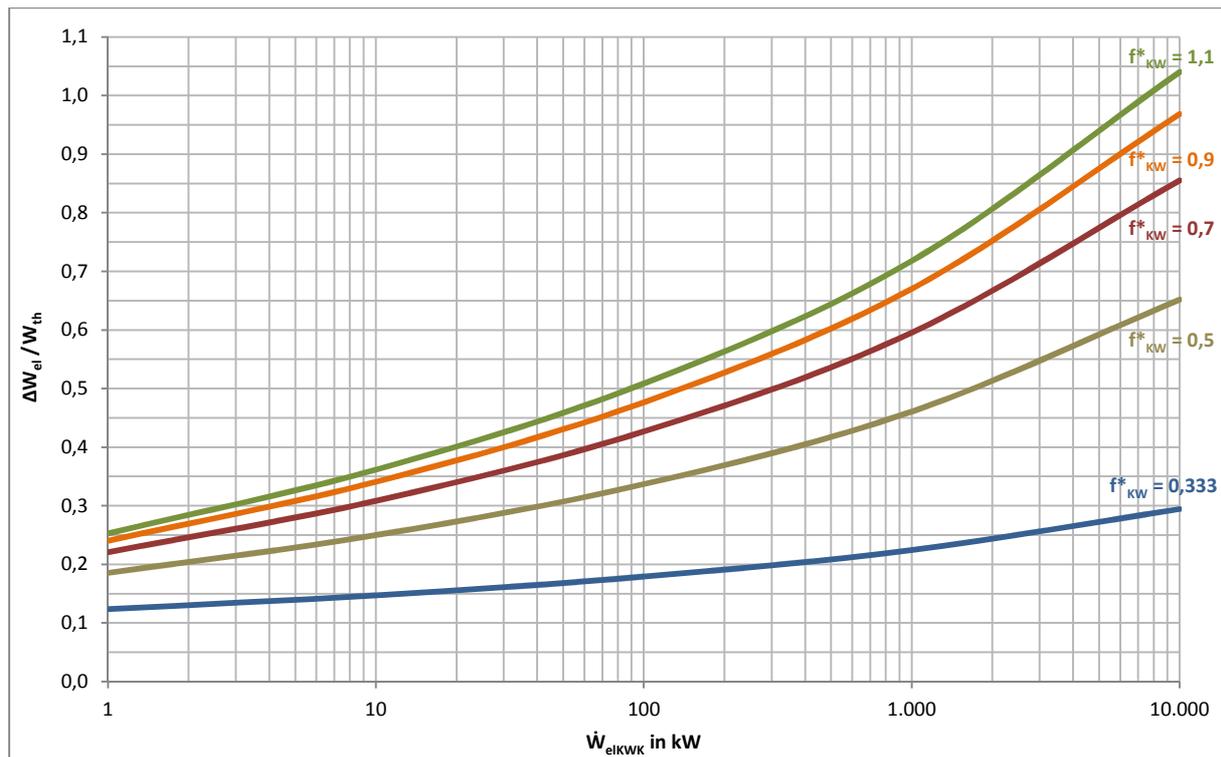


Abbildung 35: Zusätzliche Stromerzeugung durch KWK bei gleichem Gesamtausstoß an CO₂-Emissionen für A = 1

Die Stromverteilungsverluste und thermischen Verteilungsverluste bezogen auf die CO₂-Einsparungen stellen sich ganz ähnlich dar, wie bei den PE-Einsparungen. Die Annahmen für die Verteilungsverluste sind die gleichen wie im Abschnitt PE-Einsparungen. Bei den Stromverteilungsverlusten wurden vereinfachend die Verteilungsverluste des dezentral erzeugten KWK-Stroms vernachlässigt (0%, entsprechend $\eta_{elVKWK} = 1$) und die Verteilungsverluste der normalen Stromerzeugung zwischen 0 und 10% (entsprechend $1 > \eta_{VKWK} > 0,9$) variiert. Bei den thermischen Verteilungsverlusten wurden vereinfachend die Verteilungsverluste der dezentral erzeugten Wärme der Referenzwärmeerzeugung vernachlässigt (0%, entsprechend $\eta_{thVH} = 1$) und die thermischen Verteilungsverluste der KWK und der Zusatzheizung zwischen 0 und 20% (entsprechend $1 > \eta_{thVKWK} = \eta_{thVZH} > 0,8$) variiert.

Die folgenden Abbildungen 36 und 37 zeigen beispielhaft für einen stromspezifischen CO₂-Emissionswert von $f_{KW}^* = 0,9$ tCO₂/MWh_{el} die Auswirkungen der Stromverteilungsverluste und der thermischen Verteilungsverluste auf die durch KWK generierbare CO₂-Ersparnis. Es wird deutlich, dass die Stromverteilungsverluste vor allem bei den großen KWK-Anlagen einen positiven Einfluss auf die CO₂-Emissionseinsparungen haben. Der Einfluss nimmt außerdem mit steigendem Anteil A zu. Bei den thermischen Verteilungsverlusten sind erneut Schnittpunkte der Geraden zu erkennen (hier bei f_{EG}/η_{thH}), die bei den größeren KWK-Anlagen (100 bis 10.000 kW) noch unter den praxisüblichen Anteilen A liegen. Bei den kleinen KWK-Anlagen (1 kW und 10 kW) liegen diese bei höheren Anteilen A, allerdings sind bei so kleinen Anlagen keine nennenswerten thermischen Verteilungsverluste zu erwarten. Ab

den Schnittpunkten der Geraden führen die thermischen Verteilungsverluste zu zusätzlichen Einsparungen an CO₂-Emissionen, da der zusätzliche KWK-Strom emissionsärmer erzeugt wird als bei der Referenzstromerzeugung.

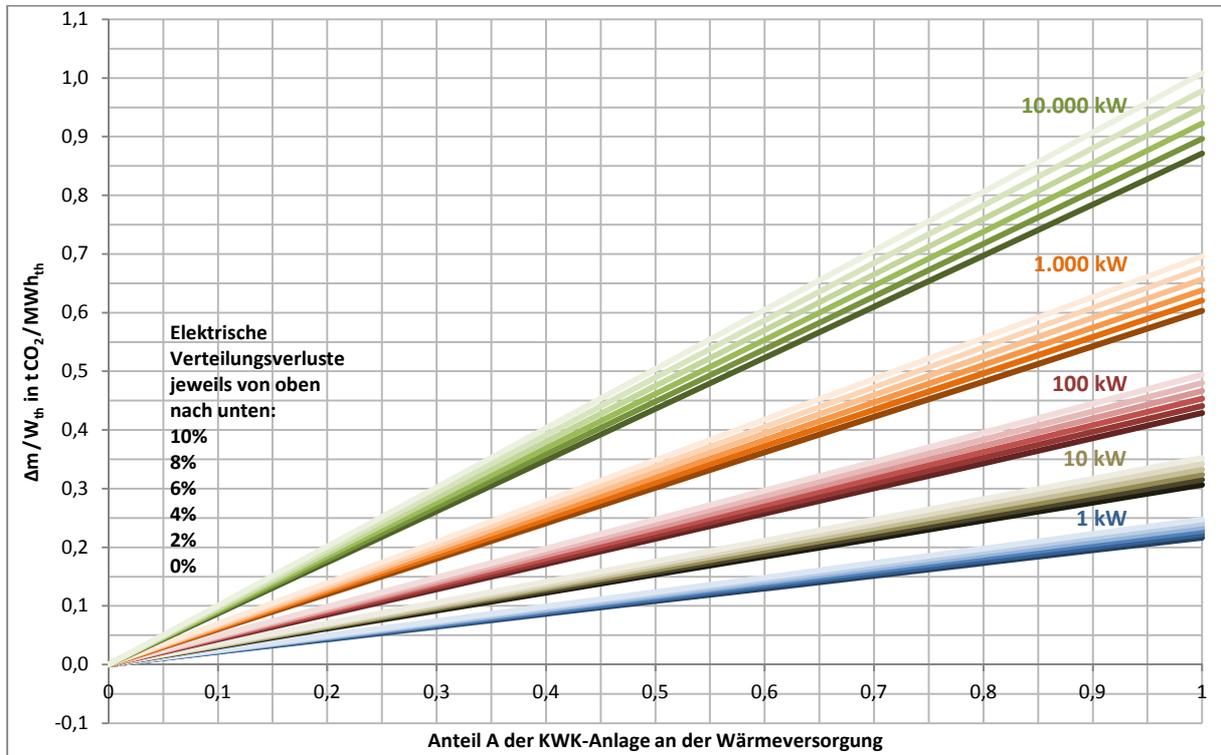


Abbildung 36: Einsparungen an CO₂-Emissionen unter Einfluss der Stromverteilungsverluste für $f_{KW}^* = 0,9$

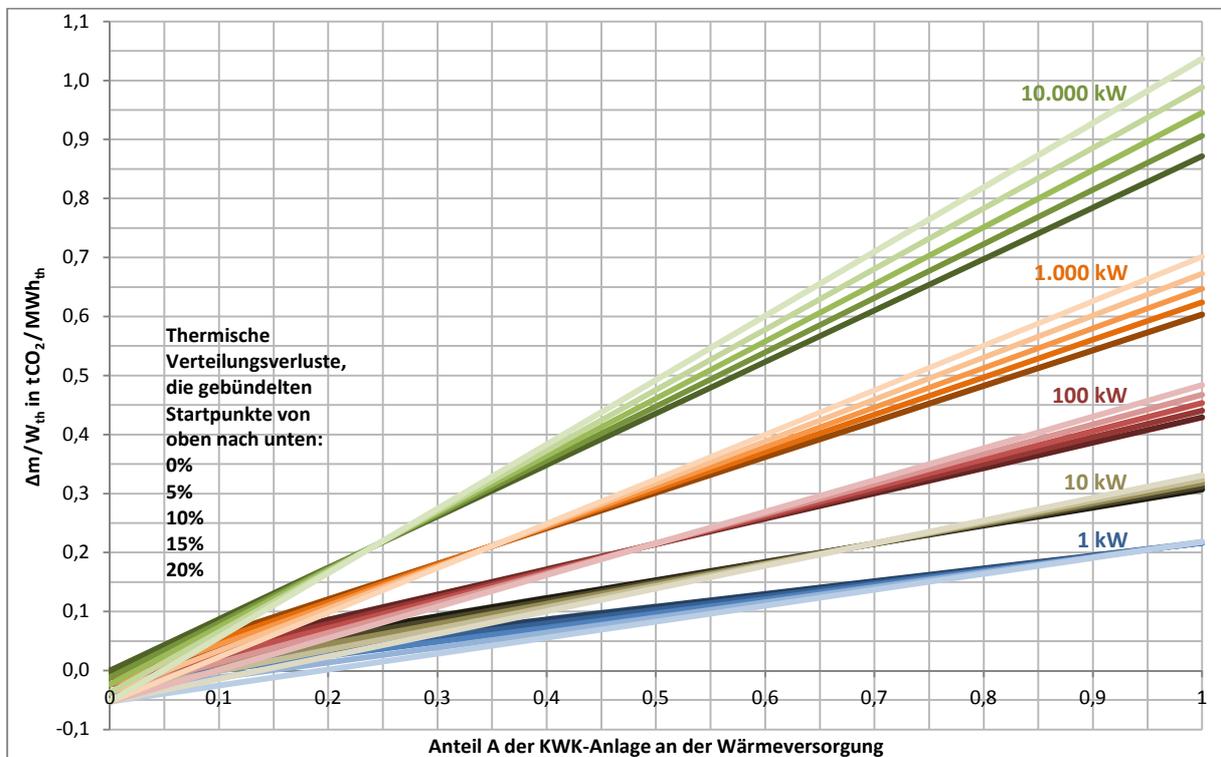


Abbildung 37: Einsparungen an CO₂-Emissionen unter Einfluss thermischer Verteilungsverluste für $f_{KW}^* = 0,9$

Im Anhang A2 befinden sich entsprechende Darstellungen für $f_{KW}^* = 0,333/0,5/0,7/1,1$ tCO₂/MWh_{el}. Die dort dargestellten Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen: Solange für die Referenzstromerzeugung Kohlekraftwerke ($0,7 < f_{KW}^* < 1,1$) unterstellt werden, führt die Vernachlässigung von Strom- und Wärmeverteilungsverlusten eher zu einer Unterschätzung des positiven Effekts der Kraft-Wärme-Kopplung, bei $f_{KW}^* = 0,5$ tCO₂/MWh_{el} ist deren Einfluss in Kombination in den meisten Fällen in etwa ausgeglichen. Bei geringeren spezifischen CO₂-Emissionen sollte jeder Einzelfall genau betrachtet werden.

6 Referenzwärmeerzeugung mit Wärmepumpe

In den vorherigen Abschnitten wurden PE-Einsparungen und CO₂-Emissionseinsparungen in großer Bandbreite für die Referenzstromerzeugung untersucht. Sie reicht vom Ersatz alter Braunkohlekraftwerke bis hin zu modernen Steinkohlekraftwerken und umfasst sogar die Fragestellung, ob KWK besser ist als der Bau moderner GuD-Anlagen. Bei sämtlichen Vergleichen wurden moderne Erdgas-Heizungen als Referenzwärmeerzeugung angenommen, deren Nutzungsgrade nicht stark variieren und mit $\eta_{thH} = 0,95$ angenommen wurden. In den folgenden Betrachtungen wird nun eine elektrische Wärmepumpe als Referenzstromerzeugung angenommen.

6.1 Primärenergieeinsparungen

Wird eine elektrische Wärmepumpe als Referenzwärmeerzeugung angenommen, so wird der Systemvergleich deutlich schwieriger, da Wärmepumpen – abhängig von der Wärmequellentemperatur, von den bereitzustellenden Nutztemperaturen für Raumwärme und Warmwasserbereitung sowie von der Anlagenqualität – sehr unterschiedliche Effizienzen haben können. Das Verhältnis von Wärmeerzeugung zu Strombedarf (Arbeitszahl) kann Werte im Bereich von $3 < \varepsilon_{WP} < 5$ annehmen [13]. Außerdem kann nur selten eindeutig beantwortet werden, welcher Herkunft der Strom für die Wärmepumpe ist.

Folgende Annahmen wurden getroffen, um dennoch plausible Aussagen treffen zu können:

KWK konkurriert im Einzelfall, sicher jedoch nicht flächendeckend mit extrem ineffizienten oder hocheffizienten Wärmepumpen. Die Arbeitszahl wurde deshalb nur im Bereich $3,5 < \varepsilon_{WP} < 4,5$ variiert.

Der Ausbau der regenerativen Stromerzeugung wird zunächst erst einmal den vorhandenen Strombedarf zunehmend decken. Wärmepumpen generieren aber einen zusätzlichen Strombedarf, so dass der Strom für die Wärmepumpe als konventionell erzeugt angenommen wird. Entweder müssen vorhandene konventionelle Kraftwerke diesen decken oder aber es werden zusätzliche konventionelle Stromerzeugungskapazitäten geschaffen, von denen GuD-Anlagen – sowohl auf den PE-Bedarf bezogen als auch auf die CO₂-Emissionen bezogen – die beste Alternative darstellen.

Der Primärenergiebedarf einer Wärmepumpe ergibt dann (ohne Verteilungsverluste)

$$W_{PEWP} = \frac{W_{th}}{\eta_{elKW-WP} \cdot \varepsilon_{WP}} \quad (44)$$

und die spezifischen PE-Einsparungen folgen aus

$$\frac{\Delta W_{PE}}{W_{th}} = \left(\frac{\eta_{elKWK}}{\eta_{elKW} \cdot \eta_{thKWK}} + \frac{1}{\eta_{thZH}} - \frac{1}{\eta_{thKWK}} \right) \cdot A + \left(\frac{1}{\eta_{elKW-WP} \cdot \varepsilon_{WP}} - \frac{1}{\eta_{thZH}} \right) \quad (45)$$

Diese Geradengleichung kann nicht entsprechend Gleichung (18) vereinfacht werden, da das Produkt $\eta_{elKW-WP} \cdot \varepsilon_{WP}$ immer größer als der thermische Nutzungsgrad η_{thZH} der Zusatzheizung ist. Für $A = 0$ ergibt sich daher immer ein negativer Wert (s. Abb. 38). Und die Werte sind nicht proportional zu A .

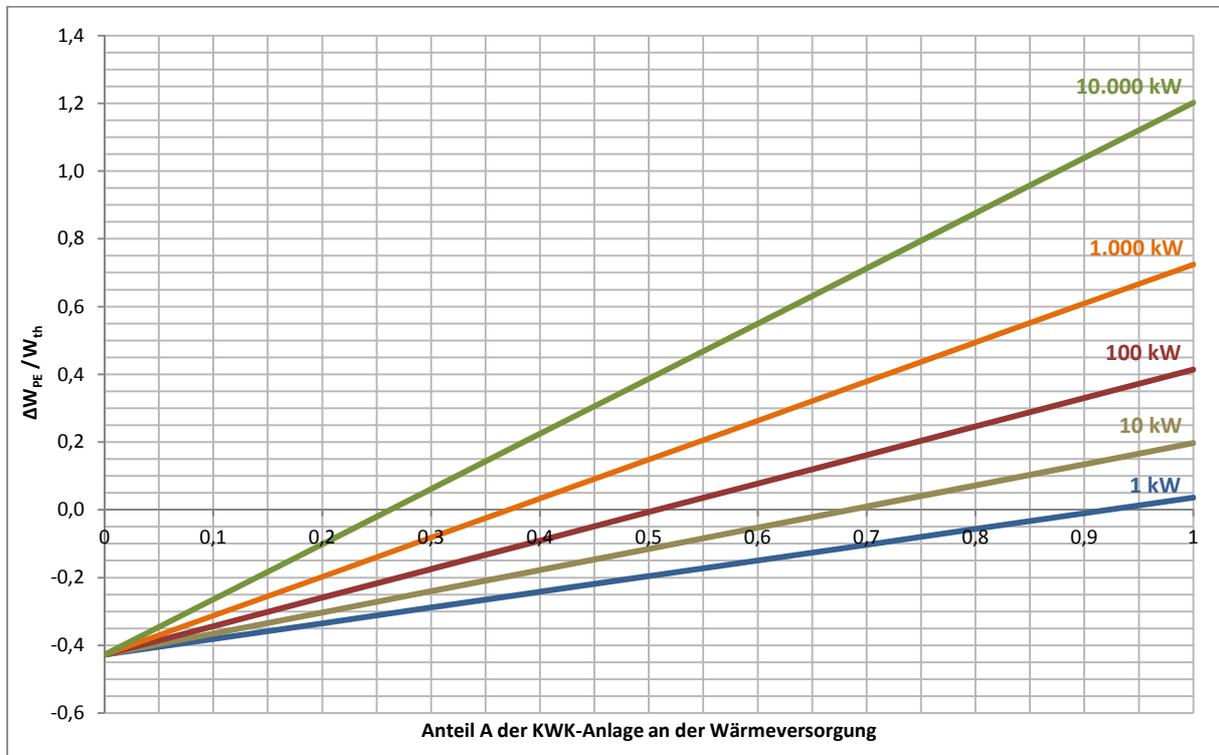


Abbildung 38: Spezifische PE-Einsparungen für $\eta_{elKW} = \eta_{elKW-WP} = 0,4$ und $\varepsilon_{WP} = 4$

Wie zu erkennen ist, muss die KWK-Anlage einen Mindestanteil an der Wärmeversorgung haben, damit sich PE-Einsparungen generieren lassen. Für große KWK-Anlagen ist dieser Anteil wesentlich kleiner als bei kleinen Anlagen. Die Geraden der Abbildung 38 haben die gleichen Verläufe wie die Geraden der Abb. 9, allerdings beginnen sie nicht im Nullpunkt, sondern sind auf der Y-Achse um $1/(\eta_{elKW-WP} \cdot \varepsilon_{WP}) - 1/\eta_{thZH} = 0,428$ nach unten (in den negativen Bereich) verschoben. Je besser die Arbeitszahl der Wärmepumpe ist, desto weiter im negativen Bereich beginnen die Geraden. Daraus resultiert, je besser die Arbeitszahl der Wärmepumpe ist, desto höher müssen die Anteile A für die einzelnen KWK-Anlagengrößen sein, um überhaupt PE-Einsparungen zu generieren.

In Abb. 39 sind drei Szenarien vergleichend dargestellt:

- Die KWK-Anlage verdrängt Strom aus bestehenden Kraftwerken mit $\eta_{elKW} = 0,4$ und der Strom für die Wärmepumpe wird ebenfalls mit $\eta_{elKW-WP} = 0,4$ bereitgestellt (wie zuvor).
- Die KWK-Anlage verdrängt Strom aus bestehenden Kraftwerken mit $\eta_{elKW} = 0,4$, die Wärmepumpe aber bezieht Strom aus neuen GuD-Anlagen mit $\eta_{elKW-WP} = 0,6$.
- Die KWK-Anlage konkurriert mit Strom aus neuen GuD-Anlagen ($\eta_{elKW} = 0,6$) und die Wärmepumpe bezieht ebenfalls Strom aus neuen GuD-Anlagen ($\eta_{elKW-WP} = 0,6$).

Außerdem ist in Abb. 39 zusätzlich ein Heizkessel (mit $\eta_{thH} = 0,95$) dargestellt, um den großen Unterschied zwischen Wärmepumpe bzw. Heizkessel als Referenzwärmeerzeugung zu verdeutlichen.

Da die spezifischen PE-Einsparungen gegenüber Wärmepumpen nicht proportional zu A sind, können viele der für den Vergleich mit Heizkesseln präsentierten Berechnungsergebnisse nicht in entsprechenden Diagrammen dargestellt werden. Und es können demzufolge auch keine einfachen Abschätzungen in Form von Merksätzen formuliert werden. Aus diesem Grund wurde ein exemplarischer Vergleich angestellt, bei dem für den Anteil der KWK-Anlage an der Wärmeversorgung ein praxisüblicher Wert $A = 0,75$ angenommen wurde.

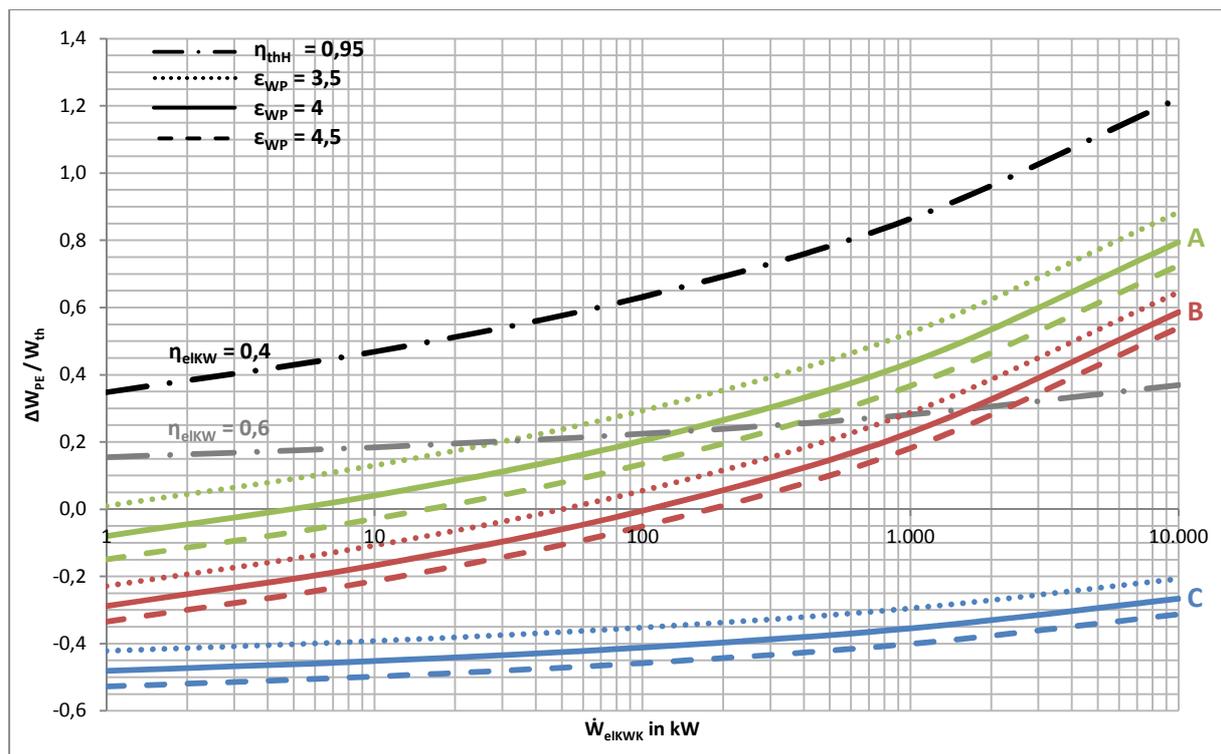


Abbildung 39: Darstellung dreier Szenarien für die spezifischen PE-Einsparungen für $A = 0,75$

In Szenario A sind kleine KWK-Anlagen in etwa gleich gut wie eine Wärmepumpe mittlerer Effizienz, im Vergleich zu höher effizienten Wärmepumpen etwas schlechter und im Vergleich zu weniger effizienten Wärmepumpen geringfügig besser.

In Szenario B sind KWK-Anlagen erst ab ca. 100 kW elektrischer Leistung in etwa gleichwertig und erst ab 1.000 kW bieten sie nennenswerte Vorteile.

In Szenario C sind selbst die größten KWK-Anlagen nicht konkurrenzfähig.

Das Fazit lautet: KWK erweist sich im Vergleich zur Wärmepumpe als weit weniger vorteilhaft als im Vergleich zu einem normalen Heizkessel, da Wärmepumpen primärenergetisch wesentlich effizienter als normale Heizkessel sind. Die KWK-Anlage muss einen Mindestanteil an der Wärmeversorgung haben, um überhaupt Primärenergie einzusparen. Sehr kleine

KWK-Anlagen sind bei üblichen Anteilen A, je nach Randbedingungen, gar nicht oder kaum konkurrenzfähig.

6.2 CO₂-Einsparungen

Die durch Wärmepumpen verursachten CO₂-Emissionen (ohne Verteilungsverluste) berechnen sich zu

$$m_{WP} = f_{WP}^* \cdot \frac{W_{th}}{\varepsilon_{WP}} \quad (46)$$

und die spezifischen CO₂-Einsparungen folgen aus

$$\frac{\Delta m}{W_{th}} = \left(f_{KW}^* \cdot \frac{\eta_{elKWKW}}{\eta_{thKWK}} + \frac{f_{EG}}{\eta_{thZH}} - \frac{f_{EG}}{\eta_{thKWK}} \right) \cdot A + \left(\frac{f_{WP}^*}{\varepsilon_{WP}} - \frac{f_{EG}}{\eta_{thZH}} \right) \quad (47)$$

Auch diese Geradengleichung kann nicht vereinfacht werden, da das Verhältnis $f_{WP}^*/\varepsilon_{WP}$ in der Regel ungleich f_{EG}/η_{thZH} ist. In Abb. 40 sind die CO₂-Einsparungen beispielhaft für ein Szenario dargestellt. Die KWK-Anlage verdrängt Strom aus bestehenden Kohlekraftwerken mit stromspezifischen CO₂-Emissionen von $f_{KW}^* = 0,9$, die Arbeitszahl der Wärmepumpe beträgt $\varepsilon_{WP} = 4$ und der Strom für die Wärmepumpe wird ebenfalls aus bestehenden Kohlekraftwerken mit stromspezifischen CO₂-Emissionen von $f_{WP}^* = 0,9$ bereitgestellt.

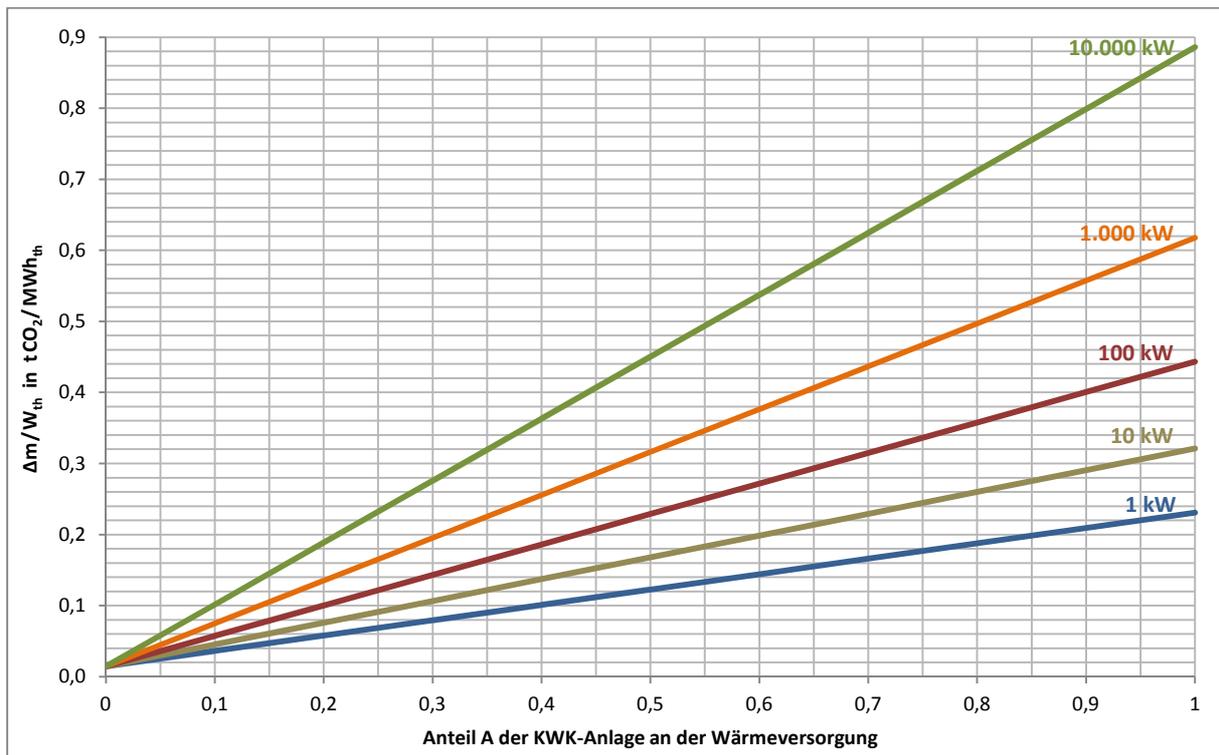


Abbildung 40: Spezifische Einsparungen an CO₂-Emissionen für $f_{KW}^* = f_{WP}^* = 0,9$ und $\varepsilon_{WP} = 4$

Da die wärmebezogenen CO₂-Emissionen der Wärmepumpe etwas größer als die der Zusatzheizung sind ($0,9/4 = 0,225 > 0,211 = 0,2/0,95$), starten alle Geraden im positiven Bereich.

Im Folgenden werden wieder drei Szenarien vergleichend betrachtet. Der gewählte Wert $f^* = 0,9 \text{ tCO}_2/\text{MWh}_{\text{el}}$ entspricht einer Mischung aus Braun- und Steinkohlestromerzeugung.

- A) Die KWK-Anlage verdrängt Strom aus bestehenden Kohlekraftwerken mit $f^*_{\text{KW}} = 0,9$ und der Strom für die Wärmepumpe wird ebenfalls mit $f^*_{\text{WP}} = 0,9$ bereitgestellt (wie zuvor).
- B) Die KWK-Anlage verdrängt Strom aus bestehenden Kohlekraftwerken mit $f^*_{\text{KW}} = 0,9$, die Wärmepumpe aber bezieht Strom aus neuen GuD-Anlagen mit $f^*_{\text{WP}} = 0,333$.
- C) Die KWK-Anlage konkurriert mit Strom aus neuen GuD-Anlagen ($f^*_{\text{KW}} = 0,333$) und die Wärmepumpe bezieht ebenfalls Strom aus neuen GuD-Anlagen ($f^*_{\text{WP}} = 0,333$).

Da auch die CO_2 -Einsparungen nicht proportional zu A sind, wird wieder ein praxisüblicher Wert von $A = 0,75$ zugrunde gelegt. Und zum Vergleich ist eine Erdgasheizung mit ($\eta_{\text{thH}} = 0,95$) dargestellt (s. Abb. 41).

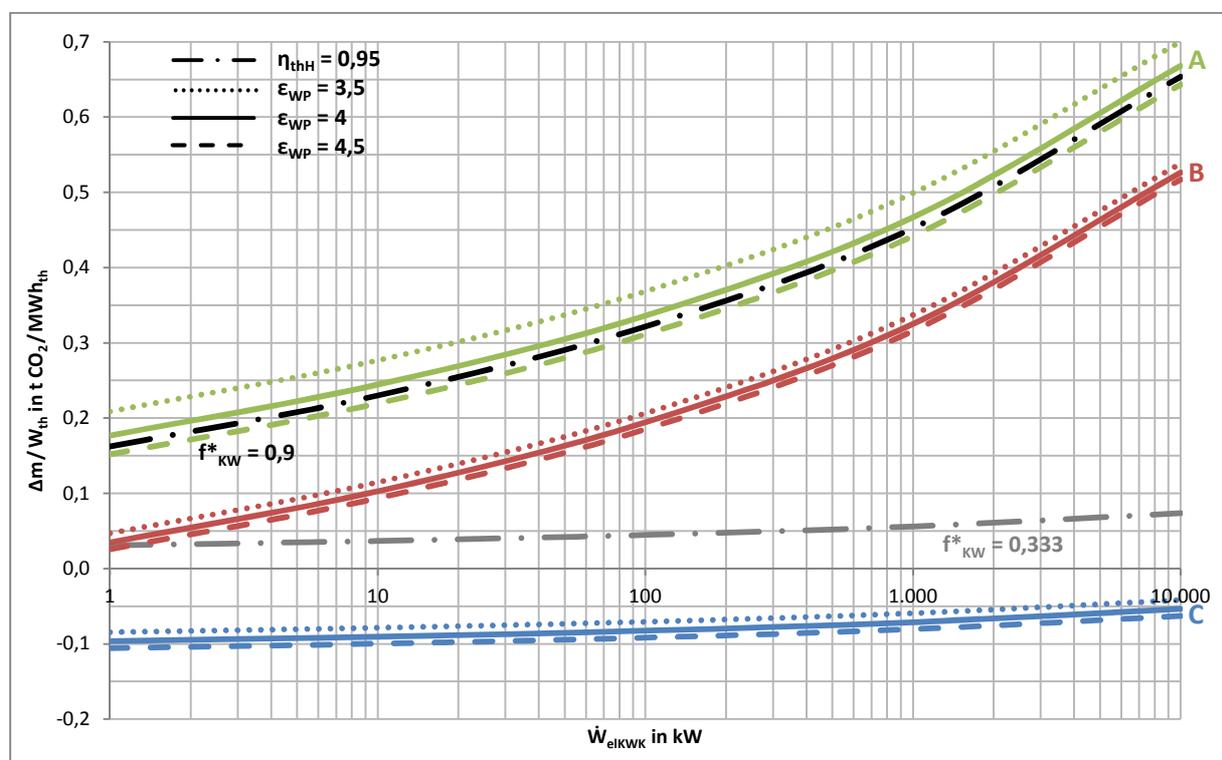


Abbildung 41: Darstellung dreier Szenarien der CO_2 -Emissionseinsparungen für $A = 0,75$

In Szenario A ergeben sich sehr ähnliche Werte wie bei der Erdgasheizung, da die wärmebezogenen Emissionen von Wärmepumpen ($f^*_{\text{WP}}/\epsilon_{\text{WP}}$) und Erdgasheizungen ($f_{\text{EG}}/\eta_{\text{thH}}$) nahezu gleich sind. Bei $\epsilon_{\text{WP}} = 4,275$ wären sie identisch ($0,9/4,275 = 0,2/0,95$).

Bezieht die Wärmepumpe dagegen emissionsärmeren Strom ($f^*_{\text{WP}} = 0,333$, Szenario B), so verringern sich deren wärmebezogenen CO_2 -Emissionen so weit (um $\Delta f^*_{\text{WP}}/\epsilon_{\text{WP}}$), dass kleine KWK-Anlagen kaum noch Vorteile erbringen, große KWK-Anlagen hingegen aber immer noch besser sind.

Ist außerdem auch die Referenzstromerzeugung emissionsarm ($f_{KW}^* = f_{WP}^* = 0,333$, Szenario C), so schneidet KWK ausnahmslos schlechter ab, während sie gegenüber Erdgasheizungen noch geringfügig besser ist.

Über die bis hierhin – für die Wärmepumpe als Referenzsystem – präsentierten Ergebnisse hinaus wurden sämtliche für die Erdgasheizung durchgeführten Berechnungen für die Wärmepumpe wiederholt. Eine Darstellung und Kommentierung dieser Ergebnisse wird hier jedoch nicht mehr vorgenommen, denn dies würde den Umfang der Arbeit mehr als verdoppeln, da die Zusammenhänge bei Wärmepumpen komplexer als bei Erdgasheizungen sind. Insbesondere aber würde dies den Zeitrahmen sprengen.

7 Zusammenfassung

Die Wirkung von KWK wird oft anhand von Beispielen erläutert, deren Aussagen nicht verallgemeinert werden können. Bei genauer Betrachtung wird – wie die hergeleiteten Berechnungsgleichungen zeigen – die Primärenergiebilanz durch 12 Parameter, die CO₂-Bilanz sogar durch 16 Parameter beeinflusst. In dieser Ausarbeitung wird lediglich die Einschränkung gemacht, dass die KWK-Anlagen erdgasbetriebene Motoren sind und die ergänzende Zusatzheizung konsequenterweise auch mit Erdgas betrieben wird. Dabei wird eine wärmeorientierte Betriebsweise unterstellt, d. h. die in KWK erzeugte Wärme wird vollständig genutzt.

Deutlich herausgearbeitet wird, dass eine willkürliche Variation von elektrischen und thermischen Nutzungsgraden der KWK-Anlagen nicht sachgerecht ist, da eine starke Abhängigkeit von der elektrischen Leistung besteht. Einer Zunahme des elektrischen Nutzungsgrades um 1 %-Punkt steht eine Abnahme des thermischen Nutzungsgrades um 1,5 %-Punkte gegenüber, so dass extrem große Unterschiede in den Strom-/Wärmeverhältnissen zwischen kleinen und großen KWK-Anlagen bestehen.

Für die Referenzstromerzeugung werden konventionelle Kraftwerke mit elektrischen Nutzungsgraden zwischen 35% und 60% sowie spezifischen CO₂-Emissionen zwischen 0,333 und 1,1 tCO₂/MWh_{el} zugrunde gelegt. Damit ist die gesamte Bandbreite von alten Braunkohlekraftwerken bis hin zu modernen GuD-Anlagen abgedeckt. Als Referenzwärmeerzeugung werden konventionelle Erdgasheizungen und im Vergleich dazu primärenergetisch wesentlich bessere elektrische Wärmepumpen betrachtet.

Im Folgenden werden einige der gewonnenen Erkenntnisse verkürzt wiedergegeben:

Die absoluten Einsparungen (Primärenergie und CO₂-Emissionen) sind immer proportional zur insgesamt bereitgestellten Wärme.

Die absoluten Einsparungen (Primärenergie und CO₂-Emissionen) sind immer linear abhängig vom Anteil A der KWK-Anlage an der Wärmeversorgung. Sind Zusatzheizung und Referenzheizung gleichwertig, so sind die absoluten Einsparungen sogar proportional zu A.

Wenige große KWK-Anlagen sind – bei gleicher Gesamtwärmeversorgung – erheblich effektiver als eine Vielzahl von kleinen KWK-Anlagen.

Die Vernachlässigung von Strom- und Wärmeverteilungsverlusten führt in den meisten Fällen zu einer eher pessimistischen Einschätzung der KWK, da die konventionelle Stromerzeugung in zentralen Großkraftwerken mit größeren Stromverteilungsverlusten verbunden ist und die Verluste bei der Wärmeverteilung auf Seiten der KWK nicht so sehr ins Gewicht fallen. Zwar verursachen sie einen erhöhten PE-Aufwand und vermehrte CO₂-Emissionen, die damit verbundene zusätzliche Stromerzeugung ist aber bei größeren KWK-Anlagen primärenergetisch in etwa genauso effektiv wie die in durchschnittlichen konventionellen Großkraftwerken, hinsichtlich der CO₂-Emissionen sogar deutlich besser und bei kleinen Anlagen fallen kaum Verluste bei der Wärmeverteilung an.

Jede in KWK erzeugte MWh Wärme kann den Einsatz von 0,5 bis 1,6 MWh Kohle in durchschnittlichen Großkraftwerken ($\eta_{elKW} = 0,40$) ersetzen.

Jede zusätzliche – gegenüber einer normalen Heizung – in KWK investierte MWh Erdgas kann den Einsatz von 1,9 bis 2,5 MWh Kohle in durchschnittlichen Großkraftwerken ersetzen.

KWK-Anlagen haben selbst dann einen geringeren Primärenergiebedarf und geringere CO₂-Emissionen, wenn sie gegen die Strom- und Wärmeerzeugung mit modernen GuD-Anlagen und Erdgasheizungen konkurrieren.

Die stromspezifischen CO₂-Emissionen der KWK können mit großer Genauigkeit auf 0,25 tCO₂ je MWh_{el} beziffert werden, wenn für die Referenzwärmeerzeugung Erdgasheizungen zugrunde gelegt werden. Sie sind damit 3- bis 4-mal geringer als die von Kohlekraftwerken.

Die absoluten CO₂-Einsparungen durch KWK gegenüber einer beliebigen Referenzstromerzeugung und einer Referenzwärmeerzeugung in Erdgasheizungen können mit großer Genauigkeit aus der erzeugten elektrischen Energie berechnet werden: $\Delta m_{CO_2} = (f_{KW}^* - 0,25) \cdot W_{elKW}$

Kleine KWK-Anlagen können primärenergetisch nicht gegen Wärmepumpen konkurrieren.

Hinsichtlich der CO₂-Emissionen sind Wärmepumpen, die mit Strom aus Kohlekraftwerken betrieben werden, in etwa gleichwertig mit Erdgasheizungen.

Gegenüber Strom aus modernen GuD-Anlagen und Wärmepumpen, die mit Strom aus solchen GuD-Anlagen betrieben werden, können selbst die größten KWK-Anlagen in keiner Weise konkurrieren.

Diese (unvollständige) Auflistung wichtiger Erkenntnisse zeigt die Möglichkeiten und Grenzen der erdgasbetriebenen Kraft-Wärme-Kopplung auf. In einer Übergangszeit hin zu einer regenerativen Strom- und Wärmeversorgung kann sie einen wichtigen Beitrag leisten, den Einsatz von Kohle zu substituieren und damit die CO₂-Emissionen zu reduzieren. KWK kann darüber hinaus aber noch viel mehr leisten. Der Focus liegt zurzeit auf dem Umbau der Stromversorgung, dabei wird die Erzeugung von Wärme häufig vernachlässigt. KWK kann Beides, Strom und Wärme bereitstellen. Hierin liegt die Stärke der KWK, da sie prinzipiell auch vermehrt mit Biogas/Biodiesel und mit Gas aus power-to-gas Systemen betrieben werden kann.

Welche Potentiale sich zeitnah und in der weiteren Zukunft durch KWK-Anlagen technisch und ökonomisch erschließen lassen, könnte die Zielsetzung einer weiteren Arbeit sein. Besonders interessant wäre es zu untersuchen, in wie weit bestehende Fernwärmenetze, die zu einem großen Anteil aus großen Kohlekraftwerken gespeist werden, zukünftig mit den in dieser Arbeit untersuchten KWK-Anlagen betrieben werden können.

Literaturverzeichnis

- [1] Bundesministerium für Justiz und Verbraucherschutz, „Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung (Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz - KWKG),“ 21. Dezember 2015. [Online]. Available: https://www.gesetze-im-internet.de/kwkg_2016/BJNR249810015.html#BJNR249810015BJNG000100000. [Zugriff am 24. Oktober 2017].
- [2] S. Gores, W. Jörß, R. Harthan, Dr. H. J. Ziesing und J. Horst, „KWK-Ausbau: Entwicklung, Prognose, Wirksamkeit der Anreize im KWK-Gesetz unter Berücksichtigung von Emissionshandel, Erneuerbare-Energien-Gesetz und anderen Instrumenten,“ Februar 2014. [Online]. Available: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/climate_change_02_2014_kwk-ausbau_entwicklung_prognose_wirksamkeit_der_anreize_im_kwk-gesetz_0.pdf. [Zugriff am 15. November 2017].
- [3] Umweltbundesamt, „Kraft-Wärme-Kopplung (KWK),“ 19. April 2017. [Online]. Available: <http://www.umweltbundesamt.de/daten/energiebereitstellung-verbrauch/kraftwaerme-kopplung-kwk#textpart-1>. [Zugriff am 24. Oktober 2017].
- [4] Statistisches Bundesamt, „Erzeugung Stromerzeugungsanlagen für die allgemeine Versorgung mit einer elektrischen Engpassleistung (brutto) von 1 Megawatt und mehr,“ August 2017. [Online]. Available: <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/Energie/Erzeugung/Tabellen/KWKAllVersorgMonat.html>. [Zugriff am 31. Oktober 2017].
- [5] eurostat, „Kraft-Wärme-Kopplung % der Brutto-Gesamtelektrizitätserzeugung,“ 11. August 2016. [Online]. Available: <http://ec.europa.eu/eurostat/tgm/table.do?tab=table&plugin=1&language=de&pcode=tsdcc350>. [Zugriff am 31. Oktober 2017].
- [6] Prof. Dr. G. Erdmann und Dipl.-Wirtsch.-Ing. L. Dittmar, „Technologische und energiepolitische Bewertung der Perspektiven von Kraft-Wärme-Kopplung in Deutschland,“ März 2010. [Online]. Available: https://www.ensys.tu-berlin.de/fileadmin/fg8/Downloads/Sonstiges/2010_KWK_Studie_Langversion_FGEnsys_TUBerlin.pdf. [Zugriff am 31. Oktober 2017].

- [7] M. Aslami, *Minderung von CO₂-Emissionen bei der Strom- und Wärmeerzeugung durch den Einsatz von Erdgas unter besonderer Berücksichtigung der Kraft-Wärme-Kopplung*, Hamburg, 2017.
- [8] ASUE Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V., *BHKW-Kenndaten 2014/2015 Module, Anbieter, Kosten*, Energiedruck Verlag für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch, 2014.
- [9] U. Kreutzer, „Stromübertragung Fakten und Prognosen: Kluger Stromtransport spart Milliarden,“ 1. Oktober 2014. [Online]. Available: <https://www.siemens.com/innovation/de/home/pictures-of-the-future/energie-und-effizienz/stromuebertragung-fakten-und-prognosen.html>. [Zugriff am 14. November 2017].
- [10] Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH; DLR-Institut für Technische Thermodynamik; Institut für Energetik und Umwelt, Leipzig, „Anforderungen an Nah- und Fernwärmenetze sowie Strategien für Marktakteure in Hinblick auf die Erreichung der Klimaschutzziele der Bundesregierung bis zum Jahr 2020,“ 7. Dezember 2006. [Online]. Available: http://www.dlr.de/Portaldata/41/Resources/dokumente/institut/system/publications/UBA_Nahwaerme_EB_111206.pdf. [Zugriff am 14. November 2017].
- [11] Umweltbundesamt, „Tabellarische Aufstellung der abgeleiteten Emissionsfaktoren für CO₂: Energie & Industrieprozesse - Kohlendioxid-Emissionsfaktoren für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen 1990-2015,“ 15. Januar 2017. [Online]. Available: <http://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/treibhausgas-emissionen>. [Zugriff am 1. November 2017].
- [12] P. Icha und G. Kuhs, „Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 – 2016,“ Mai 2017. [Online]. Available: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-05-22_climate-change_15-2017_strommix.pdf. [Zugriff am 13. November 2017].
- [13] IBS INGENIEURBÜRO FÜR HAUSTECHNIK SCHREINER - Heizung-Lüftung-Klima, „Kriterien, Kennzahlen, Wirtschaftlichkeit und Hinweise zur Auswahl von Wärmepumpen,“ 13. Dezember 2011. [Online]. Available: http://energieberatung.ibs-hlk.de/planwp_kriter.htm. [Zugriff am 7. November 2017].

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem o.a. formulierten Thema ohne unzulässige Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Datum:

Unterschrift:
(Nicola Korth)

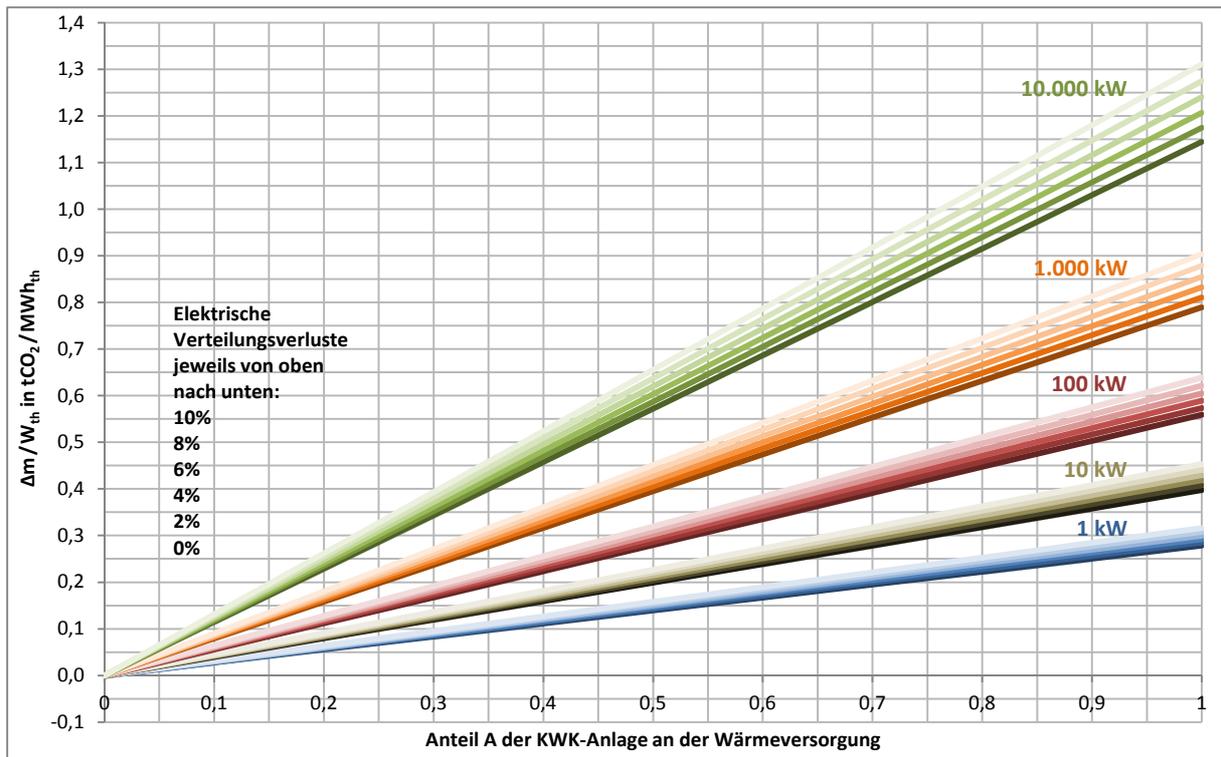
Anhang

A1 Wertetabelle zur Übersicht

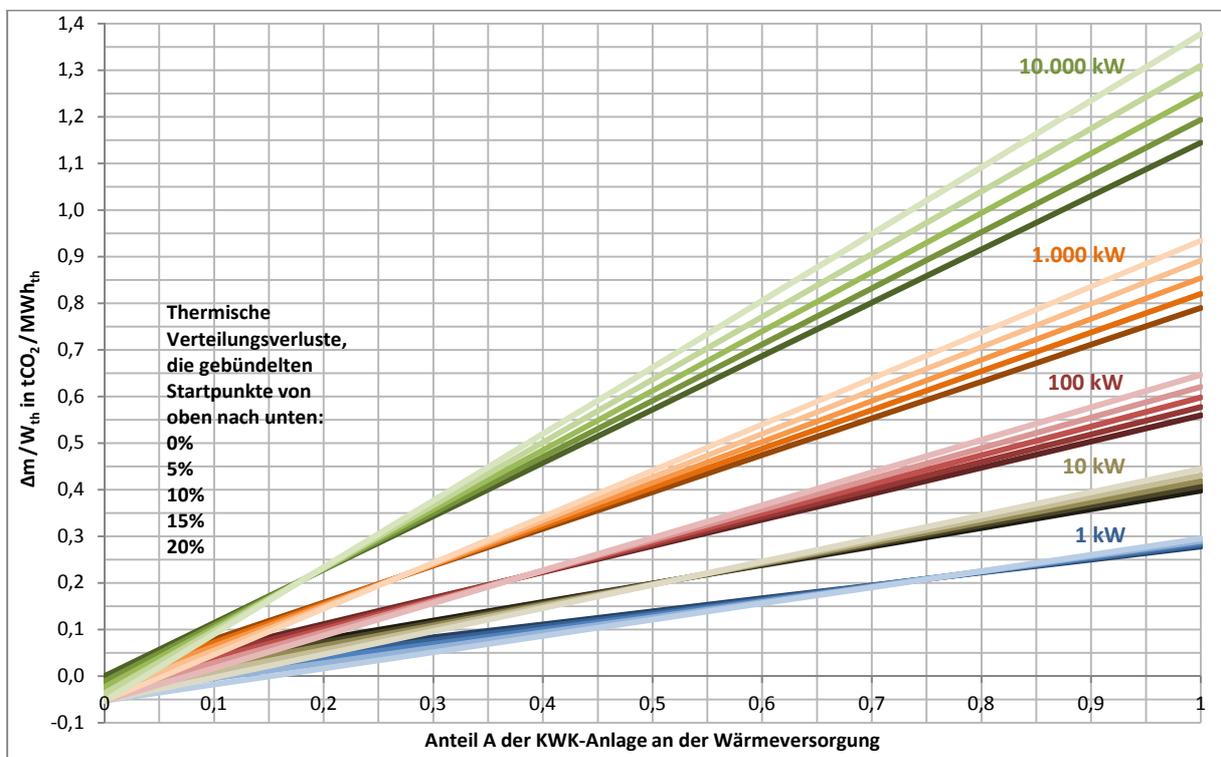
\dot{W}_{elKWK}	1 kW	10 kW	100 kW	1.000 kW	10.000 kW
η_{elKWK}	0,227	0,291	0,354	0,418	0,481
η_{thKWK}	0,735	0,639	0,544	0,448	0,353
W_{th}	1	1	1	1	1
A	1	1	1	1	1
W_{PEKWK}	1,361	1,565	1,839	2,231	2,834
W_{PEZH}	0	0	0	0	0
W_{PEKW}	0,772	1,137	1,628	2,330	3,410
W_{PEH}	1,053	1,053	1,053	1,053	1,053
ΔW_{PE}	0,464	0,625	0,842	1,152	1,629
f_{EG}	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
f^*_{KW}	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
m_{KWK}	0,272	0,313	0,368	0,446	0,567
m_{ZH}	0	0	0	0	0
m_{KW}	0,154	0,227	0,326	0,466	0,682
m_H	0,211	0,211	0,211	0,211	0,211
Δm	0,093	0,125	0,168	0,230	0,326

Anhang A1.1: Werte für beispielhafte Rechnung

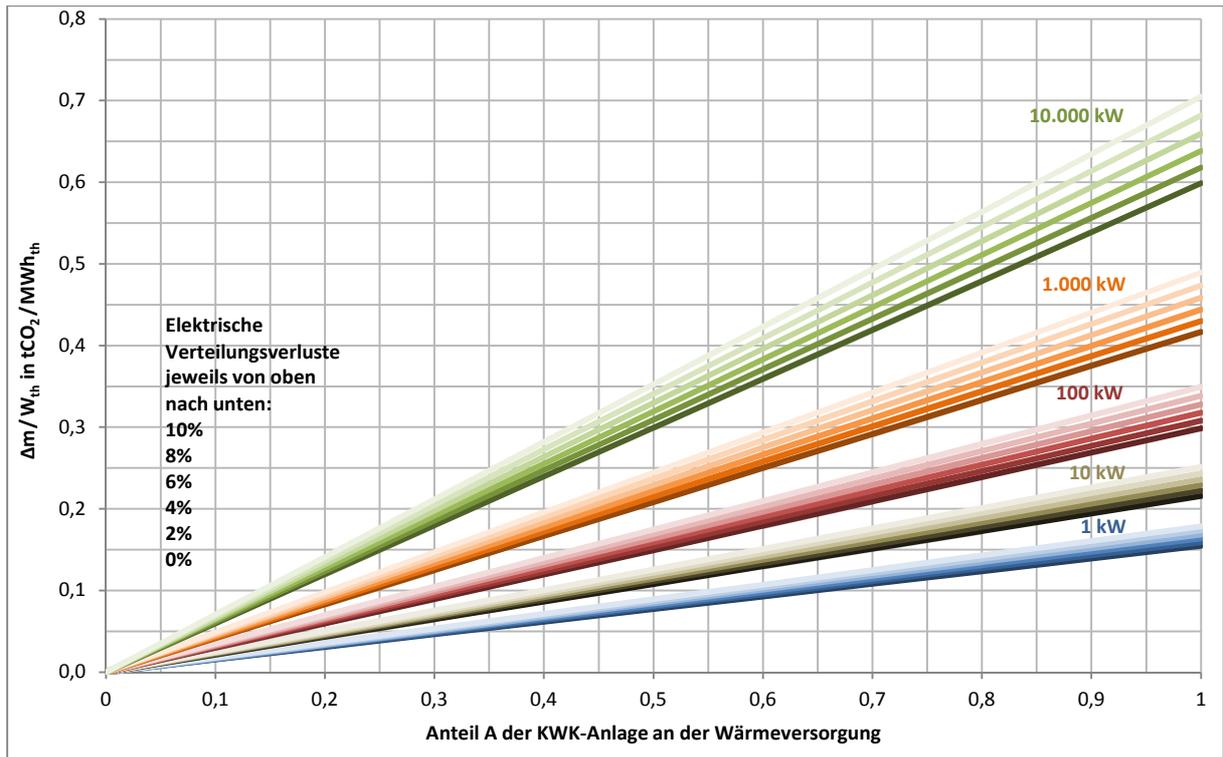
A2 Einfluss der Verteilungsverluste auf die CO₂-Einsparungen



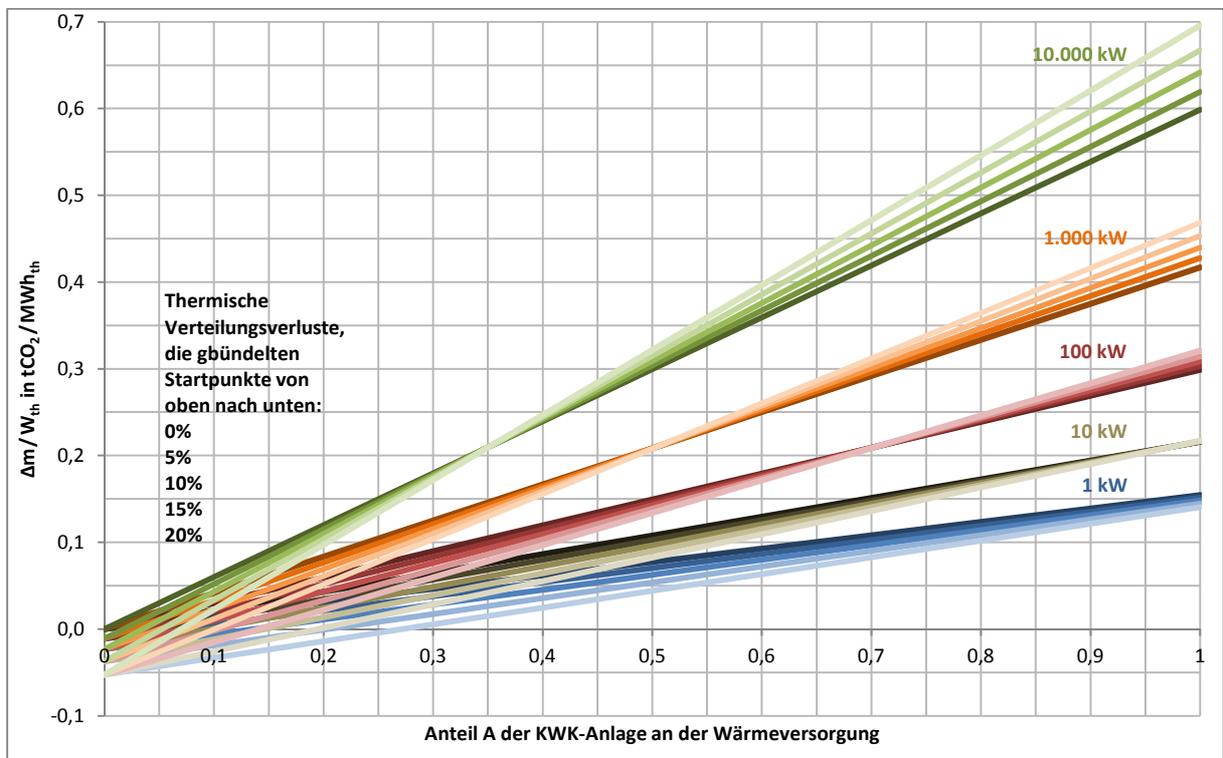
Anhang A2.1: Einsparungen an CO₂-Emissionen unter Einfluss der Stromverteilungsverluste für $f_{KW}^* = 1,1$



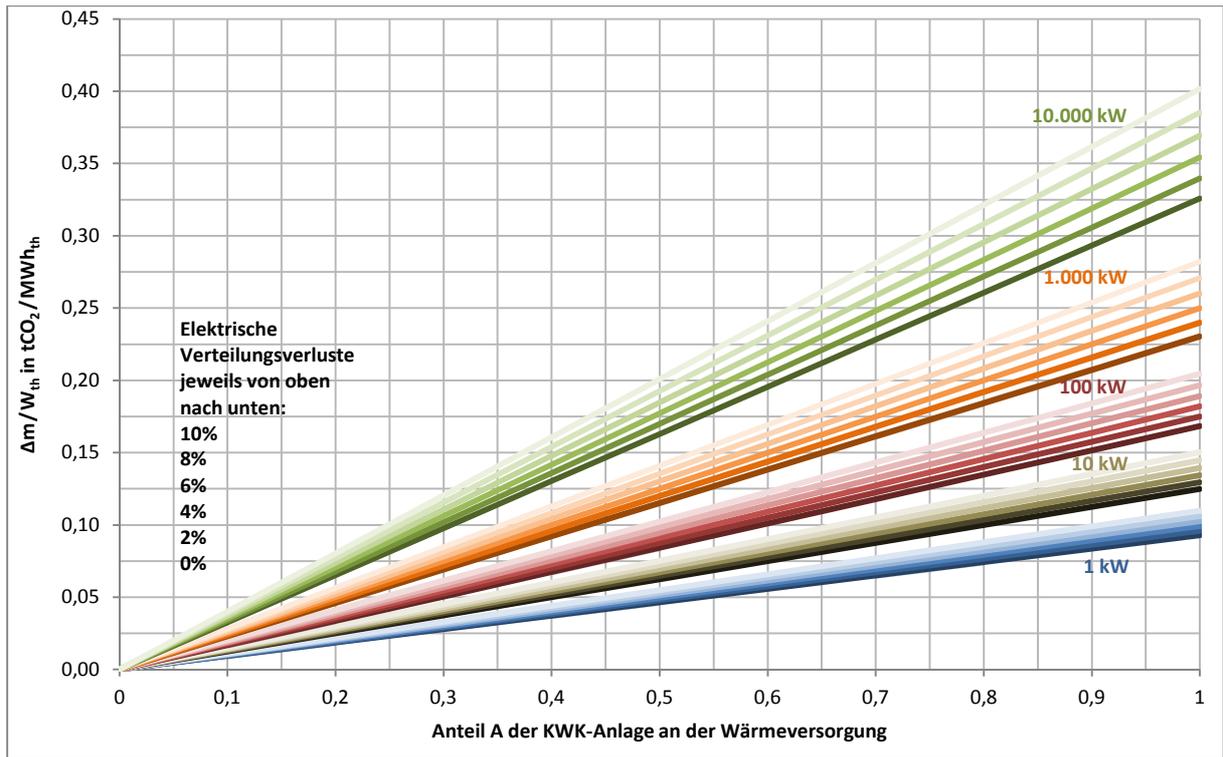
Anhang A2.2: Einsparungen an CO₂-Emissionen unter Einfluss thermischer Verteilungsverluste für $f_{KW}^* = 1,1$



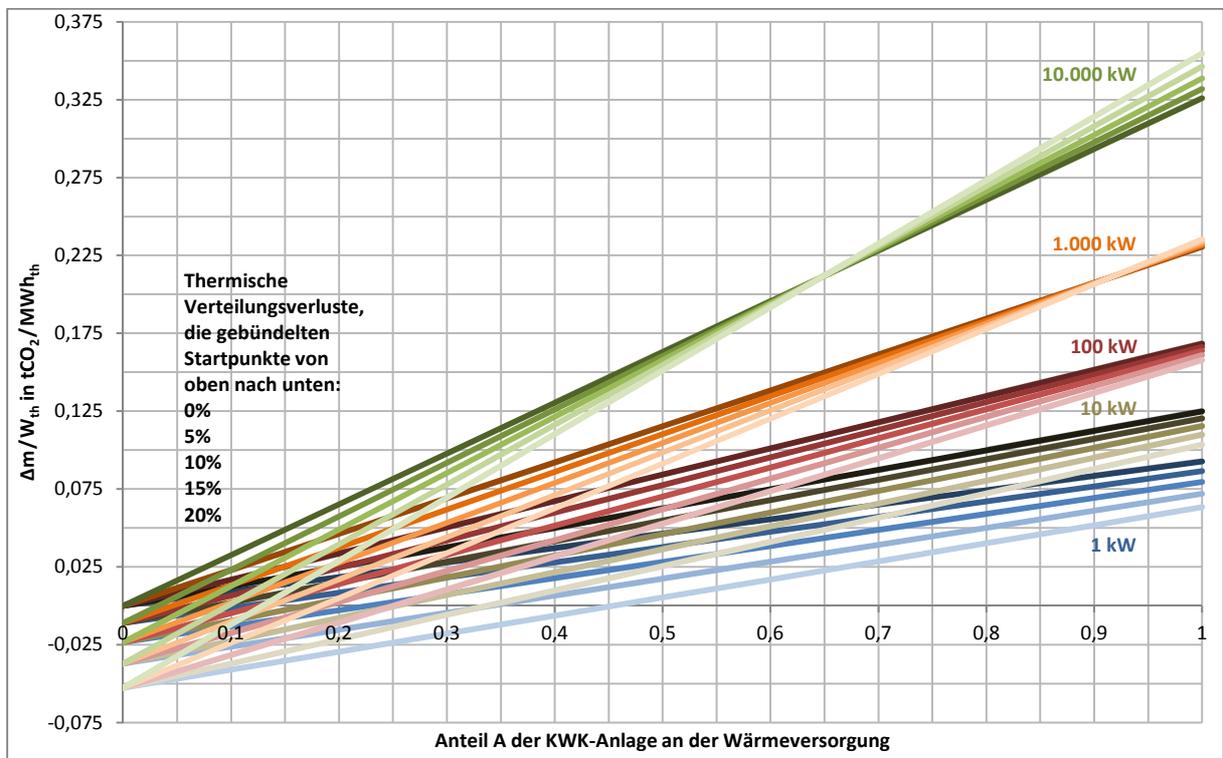
Anhang A2.3: Einsparungen an CO_2 -Emissionen unter Einfluss der Stromverteilungsverluste für $f_{KW}^* = 0,7$



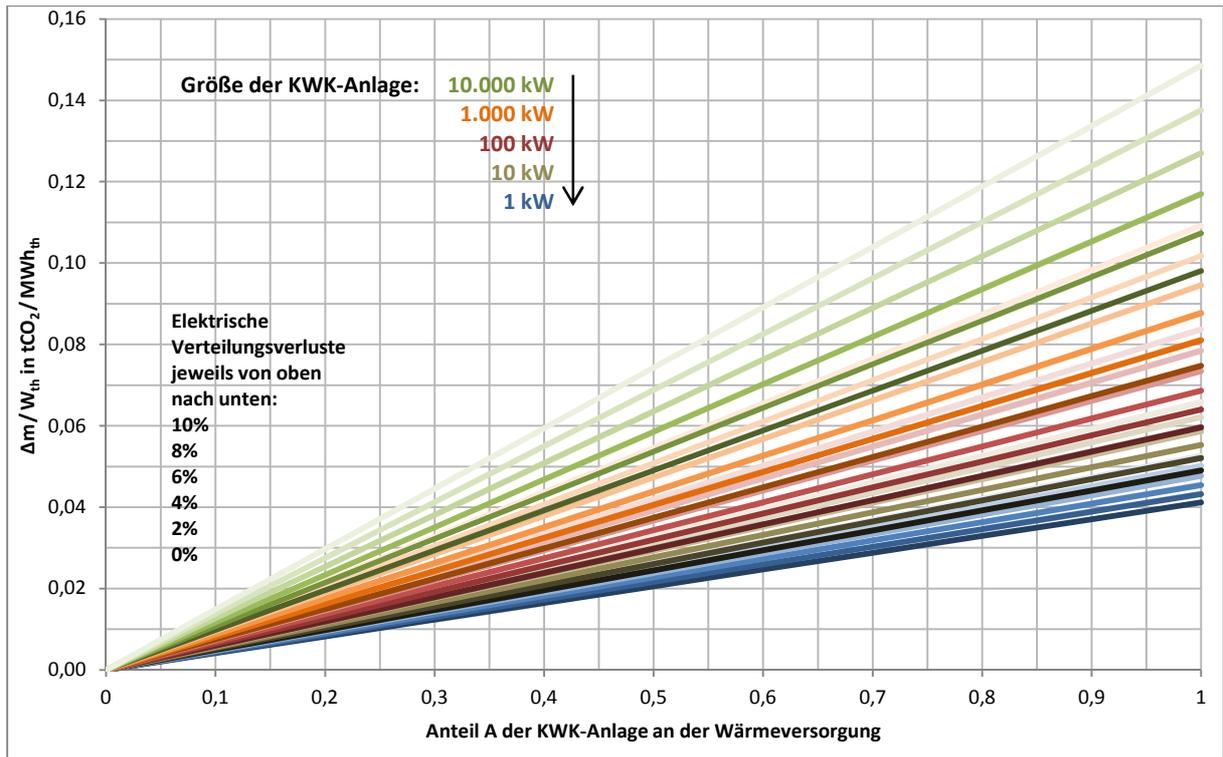
Anhang A2.4: Einsparungen an CO_2 -Emissionen unter Einfluss thermischer Verteilungsverluste für $f_{KW}^* = 0,7$



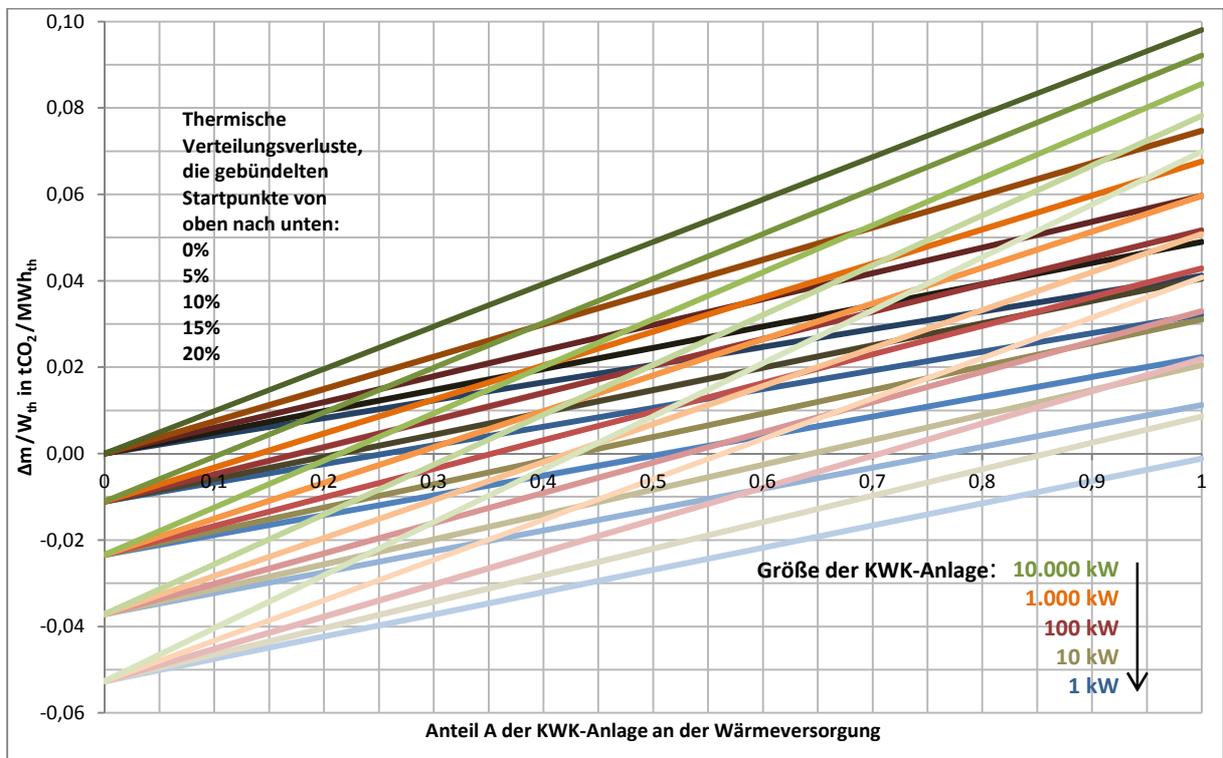
Anhang A2.5: Einsparungen an CO₂-Emissionen unter Einfluss der Stromverteilungsverluste für $f_{KW}^* = 0,5$



Anhang A2.6: Einsparungen an CO₂-Emissionen unter Einfluss thermischer Verteilungsverluste für $f_{KW}^* = 0,5$



Anhang A2.7: Einsparungen an CO₂-Emissionen unter Einfluss der Stromverteilungsverluste für $f^*_{KW} = 0,333$



Anhang A2.8: Einsparungen an CO₂-Emissionen unter Einfluss thermischer Verteilungsverluste für $f^*_{KW} = 0,333$