



PSI, Technology Assessment / GaBE

&

Axpo Holding AG

## **Systemvergleich von Strom- und Wärmeversorgung mit zentralen und dezentralen Anlagen**

Eine Studie im Rahmen des „Energietialog Schweiz“

Christian Bauer, Warren Schenler, Stefan Hirschberg, Adriana Marcucci,  
Peter Burgherr (PSI)

Stefan Roth, Niklaus Zepf (Axpo Holding AG)

Labor für Energiesystem-Analysen (LEA)

Email: [christian.bauer@psi.ch](mailto:christian.bauer@psi.ch)

Internet: <http://gabe.web.psi.ch/>

19.5.2009



# Inhaltsverzeichnis

<b>INHALTSVERZEICHNIS</b> .....	<b>1</b>
<b>ABBILDUNGEN</b> .....	<b>4</b>
<b>TABELLEN</b> .....	<b>7</b>
<b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS</b> .....	<b>8</b>
<b>VORWORT</b> .....	<b>9</b>
<b>ZUSAMMENFASSUNG</b> .....	<b>9</b>
<b>1 EINFÜHRUNG</b> .....	<b>12</b>
<b>2 RAHMEN UND ZIELSETZUNG DER STUDIE</b> .....	<b>13</b>
2.1 Inhalt und Rahmenbedingungen .....	13
2.2 Zielsetzung .....	15
2.3 Einschränkungen .....	15
2.3.1 Aussagekraft der vorliegenden Ergebnisse .....	15
2.3.2 Empfehlenswerte Erweiterungen .....	16
<b>3 CHARAKTERISIERUNG DER REFERENZTECHNOLOGIEN</b> .....	<b>17</b>
3.1 Dezentrale Systeme .....	17
3.1.1 Gekoppelte Strom- und Wärmeproduktion .....	17
3.1.1.1 Referenzsystem: BHKW 50 kW <sub>el</sub> (Magermotor) .....	17
3.1.1.2 Mini-BHKW 2 kW <sub>el</sub> .....	18
3.1.1.3 BHKW 160 kW <sub>el</sub> (Lambda-1 Motor) .....	18
3.1.1.4 BHKW 1000 kW <sub>el</sub> (Magermotor) .....	18
3.1.1.5 Sensitivitätsanalysen .....	19
3.1.2 Reine Wärmeproduktion .....	19
3.1.2.1 Gasheizung .....	19
3.1.2.2 Pelletsheizung .....	19
3.1.2.3 Wärmepumpe .....	19
3.1.2.4 Kombinierte Gas- und Solarheizung .....	20
3.2 Zentrale Systeme .....	20
3.2.1 Stromproduktion .....	20
3.2.1.1 GuD-Kombikraftwerk (Erdgas) .....	20
3.2.1.2 Kernenergie .....	20
3.2.1.3 Wasserkraft .....	20
3.2.1.4 Strommix .....	20
3.2.2 Wärmeproduktion .....	21
3.2.2.1 Wärmepumpe .....	21
3.3 Systembetrachtung .....	21
<b>4 EINFLUSS DEZENTRALER STROMERZEUGUNG AUF DIE KOSTEN VON NETZEN UND SYSTEMDIENSTLEISTUNGEN UND DIE PREISE DER STROMKUNDEN</b> .....	<b>33</b>
4.1 Ausgangslage .....	33
4.2 Einfluss der DE auf die Netzverluste .....	33
4.3 Einfluss der DE auf die Netzinvestitionen .....	34

4.4	Einfluss der DE auf die Kosten der Systemdienstleistungen .....	35
4.5	Heutige Kostenwälzung .....	36
4.6	Verursachergerechte Kostenwälzung .....	38
4.7	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.....	39
<b>5</b>	<b>INDIKATOREN ZUR BEWERTUNG DER SYSTEME .....</b>	<b>40</b>
5.1	Umwelt .....	40
5.1.1	Ressourcen .....	41
5.1.1.1	Fossile Primärenergie .....	41
5.1.1.2	Uran.....	42
5.1.1.3	Erze .....	42
5.1.2	Klimawandel .....	43
5.1.2.1	Treibhausgasemissionen.....	43
5.1.3	Ökosystem.....	44
5.1.3.1	Schäden an Flora und Fauna .....	44
5.1.4	Abfälle.....	45
5.1.4.1	Nicht radioaktive Abfälle.....	45
5.1.4.2	Radioaktive Abfälle .....	46
5.2	Soziale Aspekte .....	47
5.2.1	Menschliche Gesundheit .....	47
5.2.1.1	Normalbetrieb .....	47
5.2.1.2	Schwere Unfälle .....	48
5.2.2	Wahrgenommene Risiken .....	49
5.2.2.1	Risikoaversion (bei Unfällen) .....	49
5.2.2.2	Einschlusszeit für "kritische" Abfälle .....	50
5.2.3	Landschafts- und Siedlungsqualität .....	51
5.2.3.1	Visuelle Beeinträchtigungen .....	51
5.2.3.2	Verkehrsaufkommen (Gütertransport) .....	52
5.3	Wirtschaft .....	53
5.3.1	Leistungen der Branche.....	53
5.3.1.1	Beschäftigung.....	53
5.3.2	Wirkung auf die Kunden.....	54
5.3.2.1	Energiekosten.....	54
5.3.3	Versorgungssicherheit und Flexibilität .....	55
5.3.3.1	Beitrag zur Autonomie der Energieversorgung .....	55
5.3.3.2	Brennstoffpreisvolatilität.....	56
5.3.3.3	Flexibilität aufgrund der Grenzkosten aus Verbraucherperspektive.....	57
5.3.3.4	Flexibilität der Produktion .....	58
<b>6</b>	<b>MULTI-KRITERIEN-ANALYSE.....</b>	<b>60</b>
6.1	Interpretation .....	60
6.2	Gewichtung .....	61
6.2.1	„Standard“-Profil.....	61
6.2.1.1	Bereich "Einfamilienhaus" .....	63
6.2.1.2	Bereich "Mehrfamilienhaus" .....	63
6.2.1.3	Bereich "Gewerbe" .....	64
6.2.2	Sensitivität auf oberster Gewichtungsebene.....	66
6.2.2.1	Schwerpunkt „Umwelt“ .....	66
6.2.2.2	Schwerpunkt „Soziale Aspekte“ .....	68
6.2.2.3	Schwerpunkt „Wirtschaft“ .....	70
6.2.3	Fokus auf objektiven, direkten Schadenswirkung auf den Menschen .....	72

<b>7</b>	<b>SCHLUSSFOLGERUNGEN, EMPFEHLUNGEN UND AUSBLICK .....</b>	<b>75</b>
	<b>LITERATUR .....</b>	<b>77</b>
<b>8</b>	<b>ANHANG .....</b>	<b>81</b>
8.1	Daten zu Kosten und Arbeitsintensität.....	81
8.2	Definition der Netzebenen (NE).....	82
8.2.1	Definition "Smart Grid" (Wikipedia).....	83
8.2.2	Definition "Smart Meter" (Wikipedia).....	83

## Abbildungen

Abbildung 2.1	Elemente der verschiedenen Systeme zur Erzeugung von 1 TWh Strom und 1.8 TWh Wärme.	14
Abbildung 3.1	Abhängigkeit der Wirkungsgrade von BHKW von der Anlagenleistung (Heck 2004).	18
Abbildung 3.2	Bedarf und Bereitstellung von Raumwärme während des Gesamtjahres für die verschiedenen BHKW (Kurve der 2 kW <sub>el</sub> -Einheit entspricht jener des 50 kW <sub>el</sub> BHKW).	22
Abbildung 3.3	BHKW 2 kW <sub>el</sub> plus Strom aus CH-Produktionsmix.	24
Abbildung 3.4	BHKW 50 kW <sub>el</sub> .	24
Abbildung 3.5	BHKW 160 kW <sub>el</sub> plus Gasheizung.	25
Abbildung 3.6	BHKW 160 kW <sub>el</sub> plus Wärmepumpenheizung.	25
Abbildung 3.7	BHKW 160 kW <sub>el</sub> plus Pelletheizung.	26
Abbildung 3.8	BHKW 160 kW <sub>el</sub> plus Sonnenkollektorheizung plus Gasheizung.	26
Abbildung 3.9	BHKW 1000 kW <sub>el</sub> plus Gasheizung.	27
Abbildung 3.10	BHKW 1000 kW <sub>el</sub> plus Wärmepumpenheizung.	27
Abbildung 3.11	BHKW 1000 kW <sub>el</sub> plus Pelletheizung.	28
Abbildung 3.12	BHKW 1000 kW <sub>el</sub> plus Sonnenkollektorheizung plus Gasheizung.	28
Abbildung 3.13	Gaskombi-Kraftwerk plus Wärmepumpe EFH/MFH.	29
Abbildung 3.14	Kernkraftwerk plus Wärmepumpe EFH/MFH.	29
Abbildung 3.15	Wasserkraftwerk plus Wärmepumpe EFH/MFH.	30
Abbildung 3.16	CH-Strommix plus Wärmepumpe EFH/MFH.	30
Abbildung 3.17	Gaskombi-Kraftwerk plus Wärmepumpe Gewerbe/Industrie.	31
Abbildung 3.18	Kernkraftwerk plus Wärmepumpe Gewerbe/Industrie.	31
Abbildung 3.19	Wasserkraftwerk plus Wärmepumpe Gewerbe/Industrie.	32
Abbildung 3.20	CH-Strommix plus Wärmepumpe Gewerbe/Industrie.	32
Abbildung 4.1	Modell der Stromverteilung in der Schweiz, Zahlen 2004, in TWh, violett = Ausspeisungen, orange = Verluste (Frischknecht et al. 2007b).	33
Abbildung 4.2	Idealisierter qualitativer Verlauf der Ohm'schen Verluste im Niederspannungsnetz (Zeitpunkt- resp. Leistungsbetrachtung).	34
Abbildung 4.3	Durch die Quersubventionierung verursachte Kostensteigerung für die fremdversorgten Stromkunden.	36
Abbildung 4.4	Die sog. "Grid-Parity" ist erreicht, wenn die gesamten Kosten des aus dem Netz bezogenen Stroms gleich den reinen Erzeugungskosten der eigenen Stromproduktion sind. Sind diese wie im dar-gestellten Beispiel tiefer als die Gesamtkosten bei Netzbezug, ist die Eigenerzeugung aus unterneh-merischer Sicht des BHKW-Betreibers rentabel.	37
Abbildung 4.5	Stromgestehungskosten beim Haushaltkunden (Niederspannung, Kleinbezüger), Situation heute: Grau: Stromerzeugung; violett: Fixkosten Netz- und Systemdienstleistungen; orange: variable Kosten Netz- und Systemdienstleistungen.	38
Abbildung 4.6	Stromgestehungskosten beim Haushaltkunden (Niederspannung, Kleinbezüger), Situation in 30 Jahren: Grau: Stromerzeugung; violett: Fixkosten Netz- und Systemdienstleistungen; orange: variable Kosten Netz- und Systemdienstleistungen.	39

Abbildung 5.1	Fossiler Primärenergiebedarf (nur Resultate für EFH-Kombination „zentrale Stromproduktion + WP 5 kW <sub>th</sub> “ dargestellt).....	41
Abbildung 5.2	Nuklearer Primärenergiebedarf (nur Resultate für EFH-Kombination „zentrale Stromproduktion + WP 5 kW <sub>th</sub> “ dargestellt).....	42
Abbildung 5.3	Verbrauch an metallischen Erzen (nur Resultate für EFH-Kombination „zentrale Stromproduktion + WP 5 kW <sub>th</sub> “ dargestellt).....	43
Abbildung 5.4	Treibhausgasemissionen (nur Resultate für EFH-Kombination „zentrale Stromproduktion + WP 5 kW <sub>th</sub> “ dargestellt).....	44
Abbildung 5.5	Beeinträchtigung der Ökosystemqualität (nur Resultate für EFH-Kombination „zentrale Stromproduktion + WP 5 kW <sub>th</sub> “ dargestellt).....	45
Abbildung 5.6	Nicht radioaktive Abfälle (nur Resultate für EFH-Kombination „zentrale Stromproduktion + WP 5 kW <sub>th</sub> “ dargestellt).....	46
Abbildung 5.7	Radioaktive Abfälle (nur Resultate für EFH-Kombination „zentrale Stromproduktion + WP 5 kW <sub>th</sub> “ dargestellt).....	47
Abbildung 5.8	Verlorene Lebensjahre („YOLL“ – Years Of Life Lost; nur Resultate für EFH-Kombination „zentrale Stromproduktion + WP 5 kW <sub>th</sub> “ dargestellt).....	48
Abbildung 5.9	Todesfälle bei schweren Unfällen im Normalbetrieb (nur Resultate für EFH-Kombination „zentrale Stromproduktion + WP 5 kW <sub>th</sub> “ dargestellt).....	49
Abbildung 5.10	Maximale Zahl an Todesfällen im Fall von Störfällen (nur Resultate für EFH-Kombination „zentrale Stromproduktion + WP 5 kW <sub>th</sub> “ dargestellt).....	50
Abbildung 5.11	Relative Einschusszeit von kritischen (radioaktiven) Abfällen (relative Skala – je höher, desto schlechter; nur Resultate für EFH-Kombination „zentrale Stromproduktion + WP 5 kW <sub>th</sub> “ dargestellt).....	51
Abbildung 5.12	Visuelle Beeinträchtigung (relative Skala – je höher, desto schlechter; nur Resultate für EFH-Kombination „zentrale Stromproduktion + WP 5 kW <sub>th</sub> “ dargestellt).....	52
Abbildung 5.13	Verkehrsaufkommen durch Gütertransport (nur Resultate für EFH-Kombination „zentrale Stromproduktion + WP 5 kW <sub>th</sub> “ dargestellt).....	53
Abbildung 5.14	Arbeitsplätze (nur Resultate für EFH-Kombination „zentrale Stromproduktion + WP 5 kW <sub>th</sub> “ dargestellt).....	54
Abbildung 5.15	Energiekosten; blau: EFH, grün: MFH, orange: Industrie/Gewerbe.....	55
Abbildung 5.16	Autonomie der Energieversorgung (relative Skala – je höher, desto besser; nur Resultate für EFH-Kombination „zentrale Stromproduktion + WP 5 kW <sub>th</sub> “ dargestellt).....	56
Abbildung 5.17	Brennstoffpreisvolatilität (relative Skala – je niedriger, desto besser); blau: EFH, grün: MFH, orange: Industrie/Gewerbe.....	57
Abbildung 5.18	Grenzkosten der Energiebereitstellung (nur Resultate für EFH-Kombination „zentrale Stromproduktion + WP 5 kW <sub>th</sub> “ dargestellt).....	58
Abbildung 5.19	Flexibilität der Produktion (relative Skala – je höher, desto besser; nur Resultate für EFH-Kombination „zentrale Stromproduktion + WP 5 kW <sub>th</sub> “ dargestellt).....	59
Abbildung 6.1	MCDA-Resultat mit Standardgewichtung der Nachhaltigkeitsindikatoren für die Anlagen(kombinationen) im Bereich “Einfamilienhaus”.....	63
Abbildung 6.2	MCDA-Resultat mit Standardgewichtung der Nachhaltigkeitsindikatoren für die Anlagen(kombinationen) im Bereich “Mehrfamilienhaus”.....	64
Abbildung 6.3	MCDA-Resultat mit Standardgewichtung der Nachhaltigkeitsindikatoren für die Anlagen(kombinationen) im Bereich “Gewerbe/Industrie”.....	65

---

Abbildung 6.4	MCDA-Resultat für den Bereich „Einfamilienhaus“, Gewichtung mit Fokus „Umwelt“.	66
Abbildung 6.5	MCDA-Resultat für den Bereich „Mehrfamilienhaus“, Gewichtung mit Fokus „Umwelt“.	67
Abbildung 6.6	MCDA-Resultat für den Bereich „Gewerbe/Industrie“, Gewichtung mit Fokus „Umwelt“.	67
Abbildung 6.7	MCDA-Resultat für den Bereich „Einfamilienhaus“, Gewichtung mit Fokus „Soziale Aspekte“.....	68
Abbildung 6.8	MCDA-Resultat für den Bereich „Mehrfamilienhaus“, Gewichtung mit Fokus „Soziale Aspekte“.....	69
Abbildung 6.9	MCDA-Resultat für den Bereich „Gewerbe/Industrie“, Gewichtung mit Fokus „Soziale Aspekte“.....	69
Abbildung 6.10	MCDA-Resultat für den Bereich „Einfamilienhaus“, Gewichtung mit Fokus „Wirtschaft“.	70
Abbildung 6.11	MCDA-Resultat für den Bereich „Mehrfamilienhaus“, Gewichtung mit Fokus „Wirtschaft“.	71
Abbildung 6.12	MCDA-Resultat für den Bereich „Gewerbe/Industrie“, Gewichtung mit Fokus „Wirtschaft“.	71
Abbildung 6.13	MCDA-Resultat für den Bereich „Einfamilienhaus“ bei Gewichtungsprofil mit Schwerpunkt auf objektiven, direkten „Schadenswirkung“ auf den Menschen.....	73
Abbildung 6.14	MCDA-Resultat für den Bereich „Mehrfamilienhaus“ bei Gewichtungsprofil mit Schwerpunkt auf objektiven, direkten „Schadenswirkung“ auf den Menschen.....	74
Abbildung 6.15	MCDA-Resultat für den Bereich „Gewerbe/Industrie“ bei Gewichtungsprofil mit Schwerpunkt auf objektiven, direkten „Schadenswirkung“ auf den Menschen.....	74
Abbildung 8.1	Kostenaufschlüsselung für die Gesamtenergiekosten. ....	82
Abbildung 8.2	Einzelbeiträge zur Arbeitsintensität gesamt. ....	82
Abbildung A.8.3	Definition der Netzebenen (NE).....	82

---

## Tabellen

Tabelle 2.1	In dieser Studie berücksichtigte Technologieoptionen für die Nachhaltigkeitsbewertung. ....	13
Tabelle 3.1	Zusammensetzung des Stromversorgungsmix 2004 in der Schweiz, bilanziert nach (Frischknecht et al. 2007b) für diese Studie. ....	21
Tabelle 3.2	Kenndaten der BHKW und Kraftwerke in dieser Studie. ....	23
Tabelle 3.3	Kenndaten der Heizungen in dieser Studie. ....	23
Tabelle 4.1	Theoretisch maximal mögliche Kostenreduktion beim Netzausbau als Folge der dezentralen Stromeinspeisung in Österreich, ideale Annahmen (Werte = theoretische Obergrenze). ....	35
Tabelle 5.1	Indikatoren zur Nachhaltigkeitsbewertung in dieser Studie. ....	40
Tabelle 6.1	Gewichtungsfaktoren im „Standard-Profil“ dieser Studie. ....	62
Tabelle 6.2	Gewichtungsprofil mit Schwerpunkt auf objektiven, direkten „Schadenswirkung“ auf den Menschen. ....	72
Tabelle 8.1	Kostendaten und Schlüsselparameter für BHKW und Zusatzheizungen. ....	81
Tabelle 8.2	Kostendaten und Schlüsselparameter für zentrale Stromerzeugung und Wärmepumpen.	81

## Abkürzungsverzeichnis

BHKW	Blockheizkraftwerk
CC	Combined Cycle (entspricht einem GuD-Kombikraftwerk)
CHP	Combined Heat and Power (Wärme-Kraft-Kopplung)
DE	Dezentrale Erzeugung
EFH	Einfamilienhaus
ETS	Energetrialog Schweiz
GuD	Gas- und Dampf (Kombikraftwerk)
JAZ	Jahresarbeitszahl
KKW	Kernkraftwerk
LCIA	Life Cycle Impact Assessment
MCDA	„Multi-Criteria-Decision-Analysis“, Multi-Kriterien-Analyse
MFH	Mehrfamilienhaus
Nm <sup>3</sup>	Normkubikmeter
PE	Primärenergie
PDF	„Potentially Disappeared Fraction“ (entspricht dem Verlust an Artenvielfalt)
SCR	Selective Catalytic Reduction (zur Reduktion der Stickoxidemissionen im Abgas)
SDL	Systemdienstleistung
THG	Treibhausgasemissionen
WP	Wärmepumpe
YOLL	Years Of Life Lost

## Vorwort

Diese Studie wurde im Auftrag des „Energietrialog Schweiz (ETS)“ in Form einer Zusammenarbeit zwischen dem Paul Scherrer Institut, PSI (Labor für Energiesystem-Analysen), und der Axpo Holding AG erstellt. Sie geht auf den innerhalb des ETS geäusserten Wunsch nach einer detaillierten Bewertung von dezentralen, mit Erdgas betriebenen Stromerzeugungstechnologien aus Nachhaltigkeitsperspektive zurück. Eine dezentrale Stromerzeugung wird wiederholt als mögliche Alternative zu zentralen Grosskraftwerken zur (teilweisen) Deckung der in der Schweiz zu erwartenden „Stromlücke“ diskutiert. Die Arbeit erlaubt aufgrund der limitierenden Rahmenbedingungen noch keine abschliessende Antwort auf die Frage, ob und in welchem Ausmass dezentrale, mit Erdgas betriebene Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen (WKK) in Zukunft einen Platz haben sollen in einer nachhaltigen Versorgung der Schweiz mit Elektrizität und Wärme, die umweltfreundlich, kostengünstig und versorgungssicher sein soll. Mit der Studie wird quasi der „Ist-Zustand“ beleuchtet, da keine zukünftigen, sondern nur heute verfügbare, einzelne Technologien auf ihre Nachhaltigkeit hin bewertet werden. Der Einfluss dezentraler Stromerzeugung auf die Kosten von Netzen und Systemdienstleistungen und die Preise der Stromkunden wird grossteils qualitativ behandelt. Die Ergebnisse und Schlussfolgerungen erlauben einen grundsätzlichen Einblick in die Problematik der auf Erdgas basierenden dezentralen Energieversorgung sowie in die Art der Nachhaltigkeitsbewertung. Sie können auch als Basis für eine weitergehende, detailliertere Studie mit einem längeren Zeithorizont dienen, worin auch nicht auf Erdgas basierende dezentrale Systeme berücksichtigt werden könnten. Weiter wäre ein vertieftes, quantitatives Eingehen auf Netz- und Systemaspekte wünschenswert.

## Zusammenfassung

Diese Studie beinhaltet einen Vergleich einer Auswahl heutiger dezentraler und zentraler Systeme zur Strom- und Wärmeversorgung in Bezug auf die Nachhaltigkeit der verschiedenen Optionen.

Als dezentrale Systeme werden hier mit Erdgas betriebene Blockheizkraftwerke (BHKW) zur gekoppelten Produktion von Elektrizität und Wärme mit Leistungen zwischen  $2 \text{ kW}_{el}$  und  $1 \text{ MW}_{el}$  bezeichnet. Diese WKK-Anlagen werden mit Zusatzheizungen kombiniert, um die im Technologievergleich fallweise fehlende Nutzwärme bereitzustellen. Als zentrale Optionen werden die Kombinationen von Wärme ab Wärmepumpe mit Strom ab Erdgas-, Wasser- oder Kernkraftwerk bzw. dem Schweizer Stromversorgungsmix bewertet. Die Wärmepumpe wird jeweils mit Elektrizität aus dem entsprechenden Kraftwerkstyp (bzw. dem Strommix) versorgt. Dazu werden drei verschiedene Leistungskategorien von Wärmepumpen definiert, um einen fairen Vergleich mit den BHKW unterschiedlicher Leistung zu ermöglichen, d.h. es wird jeweils die Energieversorgung der drei Bereiche „Einfamilienhaus“ (EFH), „Mehrfamilienhaus“ (MFH) und „Gewerbe/ Industrie“ bewertet.

Der Einfluss dezentraler Stromerzeugung auf die Kosten von Elektrizitätsnetzen und Systemdienstleistungen sowie auf die Preise für die Stromkunden wird qualitativ behandelt und diskutiert. Dies beinhaltet Fragen der Netzverluste, Investitionen und Kosten der Systemdienstleistung sowie deren verursachergerechter Bezahlung im Zusammenhang mit dezentraler Stromproduktion.

Die Nachhaltigkeit der Systeme wird mit Hilfe eines „Multi-Kriterien Entscheidungswerkzeugs“ gemessen, dessen Ergebnis ein so genannter „Nachhaltigkeitsindex“ ist. Je höher dieser Index, desto besser entspricht ein System einer nachhaltigen Energieversorgung. Für die Multi-Kriterien-Analyse werden zahlreiche Indikatoren – wie z.B. Treibhausgasemissionen oder Energiekosten – in den drei Bereichen der Nachhaltigkeit „Umwelt“, „Soziale Aspekte“ und „Wirtschaft“ definiert und diese für jedes einzelne System gemessen. Aus diesen Resultaten für die einzelnen Indikatoren wird schliesslich der Nachhaltigkeitsindex berechnet, indem die verschiedenen Indikatoren gewichtet werden und die gewichteten Indikatorergebnisse addiert. Gewichtung der Indikatoren bedeutet, dass deren Bedeutung individuell festgelegt werden kann. Dies ermöglicht die Berücksichtigung unterschiedlicher Wertvorstellungen und Prioritäten im Hinblick auf eine nachhaltige Energieversorgung. Das bedeutet

aber auch, dass der Vergleich der Systeme je nach Schwerpunkt in der Gewichtung unterschiedlich ausfällt.

Bei der Gesamtheit der Umweltindikatoren ist kein eindeutiger Vorteil für einzelne Systeme feststellbar. Eine Gewichtung der Indikatoren mit Schwerpunkt auf dem heute als am wichtigsten angesehenen Umweltproblem, dem Klimawandel, bringt die Kombinationen Wasserkraft und (mit etwas Abstand) Kernenergie plus Wärmepumpe als beste Systeme in diesem Bereich. Die BHKW und das Erdgaskraftwerk schneiden dabei wegen des Erdgasverbrauchs und der damit verbundenen Treibhausgasemissionen weniger gut ab. Im Bereich soziale Aspekte ist eindeutig die Wasserkraft plus Wärmepumpe das beste System, beinahe unabhängig von der Gewichtung der einzelnen Indikatoren. Die Ergebnisse der anderen Systeme sind unterschiedlich, die meisten weisen Stärken und Schwächen in diesem Bereich auf. Auch über die Gesamtheit der wirtschaftlichen Indikatoren hinweg schneidet die Kombination Wasserkraft plus Wärmepumpe am besten ab. Die Ausnahme sind die Energiekosten, da sowohl der Strom ab Wasserkraftwerk als auch die Wärmepumpenheizung (speziell für Einheiten geringer Leistung) relativ teuer sind. Die mit der Wärmepumpe verbundenen Kosten nehmen jedoch bei steigender Anlagenleistung ab. Ein Faktor mit nennenswertem Einfluss auf die in dieser Studie berechneten Systemkosten ist die Art, wie die Kosten für Stromdienstleistungen (Kosten der Übertragungs- und Verteilungsnetze, Verluste, etc.) berücksichtigt werden. Die heutige Praxis der Verrechnung dieser Systemdienstleistungen – die auch bei der Berechnung des Indikators Energiekosten einfließt – entspricht einer Quersubvention der dezentralen Elektrizitätserzeugung. Beim Vergleich der Gesamtkosten für Strom und Wärme muss unterschieden werden zwischen den Bereichen EFH, MFH und Gewerbe/Industrie: im Bereich Einfamilienhäuser sind BHKW mit geringer Leistung vergleichsweise sehr teuer, d.h. zentrale Stromerzeugung plus Wärmepumpe ist deutlich günstiger. Bei Mehrfamilienhäusern und gewerblichen Anlagen nehmen die BHKW-Kosten mit steigender Anlagenleistung deutlich ab, was dazu führt, dass die Strom- und Wärmeversorgung aus BHKW bzw. zentralen Kraftwerken plus Wärmepumpe ähnliche Kosten aufweist.

Die Ergebnisse der Multi-Kriterien-Analyse, also der aggregierte Nachhaltigkeitsindex, hängen wie beschrieben von der Gewichtung der Indikatoren ab. Mit der vorgenommenen „Standardgewichtung“, die einer gesellschaftlich allgemein akzeptablen, konsensorientierten und von naturwissenschaftlichen Erkenntnissen geleiteten Gewichtung der Indikatoren entsprechen soll, ist die Kombination Wasserkraft plus Wärmepumpe das beste System (in allen Leistungsklassen), mit relativ geringem Abstand zur Option Kernenergie plus Wärmepumpe in allen Anlagenkategorien. Im Bereich Einfamilienhaus ist das BHKW mit geringer Anlagenleistung aufgrund der hohen Kosten im Nachhaltigkeitsvergleich wenig konkurrenzfähig, sofern kein sehr einseitiges Gewichtungsprofil gewählt wird. Die sinkenden Anlagenkosten mit steigender Leistung der BHKW führen dazu, dass die BHKW im Nachhaltigkeitsvergleich bei MFH und Industrie/Gewerbe besser abschneiden als bei EFH, abhängig von den Schadstoffemissionen etws besser oder schlechter als die Kombination GuD-Kraftwerk plus Wärmepumpe. Eine Verschiebung der Gewichte auf oberster Ebene (Umwelt, Soziale Aspekte, Wirtschaft) ausgehend vom Standard-Profil in Richtung Umwelt bringt Vorteile für die Systeme, die nicht mit Erdgas betrieben werden und somit sehr geringe Treibhausgasemissionen und kaum fossilen Ressourcenverbrauch aufweisen. Die Betonung der sozialen Indikatoren bringt deutliche Verbesserungen für Wasserkraft bzw. Erdgas-GuD-Kraftwerk plus Wärmepumpe sowie der BHKW-Varianten mit geringen Luftschadstoffemissionen, die Ergebnisse der restlichen Systeme bleiben ähnlich. Ein Fokus auf dem Bereich Wirtschaft (insbesondere Energiekosten) führt bei den Vergleichen in den Kategorien Mehrfamilienhaus und Gewerbe/Industrie zu Vorteilen der dezentralen Systeme und unter den zentralen Optionen der Kernenergie, während die Optionen Wasserkraft bzw. Erdgas-GuD-Kraftwerk plus Wärmepumpe aufgrund der höheren Stromproduktionskosten im Vergleich schlechter abschneiden. Dieses Verhalten spiegelt auch die heutige Kostenstruktur im Elektrizitätssystem wieder, d.h. die durch die „Nicht-Verrechnung“ der Systemdienstleistungen (Kosten von Stromübertragung und -verteilung) in gewissem Ausmass vorliegende Quersubvention der dezentralen Stromproduktion. Im Bereich Einfamilienhaus verschlechtert sich das Ergebnis des BHKW wegen der hohen Kosten markant. Die Sensitivitätsanalysen bzgl. BHKW-Emissionen zeigen einen grossen Einfluss des von der BHKW-Technologie abhängigen Emissionsverhaltens. Je nach

Gewichtung der beeinflussten Indikatoren (Schäden an der menschlichen Gesundheit und an Ökosystemen) schneiden „saubere“ BHKW gegenüber solchen mit höheren Emissionen im Nachhaltigkeitsvergleich markant besser ab.

Die vorliegende Studie ermöglicht zwar eine Nachhaltigkeitsbewertung einer Auswahl heutiger dezentraler und zentraler Systeme (Technologien), erlaubt aber keine abschliessende Beantwortung der Frage, ob und wenn ja welche Rolle dezentrale Systeme in einem zukünftigen, nachhaltigen Energiesystem in der Schweiz spielen sollen. Dazu fehlen einerseits erneuerbare dezentrale Technologien wie Windenergie und Photovoltaik, andererseits werden keine zukünftigen Technologien untersucht. Ausserdem wäre dazu die Modellierung der gesamten Energieversorgung inkl. verschiedener Zukunftsszenarien erforderlich. Dies würde nicht nur wie in der vorliegenden Studie die Bewertung verschiedener Optionen auf Basis der einzelnen Technologien beinhalten, sondern eine integrative Beurteilung verschiedener Alternativen für das Gesamtenergiesystem und damit die Berücksichtigung von Aspekten wie Versorgungssicherheit, Lastprofilen in der Stromversorgung, etc. ermöglichen.

# 1 Einführung

Der Einsatz von dezentralen Systemen zur Stromerzeugung in grossem Massstab als Alternative zu oder massive Ergänzung von Grosskraftwerken wurde und wird immer wieder kontrovers diskutiert. Heute besteht weitgehend gesellschaftlicher Konsens, dass dezentrale, neue erneuerbare Technologien wie Windkraftwerke, Photovoltaikanlagen, Solarkollektoren oder Kleinwasserkraftwerke in Zukunft eine grössere Rolle spielen müssen in einer nachhaltigen Schweizer Strom- und Wärmeversorgung, die umweltfreundlich, versorgungssicher und kostengünstig sein soll. Deren ökonomisch nutzbares Potenzial ist hierzulande jedoch beschränkt, auch wenn in den kommenden Jahren bei diesen Technologien von einer spürbaren Kostensenkung ausgegangen werden kann.

Substanzielle Beiträge zur Elektrizitäts- und Wärmeversorgung könnten von dezentralen, mit Erdgas betriebenen Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen (WKK) geleistet werden. Diese sind zwar nicht von der in der Schweiz begrenzten Verfügbarkeit natürlicher Ressourcen wie Wind, Wasser und Sonne eingeschränkt, allerdings vom fossilen Energieträger Erdgas abhängig, der in die Schweiz importiert werden muss. Wenn davon ausgegangen wird, dass in den kommenden Jahren Wind, Sonne und Wasser so weit wie wirtschaftlich und ökologisch vertretbar genutzt werden, stellt sich die Frage, ob dezentrale, mit Erdgas betriebene WKK-Anlagen eine sinnvolle Alternative zu den heute betriebenen bzw. in Zukunft möglicherweise zu errichtenden Grosskraftwerken sind, sei es Wasser-, Erdgas- oder Kernkraftwerke. Diese Frage soll vor dem Hintergrund der Zielsetzung einer nachhaltigen Energieversorgung in der Schweiz beantwortet werden, deren drei Hauptpfeiler Wirtschaftlichkeit, Umweltverträglichkeit und Versorgungssicherheit sind.

Diese Studie entspringt dem im Rahmen des Energietrialog Schweiz geäusserten Wunsches nach einer detaillierten Bewertung von dezentralen Stromerzeugungstechnologien hinsichtlich Nachhaltigkeit. Dezentrale Stromerzeugung wird von verschiedenen Seiten als mögliche Alternative zu Grosskraftwerken zur (teilweisen) Deckung der in der Schweiz absehbaren „Stromlücke“ angesehen. Die Studie soll eine erste Beurteilung der heute zur Verfügung stehenden Technologien ermöglichen: Dazu wird eine Nachhaltigkeitsbewertung von einer repräsentativen Auswahl an Referenzanlagen bzw. Systemkombinationen für die gemeinsame Versorgung mit Elektrizität und Raumwärme vorgenommen. Diese Bewertung geschieht mit einem so genannten „Multi-Kriterien-Bewertungswerkzeug“ anhand verschiedener Nachhaltigkeitsindikatoren, welche die Bereiche Umwelt, Wirtschaft und soziale Aspekte beinhalten. Diese Indikatoren müssen gewichtet werden und können so zu einer einzigen Masszahl aggregiert werden, was einen direkten Vergleich der unterschiedlichen Technologieoptionen hinsichtlich Nachhaltigkeit unter Berücksichtigung verschiedener Wertvorstellungen bzw. Interpretationen des Begriffs Nachhaltigkeit ermöglicht.

Die vorliegende Studie erlaubt es jedoch nicht, die Frage zu beantworten, ob eine nachhaltige Schweizer Energieversorgung in Zukunft mit zentralen oder dezentralen Technologien umgesetzt werden soll. Dazu wäre einerseits die Evaluierung zukünftiger Technologien nötig, d.h. von Systemen, die in 20 oder mehr Jahren am Markt verfügbar sein werden, und andererseits eine umfassendere Systembetrachtung, d.h. die Modellierung und Analyse von unterschiedlichen Szenarien der gesamten Energieversorgung.

## 2 Rahmen und Zielsetzung der Studie

### 2.1 Inhalt und Rahmenbedingungen

Diese Studie beinhaltet eine Bewertung der Nachhaltigkeit verschiedener Systeme bzw. Kombinationen von Technologien zur Produktion von Elektrizität und Raumwärme. Charakterisiert und bewertet werden einerseits dezentrale, mit Erdgas als Brennstoff betriebene Blockheizkraftwerke (BHKW) oder Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen (WKK), die gleichzeitig Strom und Wärme produzieren und zum Teil mit einer Zusatzheizung ergänzt werden und andererseits zentrale Grosskraftwerke zur Stromversorgung ergänzt durch Raumwärme ab Wärmepumpe. Die verschiedenen Kombinationen der einzelnen Technologien zu Gesamtsystemen sind in Tabelle 2.1 zusammengefasst. Schematische Darstellungen der einzelnen Technologiekombinationen zu den verschiedenen Gesamtsystemen sind in Kap. 3.3 zu finden.

**Tabelle 2.1 In dieser Studie berücksichtigte Technologieoptionen für die Nachhaltigkeitsbewertung.**

	Gesamtsystem "Strom + Wärme"	Stromerzeugung	zusätzliche Wärmequelle	zusätzliche Stromquelle
	<b>Dezentral</b>			
1	Mini-BHKW 2kW <sub>el</sub> + Strom ab Netz	Mini-BHKW 2kW <sub>el</sub>		Verbrauchsmix Schweiz ab Netz
2	BHKW 50kW <sub>el</sub> (Magermotor)			
3a	BHKW 160kW <sub>el</sub> (λ=1 Motor) + Gasheizung	BHKW 160kW <sub>el</sub>	Gasheizung	
3b	BHKW 160kW <sub>el</sub> (λ=1 Motor) + Wärmepumpe	BHKW 160kW <sub>el</sub>	Wärmepumpe (Strommix CH)	
3c	BHKW 160kW <sub>el</sub> (λ=1 Motor) + Solarkollektor + Gasheizung	BHKW 160kW <sub>el</sub>	Solarkollektor + Gasheizung	
3d	BHKW 160kW <sub>el</sub> (λ=1 Motor) + Pelletsheizung	BHKW 160kW <sub>el</sub>	Pelletsheizung	
4a	BHKW 1000kW <sub>el</sub> (Magermotor) + Gasheizung	BHKW 1000kW <sub>el</sub>	Gasheizung	
4b	BHKW 1000kW <sub>el</sub> (Magermotor) + Wärmepumpe	BHKW 1000kW <sub>el</sub>	Wärmepumpe (Strommix CH)	
4c	BHKW 1000kW <sub>el</sub> (Magermotor) + Solarkollektor + Gasheizung	BHKW 1000kW <sub>el</sub>	Solarkollektor + Gasheizung	
4d	BHKW 1000kW <sub>el</sub> (Magermotor) + Pelletsheizung	BHKW 1000kW <sub>el</sub>	Pelletsheizung	
5a*	Brennstoffzelle SOFC 200kW <sub>el</sub> + Gasheizung	SOFC 200kW <sub>el</sub>	Gasheizung	
5b*	Brennstoffzelle SOFC 200kW <sub>el</sub> + Wärmepumpe	SOFC 200kW <sub>el</sub>	Wärmepumpe (Strommix CH)	
5c*	Brennstoffzelle SOFC 200kW <sub>el</sub> + Solarkollektor + Gasheizung	SOFC 200kW <sub>el</sub>	Solarkollektor + Gasheizung	
5d*	Brennstoffzelle SOFC 200kW <sub>el</sub> + Pelletsheizung	SOFC 200kW <sub>el</sub>	Pelletsheizung	
6*	Stirling Micro-WKK 1kW <sub>el</sub>	Stirling-Motor 1kW <sub>el</sub>		Verbrauchsmix Schweiz ab Netz
	<b>Zentral **</b>			
7	Gas-Kombikraftwerk + Wärmepumpe	Gas-Kombikraftwerk (GuD)	Wärmepumpe (Strom ab Gas GuD)	
8	Kernenergie + Wärmepumpe	Kernenergie (KKW)	Wärmepumpe (Strom ab KKW)	
9	Wasserkraft + Wärmepumpe	Wasserkraft	Wärmepumpe (Strom ab Wasserkraftwerk)	
10	Strommix Schweiz + Wärmepumpe	Verbrauchsmix Schweiz ab Netz	Wärmepumpe (Strommix CH)	

\* Diese Systeme können nur in einer möglichen Bewertung zukünftiger Systeme analysiert werden, da sie heute nicht konkurrenzfähig sind.

\*\* Die zentralen Kraftwerke werden in dieser Studie nur mit der wahrscheinlich besten Option zur Wärmeversorgung kombiniert, nämlich mit Wärmepumpen. Kombinationen mit alternativen Heizungen sind möglich. Die Leistungen der Wärmepumpen werden den entsprechenden Vergleichsobjekten angepasst, d.h. für EFH dem 2 kW<sub>el</sub> BHKW, für MFH dem 50 kW<sub>el</sub> BHKW und für Gewerbe/Industrie dem 160 kW<sub>el</sub> bzw. 1000 kW<sub>el</sub> BHKW.

Sämtliche Systeme werden auf Basis vollständiger Lebenszyklen (LCA) analysiert, d.h. bei der Quantifizierung der Indikatoren werden nicht nur die WKK-Anlagen, Heizungssysteme und Kraftwerke untersucht, sondern die gesamten zugehörigen Energieketten – Brennstoffförderung, Transporte, Herstellung der Infrastruktur, Entsorgung der Abfälle, etc. Die LCA-Daten der heutigen

Technologien sowie LCA-Hintergrunddaten basieren grossteils auf dem Bestand der ecoinvent-Datenbank, Version 2.0 (ecoinvent data v2.0). Die Charakteristika der einzelnen Technologien sind in Kap. 3 zu finden.

Die Analyse beschränkt sich auf den Einsatz von WKK-Anlagen bzw. Heizungen in neu gebauten Häusern. Die Anwendung der Technologien bei Renovierungsmassnahmen hätte die Komplexität speziell für die ökonomischen Indikatoren stark erhöht und die vorgegebenen Zeit- und Budgetrahmen der Arbeiten bei weitem überschreiten.

Das 50 kW<sub>el</sub>-BHKW dient für die Bewertung quasi als Referenzsystem: WKK-Anlagen mit einem höheren elektrischen Wirkungsgrad, d.h. mit einer bei gleicher Stromproduktion vergleichsweise geringerer Wärmeproduktion werden für die Berechnung der Indikatoren mit reinen Heizungssystemen ergänzt. Das heisst, die „fehlende“ Wärmemenge im Gesamtsystem wird von einer zusätzlichen Heizung bereitgestellt; für diese Wärmeversorgung werden verschiedenen Optionen berücksichtigt (siehe Tabelle 2.1). WKK-Anlagen mit einem tieferen elektrischen Wirkungsgrad, d.h. mit einer im Vergleich zum 50 kW<sub>el</sub>-BHKW geringeren Stromproduktion werden durch Strom aus dem Netz (Schweizer Verbrauchsmix) ergänzt. Die „fehlende“ Strommenge wird also aus dem Netz bezogen.<sup>1</sup> Basierend auf den Charakteristika des 50 kW<sub>el</sub>-BHKW werden sämtliche Systeme mit einem fixen Verhältnis von Elektrizitäts- zu Nutzwärmeproduktion von 1 TWh zu 1.8 TWh verglichen. Abbildung 2.1 zeigt schematisch die Funktion der Gesamtsysteme zur Erzeugung von 1 TWh Strom und 1.8 TWh Wärme.

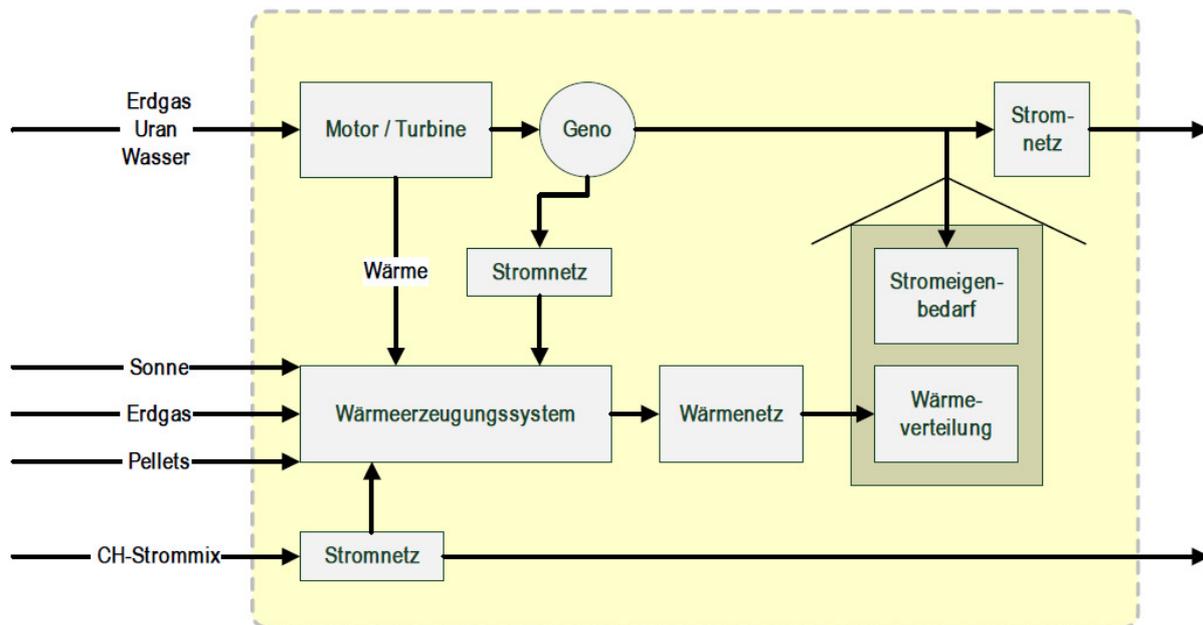


Abbildung 2.1 Elemente der verschiedenen Systeme zur Erzeugung von 1 TWh Strom und 1.8 TWh Wärme.

<sup>1</sup> Die Definition des Referenzsystems ist bei gekoppelter Strom- und Wärmeproduktion stets einem gewissen Mass an Willkür unterworfen. Das gilt insbesondere für die Annahmen bzgl. Systemerweiterung für die ergänzenden Wärme- und Stromquellen. Als Alternative zur Systemerweiterung wäre es auch möglich, Gutscheine für überschüssige Elektrizität und Wärme zu gewähren oder mit Allokationsfaktoren für die gekoppelte Wärme- und Stromproduktion in BHKW zu arbeiten. Dies würde aber am Problem der Willkür nichts ändern. Das 50 kW<sub>el</sub>-BHKW wird als Referenzanlage gewählt, da WKK-Anlagen aus kleineren elektrischen Leistungsklassen und entsprechend schlechterem elektr. Wirkungsgrad kaum jemals primär zur Strom-, sondern zur Wärmezeugung betrieben werden. Der Strom wird hier quasi nur als willkommenes Nebenprodukt betrachtet. Würde ein „Mini-BHKW“ mit im Vergleich zu den anderen WKK-Anlagen geringer Strom- und hoher Wärmeproduktion als Referenz gewählt, so müsste das Gesamtsystem für diese anderen WKK-Anlagen mit grossen Wärmemengen erweitert werden. Damit würden die Resultate der Indikatoren dieser WKK-Anlagen mit hoher Wahrscheinlichkeit von den Annahmen zur ergänzenden Wärmequelle dominiert, was nicht Ziel dieser Studie ist.

Aufgrund der Systemabgrenzungen werden Netze und Systemdienstleistungen in der Nachhaltigkeitsbewertung nur in beschränktem Ausmass quantitativ in Form von berechneten Indikatoren berücksichtigt. Diese Aspekte sind jedoch bei einem Vergleich von zentralen und dezentralen Stromerzeugungstechnologien wesentlich. Ergänzend werden jedoch qualitative Aussagen zu den volks- und betriebswirtschaftlichen Auswirkungen dezentraler Stromeinspeisung gemacht, siehe Kap. 4.

Für alle betrachteten Optionen zur Energieversorgung werden verschiedene Indikatoren aus den drei Bereichen der Nachhaltigkeit „Umwelt“, „Wirtschaft“ und „Soziale Aspekte“ gemessen. Diese sind in Kap. 5 inkl. der systemspezifischen Ergebnisse der Quantifizierung der Indikatoren beschrieben.

Die Nachhaltigkeitsbewertung der verschiedenen Systeme wird mithilfe eines einfachen „Multi-Kriterien-Analyse-Modells“ (MCDA-Modell), das die Berechnung eines so genannten Nachhaltigkeitsindex ermöglicht, durchgeführt (Kap. 6). Die Indikatoren zur Nachhaltigkeitsbewertung aus den drei Bereichen Ökologie, Wirtschaft und Gesellschaft können von Nutzern anhand persönlicher Präferenzen gewichtet werden. Alternativ zur individuellen Gewichtung durch die Nutzer können auch verschiedene Benutzerprofile (basierend auf den bisherigen Erfahrungen innerhalb des Dialogs bzw. aus der Verwendung des NHBM-Tools durch die Axpo) zur Gewichtung genutzt werden.

Mit dem Bewertungswerkzeug werden jeweils zentrale und dezentrale Optionen mit einem ähnlichen Einsatzzweck verglichen. D.h., die Leistung (oder Grösse) der mit dem Strom aus Grosskraftwerken betriebenen Wärmepumpe wird dem Leistungsbereich der im Vergleich jeweils gegenüberstehenden WKK-Anlage angepasst.

## **2.2 Zielsetzung**

Hauptziel dieser Studie ist eine Nachhaltigkeitsbewertung heutiger dezentraler Stromerzeugungstechnologien als Alternative zu zentralen Grosskraftwerken für die Schweizer Elektrizitätsversorgung. Dies soll durch die Anwendung eines einfachen MCDA-Modells mit ausgewählten Nachhaltigkeitsindikatoren, welche die drei Hauptpfeiler der Nachhaltigkeit – Umwelt, Wirtschaft und soziale Aspekte – abdecken, erreicht werden.

Im Rahmen dieser Bewertung sollen Stärken und Schwächen der verschiedenen Systeme hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeit sowie die Faktoren, die substantiellen Einfluss auf die Resultate des Systemvergleichs aufweisen, aufgezeigt werden. Weiter soll der Einfluss verschiedener Gewichtungsprofile, d.h. Wertvorstellungen oder Präferenzen hinsichtlich Nachhaltigkeit, auf die Ergebnisse des Nachhaltigkeitsindex herausgearbeitet und diskutiert werden.

Zusätzlich kann diese Studie als Basis eines weiterführenden Projekts dienen. Eine umfassende Beurteilung der Rolle der dezentralen Energieversorgung in einem zukünftigen, nachhaltigen Energiesystem der Schweiz würde einen merklich erweiterten Ansatz erfordern (siehe Kap. 2.3). Dies betrifft sowohl eine Erweiterung im Hinblick auf die bewerteten Technologien und den Zeithorizont der Studie, als auch die Modellierung und Analyse von Szenarien für das gesamte Energiesystem der Schweiz.

## **2.3 Einschränkungen**

### **2.3.1 Aussagekraft der vorliegenden Ergebnisse**

Mit den ausgewählten heutigen Technologien und der Anwendung des MCDA-Modells ermöglicht die Studie eine erste Beurteilung der heute zur Verfügung stehenden Technologien. Der berechnete Nachhaltigkeitsindex ist als relatives Mass dafür zu verstehen, wie die ausgewählten Optionen im Vergleich untereinander hinsichtlich Nachhaltigkeit aus heutiger Sicht abschneiden.

Die Auswahl der dezentralen Technologien beschränkt sich auf mit Erdgas betriebene WKK-Anlagen, was allgemein gültige Schlussfolgerungen hinsichtlich dezentraler Elektrizitätserzeugung nicht

erlaubt. Eine Ausweitung auf erneuerbare dezentralen Technologien hätte jedoch den vorgegebenen Rahmen bzgl. der zur Verfügung stehenden Ressourcen überstiegen. Bei den zentralen Grosskraftwerken zur Stromerzeugung sind alle aus heutiger Sicht wichtigen Optionen enthalten. Denkbar wäre als Ergänzung die Berücksichtigung von Stromimporten in die Schweiz, etwa aus Kohlekraftwerken oder Offshore-Windparks. Bei den Heizanlagen sind (mit Ausnahme von Heizöl) alle wichtigen Energieträger berücksichtigt. Allenfalls möglich wäre die Berücksichtigung weiterer Technologien wie etwa anderer Typen von Wärmepumpen, Holzschnitzelheizungen oder Fernwärme.

Bei der Auswahl des „Referenzsystems“ für die gemeinsame Elektrizitäts- und Wärmeproduktion und der daraus folgenden Kombination der Einzeltechnologien zum Gesamtsystem „Strom + Wärme“ mussten vor allem Annahmen hinsichtlich Betriebsverhalten der BHKW getroffen werden, die hauptsächlich Einfluss auf die Indikatoren im Bereich Wirtschaft haben, insbesondere die Systemkosten. Die Basisannahme, dass die WKK-Anlagen primär dem Raumwärmebedarf folgend betrieben werden („wärmegeführt“) und daher im Sommer kaum zur Stromproduktion beitragen können, und deren Auswirkung auf die einzelnen Indikatoren könnte mittels Sensitivitätsanalysen untersucht werden. Eine detaillierte Auswertung alternativer Annahmen hätte jedoch die für diese zur Verfügung stehenden Ressourcen überschritten.

### **2.3.2 Empfehlenswerte Erweiterungen**

Die eigentlich entscheidende Frage in Zusammenhang mit zentralen und dezentralen Technologien zur Energieversorgung ist es, ob ein nachhaltiges Schweizer Energiesystem in Zukunft eher mit zentralen oder dezentralen Technologien umgesetzt werden soll, bzw. welche Rolle zentrale und dezentrale Systeme in unserer Energieversorgung der Zukunft spielen können und sollen. Dies beinhaltet auch die Untersuchung möglicher Synergieeffekte verschiedener Systeme und zwangsweise die Erweiterung der Technologieauswahl auf nicht mit Erdgas betriebene dezentrale Anlagen wie etwa Photovoltaik-, Wind- und Biogaskraftwerke sowie Sonnenkollektoren.

Um darauf Antwort geben zu können, wäre einerseits die Evaluierung zukünftiger Technologien nötig, d.h. von Systemen, die in 20 oder mehr Jahren am Markt verfügbar sein werden, und andererseits eine umfassendere Systembetrachtung, d.h. die Modellierung und Analyse von unterschiedlichen Szenarien der gesamten Energieversorgung. Teil davon wäre auch die Evaluierung von Energiesparmassnahmen insbesondere im Gebäudebereich durch verbesserte Wärmedämmung. Die Bewertung von Szenarien für das Gesamtenergiesystem beinhaltet auch die Betrachtung zukünftiger Fortschritte im Bereich Stromnetz und -verteilung im Detail, was aus heutiger Sicht mit grösseren Unsicherheiten verbunden ist als die Abschätzung der evolutionären Technologieentwicklung für die Strom- und Wärmeproduktion.

## 3 Charakterisierung der Referenztechnologien

Im Folgenden werden die verschiedenen in dieser Studie betrachteten Systeme zur Bereitstellung von Strom und Wärme anhand der wichtigsten Kenndaten individuell beschrieben. Kap. 3.1 und 3.2 beinhalten die dezentralen (WKK-Anlagen zur gekoppelten Strom- und Wärmeproduktion; ergänzende Heizungen) bzw. zentralen Einheiten (Grosskraftwerke zur Stromproduktion). Für eine weitergehende Charakterisierung wird auf die angegebenen Originalquellen verwiesen. Wie schon in der Einleitung erläutert, beinhaltet diese Studie lediglich heutige Systeme. In Kap. 3.3 findet sich die Beschreibung, wie die einzelnen Technologien kombiniert werden, um auf gemeinsamer Basis die gleichzeitige Elektrizitäts- und Wärmeversorgung bewerten zu können.

### 3.1 Dezentrale Systeme

#### 3.1.1 Gekoppelte Strom- und Wärmeproduktion

Die vier betrachteten Blockheizkraftwerke werden mit Erdgas als Brennstoff betrieben. Sie unterscheiden sich in ihrer Grösse (technisch ausgedrückt: der elektrischen und thermischen Anlagenleistung) und im Verhältnis von Strom- zu Wärmeproduktion. Tendenziell steigt der elektrische Nutzungsgrad im Vergleich zum thermischen bei steigender Anlagenleistung. Das bedeutet aber nicht unbedingt, dass der energetische Gesamtwirkungsgrad (thermisch + elektrisch) steigt.

Es wird lediglich der Einbau der BHKW in neue Gebäude betrachtet. Damit ist zwar das Potenzial für die Umsetzung in der Praxis beschränkt, die Berücksichtigung des Einbaus von WKK-Anlagen und Heizungen im Rahmen der Renovierung und thermischen Sanierung von bestehenden Gebäuden würde jedoch die Komplexität der Bewertung übermässig steigern und den Rahmen dieser Arbeit sprengen.

Für alle BHKW wird als Ausgangsbasis angenommen, dass sie rund 4000 Stunden pro Jahr, dem Bedarf an Raumwärme folgend, betrieben werden (Ausnahme: 2000 h/a für das 2 kW<sub>el</sub> BHKW) und als „Hauptprodukt“ Raumwärme erzeugen (wird auch als „wärmegeführt“ bezeichnet). Das bedeutet, dass keine ungenutzte Abwärme in die Umgebung abgegeben wird. Details zu den sich daraus auf die Systembetrachtung ergebenden Folgerungen sind in Kap. 3.3 zu finden.

##### 3.1.1.1 Referenzsystem: BHKW 50 kW<sub>el</sub> (Magermotor)

Als Referenzsystem wird das BHKW mit der elektrischen Leistung von 50 kW deshalb bezeichnet, weil ausgehend vom Verhältnis Strom- zu Wärmeproduktion dieser Anlage (1:1.8) die anderen WKK-Anlagen entweder mit Strombezug aus dem Netz (im Fall eines kleineren elektrischen Wirkungsgrads) oder Wärme aus einer Zusatzheizung (im Fall eines höheren elektrischen Wirkungsgrads) ergänzt werden (Details in Kap. 3.3).

Die Systemcharakterisierung basiert auf den Angaben zum 50 kW<sub>el</sub>-Magermotor in (Heck 2007a)<sup>2</sup>. Der elektrische Nutzungsgrad beträgt 30%, der thermische 54%, was einen energetischen Gesamtwirkungsgrad von 84% ergibt. Diese Werte sind in gewissem im Anlagenbetrieb einstellbar, abhängig von den zu unterschreitenden Grenzwerten für Stickoxidemissionen (NO<sub>x</sub>). Mit Magermotoren kann dem Schweizer Grenzwert der Luftreinhalteverordnung (LRV 2000) von 250 mg/Nm<sup>3</sup> ohne Katalysator entsprochen werden, nicht jedoch strengeren Grenzwerten in Massnahmengebieten wie etwa Zürich oder Basel (50 bis 80 mg/Nm<sup>3</sup>). Dies würde den Einsatz von SCR-Katalysatoren (Selective Catalytic Reduction) oder 3-Wege-Katalysatoren in so genannten Lambda-1 Motoren erfordern.

---

<sup>2</sup> Basierend auf durchschnittlichen Angaben laut Hersteller.

### 3.1.1.2 Mini-BHKW 2 kW<sub>el</sub>

Das so genannte Mini-BHKW wird hauptsächlich zur Wärmeversorgung von Ein- oder Zweifamilienhäusern betrieben und speist den erzeugten Strom meist ins Netz ein. Die Anlage wird so ausgelegt, dass der Heizbedarf vollständig ohne Zusatzheizung gedeckt werden kann. Die Systemcharakterisierung basiert auf den Angaben zum 2 kW<sub>el</sub>-Mini-BHKW in (Heck 2007a).<sup>3</sup> Der elektrische Nutzungsgrad beträgt 25%, der thermische 65%, was einen energetischen Gesamtwirkungsgrad von 90% ergibt.

### 3.1.1.3 BHKW 160 kW<sub>el</sub> (Lambda-1 Motor)

Der 3-Wege-Katalysator im Lambda-1 Motor ermöglicht im Vergleich zum Magermotor geringere Luftemissionen (vor allem NO<sub>x</sub>), da eine Lambda-Sonde kontinuierlich das Verhältnis Luft/Brennstoff misst und über eine Steuerung der Luftzufuhr im optimalen Bereich hält. Die Systemcharakterisierung basiert auf den Angaben zum 160 kW<sub>el</sub>-Lambda-1 BHKW in (Heck 2007a).<sup>3</sup> Der elektrische Nutzungsgrad beträgt 32%, der thermische 55%, was einen energetischen Gesamtwirkungsgrad von 87% ergibt.

### 3.1.1.4 BHKW 1000 kW<sub>el</sub> (Magermotor)

Im Unterschied zu den hier betrachteten BHKWs mit elektrischen Leistungen bis 160 kW<sub>el</sub>, die Erdgas auf Niederdruckniveau beziehen, stammt der Brennstoff für die 1 MW<sub>el</sub>-Anlage aus dem Hochdrucknetz. Die Systemcharakterisierung basiert auf den Angaben zum 1 MW<sub>el</sub>-BHKW in (Heck 2007a).<sup>3</sup> Der elektrische Nutzungsgrad beträgt 38%, der thermische 44%, was einen energetischen Gesamtwirkungsgrad von 82% ergibt. Bei diesem Wert sind in dieser Studie implizit geringe Wärmeverluste bei der vergleichsweise aufwändigeren Wärmeverteilung in grösseren Industrie- und Gewerbegebäuden berücksichtigt.

Die verwendeten Wirkungsgrade der BHKW basieren hauptsächlich auf Herstellerangaben, die bezüglich Gültigkeit im Praxisbetrieb nicht überprüft werden können. Generell ist der in Abbildung 3.1 sichtbare Zusammenhang zwischen Anlagenleistung bzw. elektrischem und thermischem Wirkungsgrad feststellbar.

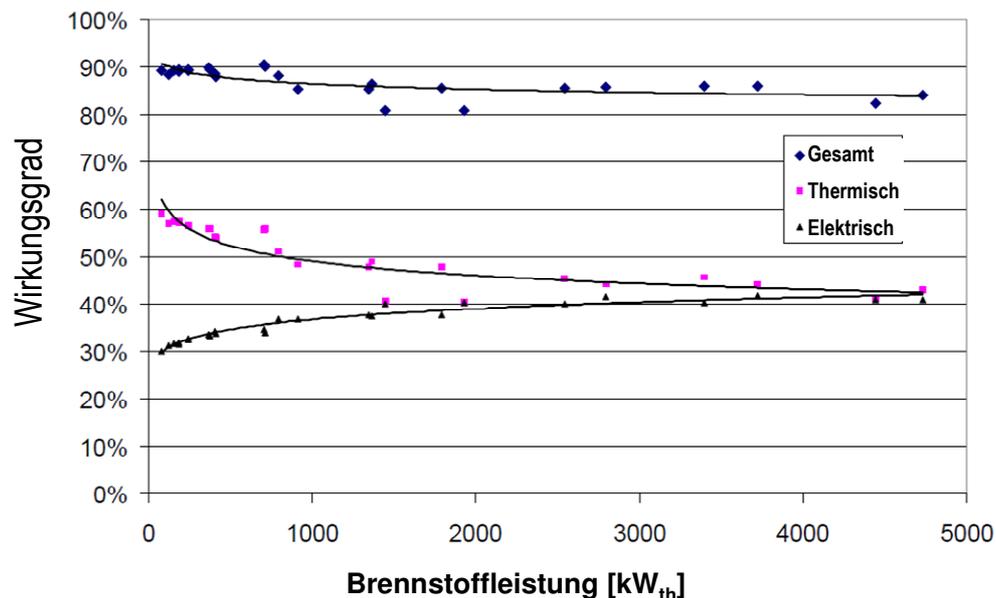


Abbildung 3.1 Abhängigkeit der Wirkungsgrade von BHKW von der Anlagenleistung (Heck 2004).

<sup>3</sup> Basierend auf durchschnittlichen Angaben laut Hersteller.

### 3.1.1.5 Sensitivitätsanalysen

Die beiden BHKW  $2 \text{ kW}_{\text{el}}$  und  $50 \text{ kW}_{\text{el}}$  werden zusätzlich zu den jeweiligen Referenztechnologien mit modifizierten Abgasemissionen bilanziert, um den Effekt der Anlagengrösse auf die Bewertungsindikatoren und den Systemvergleich unabhängiger vom Emissionsverhalten sichtbar zu machen. Das bedeutet, dass das  $50 \text{ kW}_{\text{el}}$  BHKW für die Sensitivitätsanalyse mit einem Katalysator ausgestattet wird, der das Emissionsniveau auf die entsprechend geringeren Werte des  $160 \text{ kW}_{\text{el}}$  BHKW bringt. Ausserdem wird das  $2 \text{ kW}_{\text{el}}$  BHKW zusätzlich mit den höheren Magermotor-Emissionswerten des  $50 \text{ kW}_{\text{el}}$  BHKW bilanziert. Die modifizierten Emissionswerte beinhalten Emissionen an  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NMVOC}$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  und Platin (wird im Katalysator eingesetzt).

Auf Ebene der Einzelindikatoren wirken sich diese Sensitivitätsanalysen auf die Ökosystemqualität (Kap. 5.1.3.1) und die Beeinträchtigung der menschlichen Gesundheit (Kap. 5.2.1.1) aus. In den Nachhaltigkeitsvergleichen (MCDA) sind die Auswirkungen jeweils grafisch dargestellt (Kapitel 6).

### 3.1.2 Reine Wärmeproduktion

Um im Gesamtsystem im gleichen Verhältnis Elektrizität und Wärme produzieren zu können wie das  $50 \text{ MW}_{\text{el}}$ -Referenz-BHKW, brauchen die WKK-Anlagen, die vergleichsweise weniger Wärme (bzw. mehr Strom) produzieren, als Ergänzung eine Zusatzheizung. In dieser Studie werden vier verschiedene Heizungen für den Vergleich betrachtet.

#### 3.1.2.1 Gasheizung

Hier wird eine moderne Gasheizung (modulierend und kondensierend) mit Anbindung ans Ortsgasnetz (Niederdruckniveau) betrachtet. Die Systemcharakterisierung basiert auf Angaben in (Faist Emmenegger et al. 2007). Beim Betrieb mit Abgaskondensation (Brennwerttechnik) lässt man den Wasserdampf kondensieren und gewinnt so zusätzlich einen Teil der im Wasserdampf enthaltenen latenten Wärme. Dadurch kann der Brennwert (= oberer Heizwert) des Erdgases genutzt werden. Bezogen auf den unteren Heizwert erreicht diese Heizung einen Wirkungsgrad von 102%.

#### 3.1.2.2 Pelletsheizung

Die betrachtete Pelletsheizung entspricht einer heute am Markt erhältlichen modernen Anlage. Die Systemcharakterisierung basiert auf Angaben in (Bauer 2007). Bezogen auf den unteren Heizwert erreicht diese Heizung einen Wirkungsgrad von 85%. Die Herstellung der Pellets ist in (Werner et al. 2007) beschrieben.

#### 3.1.2.3 Wärmepumpe

Für die Vergleiche in dieser Studie wurden unter den verschiedenen am Markt erhältlichen Wärmepumpentechnologien eine Anlagen mit Erdwärmesonde ausgewählt. Knapp die Hälfte der heute in der Schweiz verkauften Wärmepumpen nutzen diese Wärmequelle (Heck 2007b). Im Vergleich zur Nutzung der Umgebungsluft ermöglicht das Erdreich eine höhere Ausbeute, d.h. es kann mehr Umgebungswärme genutzt werden, das System ist effizienter. Hier wird für diesen Typ Wärmepumpe mit einer im Praxisbetrieb durchschnittlich erreichten Jahresarbeitszahl (Verhältnis von abgegebener Wärme zum Strombezug) von 3.9 gerechnet. Die Systemcharakterisierung basiert auf Angaben in für eine Anlage im Leistungsbereich von rund  $10 \text{ kW}_{\text{th}}$  für den Einsatz in Einfamilienhäusern (Heck 2007b).<sup>4</sup> Wird die Wärmepumpe als Zusatzheizung für das  $160 \text{ kW}_{\text{el}}$ -BHKW und das  $1 \text{ MW}_{\text{el}}$ -BHKW eingesetzt (für Gewerbe, Industrie, Einkaufszentren, Spitäler), so wird die Leistung der Wärmepumpe entsprechend nach oben angepasst, um die erforderliche Wärmemenge bereitstellen zu können. Dies wirkt sich vor allem die Anlagenkosten aus, die bei steigender Leistung der

<sup>4</sup> Für den Systemvergleich im Bereich „Einfamilienhaus“ wird dem  $2 \text{ kW}_{\text{el}}$  BHKW eine  $5 \text{ kW}_{\text{th}}$  Wärmepumpe gegenübergestellt. Diese spezifische Leistung wird bei den ökonomischen Indikatoren, bei denen der Einfluss der Anlagengrösse entscheidend ist, berücksichtigt.

Wärmepumpen erheblich sinken. Das bedeutet, dass sich daraus nur bei den Indikator „Energiekosten“ (Kap. 5.3.2.1) sowie „Brennstoffpreisvolatilität“ (Kap. 5.3.3.2) Unterschiede ergeben. Die möglichen Auswirkungen der WP-Leistung auf andere Indikatoren werden in erster Näherung als nicht relevant für die Ergebnisse der Nachhaltigkeitsbeurteilung (siehe Kap. 6) angesehen.

### **3.1.2.4 Kombinierte Gas- und Solarheizung**

Die Kombination einer Gasheizung (wie in Kap. 3.1.2.1) mit einem Sonnenkollektor, der Wasser für den Heiz- und Warmwasserkreislauf erwärmt, ermöglicht eine je nach Standort und Dimensionierung des Kollektors eine mehr oder weniger grosse Reduktion des Gasverbrauchs. Die Systemcharakterisierung basiert hier auf Angaben in (Jungbluth 2007). Der Anteil der Gasheizung an der durchschnittlichen Wärmebereitstellung beträgt 76%, jener des Flachkollektors 24%.

## **3.2 Zentrale Systeme**

### **3.2.1 Stromproduktion**

Für den Vergleich mit dezentralen Systemen in diese Studie wurden die drei für die Schweiz aus heutiger Sicht relevantesten Kraftwerkstechnologien zur zentralen Stromproduktion ausgewählt, dazu der heutige Stromversorgungsmix. Diese werden im Gesamtsystem zur Strom- und Wärmeversorgung durch eine Wärmepumpe, die mit Strom aus dem jeweiligen Kraftwerkstyp ergänzt.

#### **3.2.1.1 GuD-Kombikraftwerk (Erdgas)**

Das mit Erdgas als Brennstoff betriebene Kombikraftwerk ist die heute effizienteste Art der Stromerzeugung mit fossilen Energieträgern. Über einen Einsatz solcher Kraftwerke in der Schweiz wird heute diskutiert. Die Systemcharakterisierung basiert auf Angaben in (Faist Emmenegger et al. 2007), der elektrische Wirkungsgrad der Referenzanlage beträgt 57.5%.

#### **3.2.1.2 Kernenergie**

Referenz für Strom aus Kernenergie ist der heutige Schweizer Kernenergiemix. Die Systemcharakterisierung basiert auf Angaben in (Dones 2007).

#### **3.2.1.3 Wasserkraft**

Referenz für Strom aus Wasserkraft ist der heutige Schweizer Wasserkraftmix, in dem Speicherkraftwerke 54% und Laufkraftwerke 46% zur Elektrizitätserzeugung beitragen. Die Systemcharakterisierung basiert auf Angaben in (Bauer et al. 2007).

#### **3.2.1.4 Strommix**

Aus Vergleichsgründen wird auch der Stromversorgungsmix in der Schweiz betrachtet. Er beinhaltet neben der Produktion der Schweizer Kraftwerke auch Elektrizitätsimporte. Die Importe stammen hauptsächlich aus Frankreich und Deutschland, geringere Mengen auch aus Österreich und Italien. Konsistente Daten stehen für das Referenzjahr 2004 zur Verfügung (Frischknecht et al. 2007b). Die sich daraus ergebende Zusammensetzung des Strommix wird für diese Studie geringfügig vereinfacht (siehe Tabelle 3.1).

**Tabelle 3.1** Zusammensetzung des Stromversorgungsmix 2004 in der Schweiz, bilanziert nach (Frischknecht et al. 2007b) für diese Studie.

Wasserkraft	35.3%
Kernenergie	49.3%
Pumpspeicher	1.37%
Erdgas WKK	0.99%
Gaskraftwerk	2.76%
Diesel WKK	0.20%
Photovoltaik	0.02%
Wind	0.49%
Biogas	0.09%
Holz	0.17%
Steinkohle	3.70%
Braunkohle	2.45%
Erdöl	0.66%

### 3.2.2 Wärmeproduktion

Die zentrale Elektrizitätserzeugung wird für den Systemvergleich „Elektrizität + Nutzwärme“ mit den dezentralen WKK-Anlagen mit dezentraler Wärmeversorgung kombiniert (Details siehe Kap. 3.3).

#### 3.2.2.1 Wärmepumpe

Die Wärme stammt aus der in Kap. 3.1.2.3 beschriebenen Erdsonden-Wärmepumpe, die mit dem Strom aus den vier verschiedenen Optionen der zentralen Produktion betrieben wird.

Der Systemevaluierung dezentrale vs. zentrale Stromproduktion mit dem MCDA-Modell (siehe Kap. 6) erfolgt durch einen Vergleich der Kombination von Grosskraftwerken und einer Wärmepumpe gegenüber einem BHKW in jeweils ähnlicher Leistungsklasse. Das heisst, dass die mit zentral erzeugter Elektrizität kombinierte Wärmepumpe im Leistungsbereich  $5 \text{ kW}_{\text{th}}$  mit Strom und Wärme aus dem  $2 \text{ kW}_{\text{el}}$  BHKW verglichen wird. Die grösseren BHKW ( $50 \text{ kW}_{\text{el}}$ ,  $160 \text{ kW}_{\text{el}}$  und  $1 \text{ MW}_{\text{el}}$ ) werden jeweils Kombinationen von Strom aus Grosskraftwerken und Wärmepumpen mit passender Wärmeleistung gegenübergestellt. Dazu werden drei verschiedene Klassen definiert: „Einfamilienhaus“ ( $2 \text{ kW}_{\text{el}}$  BHKW, WP-EFH: ca.  $5 \text{ kW}_{\text{th}}$ ), „Mehrfamilienhaus“ ( $50 \text{ kW}_{\text{el}}$  BHKW, WP-MFH: ca.  $90 \text{ kW}_{\text{th}}$ ) und „Gewerbe/Industrie“ ( $160 \text{ kW}_{\text{el}}$  und  $1 \text{ MW}_{\text{el}}$  BHKW WP-Gewerbe: ca.  $275 \text{ kW}_{\text{th}}$ ).<sup>5</sup> Der Unterschied bezüglich der Nachhaltigkeitsindikatoren liegt bei Wärmepumpen verschiedener Leistung im Bereich Ökonomie, da Wärmepumpen mit steigender Anlagenleistung deutlich günstiger werden. Für die Nachhaltigkeitsbewertung der verschiedenen Systeme kann also in erster Näherung davon ausgegangen werden, dass nur bei den Indikatoren „Energiekosten“ (Kap. 5.3.2.1) sowie „Brennstoffpreisvolatilität“ (Kap. 5.3.3.2) differenziert werden muss.

### 3.3 Systembetrachtung

Da die dezentralen WKK-Anlagen, die im Zentrum dieser Studie stehen, gleichzeitig Elektrizität und Wärme produzieren, muss auch die Nachhaltigkeit dieser Produkte gemeinsam bewertet werden. Als Referenzsystem wird das  $50 \text{ kW}_{\text{el}}$ -BHKW gewählt, welches Strom und Wärme im Verhältnis 1:1.8 erzeugt. D.h., die Erzeugung von beispielsweise 1 TWh Elektrizität ist stets mit der Abgabe von

<sup>5</sup> Die Wärmepumpe in der Grössenklasse „Einfamilienhaus“ (Vergleich mit dem  $2 \text{ kW}_{\text{el}}$  BHKW) erzeugt pro Jahr ca. 10 MWh Raumwärme, jene in der Grössenklasse „Mehrfamilienhaus“ (Vergleich mit dem  $50 \text{ kW}_{\text{el}}$  BHKW) 360 MWh/a und jene in der Grössenklasse „Gewerbe“ (Vergleich mit dem  $160 \text{ kW}_{\text{el}}$  und  $1 \text{ MW}_{\text{el}}$  BHKW) 1100 MWh/a. Wärmepumpen mit einer ähnlich hohen Produktion wie das  $1 \text{ MW}_{\text{el}}$  BHKW sind in der Regel nicht als Massenprodukte erhältlich. Es wird hier davon ausgegangen, dass statt des  $1 \text{ MW}_{\text{el}}$  BHKW mehrere WP der Klasse „Gewerbe“ zum Einsatz kommen.

Wärme im Ausmass von 1.8 TWh verbunden. Es wird angenommen, dass die BHKW wie heute üblich „wärmegeführt“ betrieben werden, d.h. hauptsächlich während der Heizperiode, wenn Bedarf an Raumwärme besteht, womit sich eine jährliche Betriebsdauer von etwa 4000 Stunden ergibt. Dies kann im Gesamtsystem auch helfen, den im Winter gegenüber dem Sommer durchschnittlich höheren Stromverbrauch zu decken.<sup>6</sup>

Für einen konsistenten Vergleich müssen die anderen Systeme auf dieses Verhältnis ausgerichtet werden. Für die anderen WKK-Anlagen, deren gekoppelte Strom- und Wärmeproduktion in einem anderen Verhältnis geschieht, muss entweder Elektrizität oder Wärme aus Zusatzquellen bereitgestellt werden. Das 2 kW<sub>el</sub>-Mini-BHKW weist einen im Vergleich zum 50 kW<sub>el</sub>-BHKW niedrigeren elektrischen Nutzungsgrad auf, d.h. es produziert weniger Strom. Die fehlende Elektrizität wird vom Netz bezogen (Verbrauchsmix Schweiz). Die anderen beiden WKK-Anlagen (160 kW<sub>el</sub>-BHKW und 1 MW<sub>el</sub>-BHKW) haben höhere elektrische Nutzungsgrade als das 50 kW<sub>el</sub>-BHKW, es muss also Wärme aus Zusatzheizungen bereitgestellt werden um auf ein Verhältnis Strom zu Wärme von 1:1.8 zu kommen: 0.008 TWh beim 160 kW<sub>el</sub>-BHKW und 0.64 TWh beim 1 MW<sub>el</sub>-BHKW (siehe Abbildung 3.2). Um in der Bewertung ein möglichst breites Bild zu erhalten, werden jeweils vier Optionen betrachtet, d.h. das BHKW wird jeweils mit einer der vier Heizungen (Kap. 3.1.2) kombiniert, um die fehlende Wärme zu produzieren.

Die Zusatzheizungen werden jeweils so dimensioniert angenommen, dass deren thermische Leistung dreimal so hoch ist wie die der BHKW, damit sie wie in der Praxis üblich rund 1250 Stunden pro Jahr betrieben werden können. Die „überschüssige“ Wärme aus diesen Zusatzheizungen, d.h. jener Anteil, der nicht gebraucht wird, um das Verhältnis Strom:Wärme von 1:1.8 zu erreichen, wird als ausserhalb der für den in diesem Systemvergleich massgeblichen Systemgrenzen liegend definiert. Das bedeutet beispielsweise, dass bei den Kostenberechnungen nur jener Anteil an Wärme aus den Zusatzheizungen berücksichtigt dem Gesamtsystem angelastet wird, der gebraucht wird, um das Verhältnis Strom:Wärme von 1:1.8 zu erreichen.

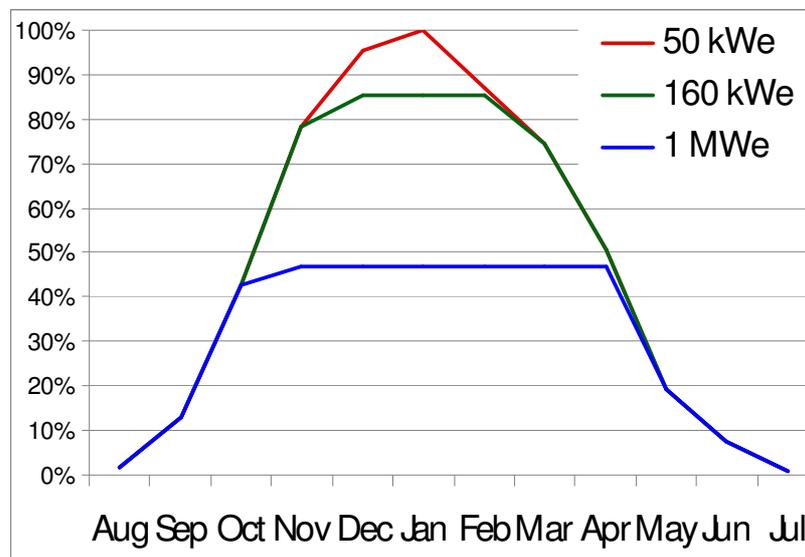


Abbildung 3.2 Bedarf und Bereitstellung von Raumwärme während des Gesamtjahres für die verschiedenen BHKW (Kurve der 2 kW<sub>el</sub>-Einheit entspricht jener des 50 kW<sub>el</sub> BHKW).<sup>7</sup>

<sup>6</sup> Der Unterschied zwischen monatlichem Maximum und Minimum im Stromverbrauch beträgt in der Schweiz im Monatsschnitt etwa 20% (BFE 2008).

<sup>7</sup> Die Gesamtfläche unter der roten Kurve entspricht der mit dem 50 kW<sub>el</sub> BHKW pro Jahr erzeugten Raumwärme. Bei gleicher Stromproduktion wird mit den BHKW höherer Leistung weniger Wärme erzeugt, was aus den entsprechend

Die zentrale Stromversorgung wird jeweils mit Wärme ab Wärmepumpe zu einem Gesamtsystem kombiniert. Die Wärmepumpe wird jeweils mit Elektrizität aus der jeweiligen Stromquelle betrieben. Das bedeutet, Strom aus den Grosskraftwerken (bzw. der Versorgungsmix) wird jeweils im Umfang von 1 TWh (als Elektrizität allgemein verbraucht) plus 0.46 TWh (als Elektrizität für den Betrieb der Wärmepumpe, die damit 1.8 TWh Raumwärme produziert) bezogen.

Die wichtigsten Eckdaten der Anlagen in dieser Studie und die verglichenen Systemzusammensetzungen zur gleichzeitigen Strom- und Wärmeproduktion sind in Tabelle 3.2 und Tabelle 3.3 zusammengefasst.

**Tabelle 3.2 Kenndaten der BHKW und Kraftwerke in dieser Studie.**

		Mini-BHKW 2kW <sub>el</sub> (Erdgas)	BHKW 50kW <sub>el</sub> (Erdgas- Magermotor)	BHKW 160kW <sub>el</sub> (Erdgas λ=1 Motor)	BHKW 1000kW <sub>el</sub> (Erdgas- Magermotor)	Erdgas GuD- Kombi- kraftwerk	Kernkraft- werk <sup>b</sup>	Wasserkraft- werk <sup>c</sup>	Strommix CH (Verbrauchs-mix inkl. Import)
Nutzungsgrad elektrisch		0.25	0.3	0.32	0.38	0.575	0.31	k.A.	k.A.
Nutzungsgrad thermisch		0.65	0.54	0.55	0.44	0	0	0	0
Nutzungsgrad gesamt		0.90	0.84	0.87	0.82				
Stromproduktion	TWh	0.69	1	1	1	1	1	1	1
Wärmeproduktion	TWh	1.80	1.80	1.72	1.16	0	0	0	0
Strombezug extern (Verbrauchsmix CH)	TWh	0.31	0	0	0	0	0	0	0
Wärmebezug extern	TWh	0	0	0.08	0.64	1.80	1.80	1.80	1.80
Lebensdauer	a	20	20	20	20	36	40	120 <sup>d</sup>	k.A.
Auslastung	h/a	2000 <sup>a</sup>	4000 <sup>a</sup>	4000 <sup>a</sup>	4000 <sup>a</sup>	5000	7400	3213 <sup>e</sup>	k.A.

- <sup>a</sup> Basisannahme; Betrieb folgt dem Wärmebedarf ("wärmegeführt")
- <sup>b</sup> Kernenergiemix Schweiz
- <sup>c</sup> Wasserkraftmix Schweiz: 54% Speicher, 46% Laufkraft
- <sup>d</sup> angenommene Lebensdauer Speicher 150 a, Laufkraftwerke 80 a
- <sup>e</sup> durchschnittliche Auslastung Speicher: 2080 h/a; Laufkraft 4540 h/a
- <sup>f</sup> jeweils eine der 4 Zusatzheizungen bei BHKW bzw. Wärmepumpe in Kombination mit Grosskraftwerken

**Tabelle 3.3 Kenndaten der Heizungen in dieser Studie.**

		Gasheizung	Wärmepumpe	Pelletsheizung	Solkollektor + Gasheizung
Nutzungsgrad thermisch	%	1.02	3.9 <sup>a</sup>	0.85	1.02
Lebensdauer	a	20	20	15	25
Auslastung	h/a	1250 <sup>b</sup>	1250 <sup>b</sup> / 4000 <sup>d</sup>	1250 <sup>b</sup>	950 <sup>c</sup>

- <sup>a</sup> Jahresarbeitszahl = abgegebene Wärme / Strombezug
- <sup>b</sup> gilt für den Einsatz als Zusatzheizung als Ergänzung zu BHKW
- <sup>c</sup> gilt für Gasanteil der Zusatzheizung als Ergänzung zu BHKW
- <sup>d</sup> gilt für den Einsatz als Heizung im System mit Strom aus zentralen Grosskraftwerken

Die folgenden Schemata (Abbildung 3.3 bis Abbildung 3.20) zeigen die bei den einzelnen Gesamtsystemen relevanten Abgrenzungen und Komponenten bzw. Energie- und Stoffflüsse, jeweils in rot.

kleineren Flächeninhalten unterhalb der grünen bzw. blauen Kurve ersichtlich ist. Der Flächeninhalt zwischen grüner und roter bzw. blauer und roter Kurve (genauer: oberhalb der grünen bzw. blauen und unterhalb der roten Kurve) entspricht dem Bedarf von Wärme ab Zusatzheizung in Kombination mit dem 160 kW<sub>el</sub> bzw. dem 1 MW<sub>el</sub> BHKW.

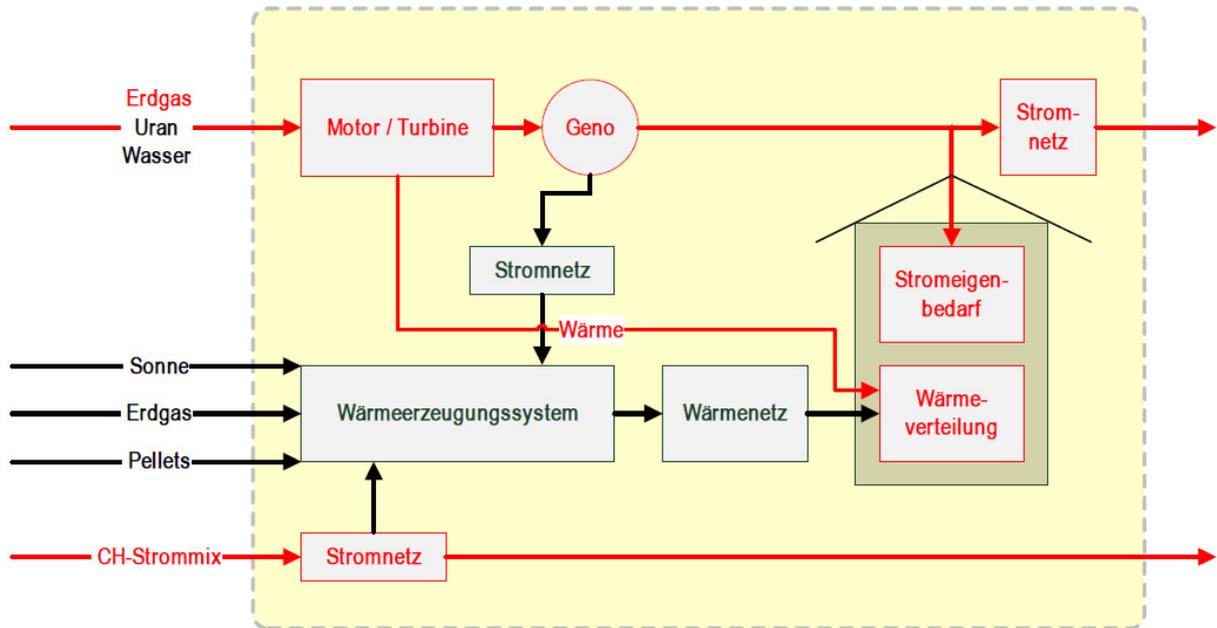


Abbildung 3.3 BHKW 2 kW<sub>el</sub> plus Strom aus CH-Produktionsmix.

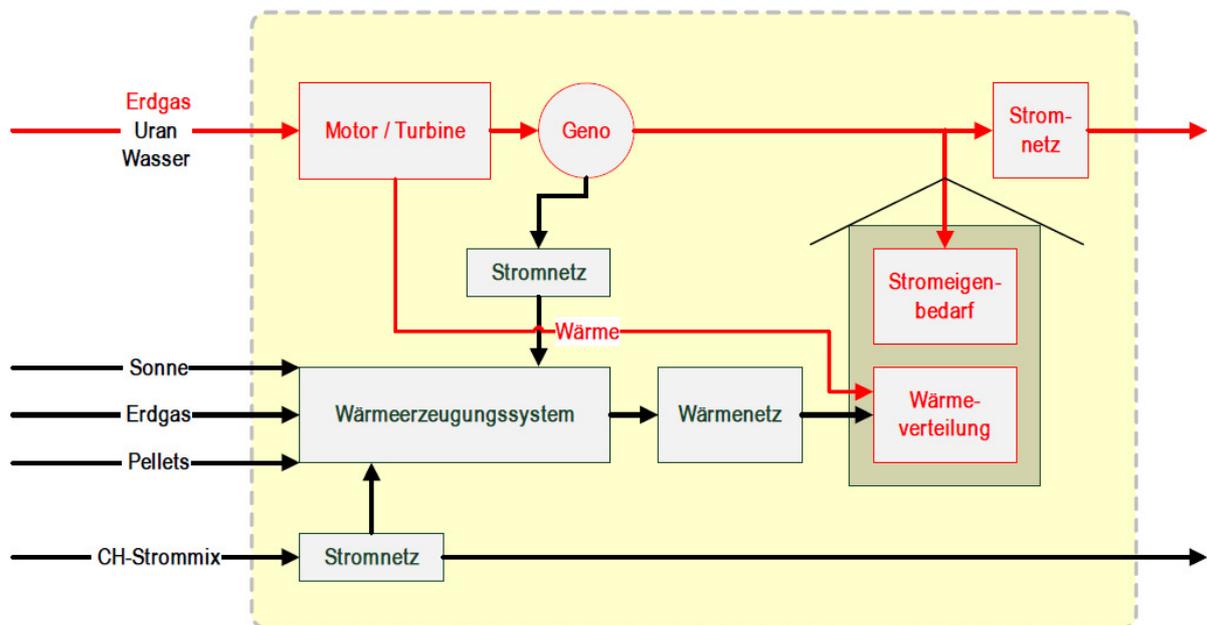


Abbildung 3.4 BHKW 50 kW<sub>el</sub>.

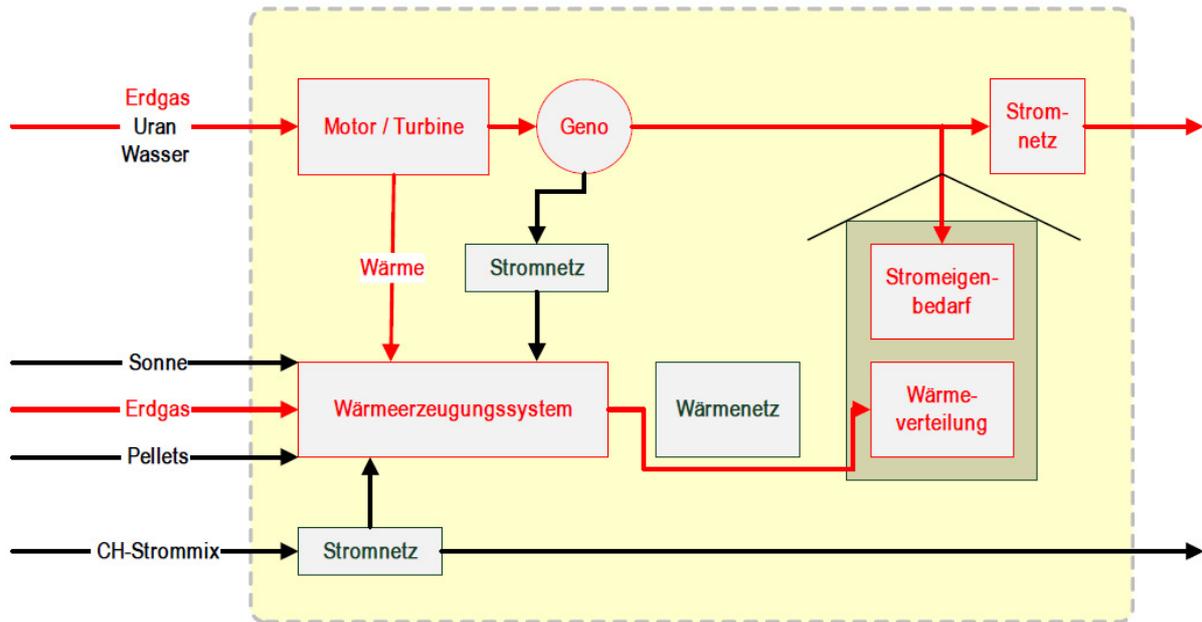


Abbildung 3.5 BHKW 160 kW<sub>el</sub> plus Gasheizung.

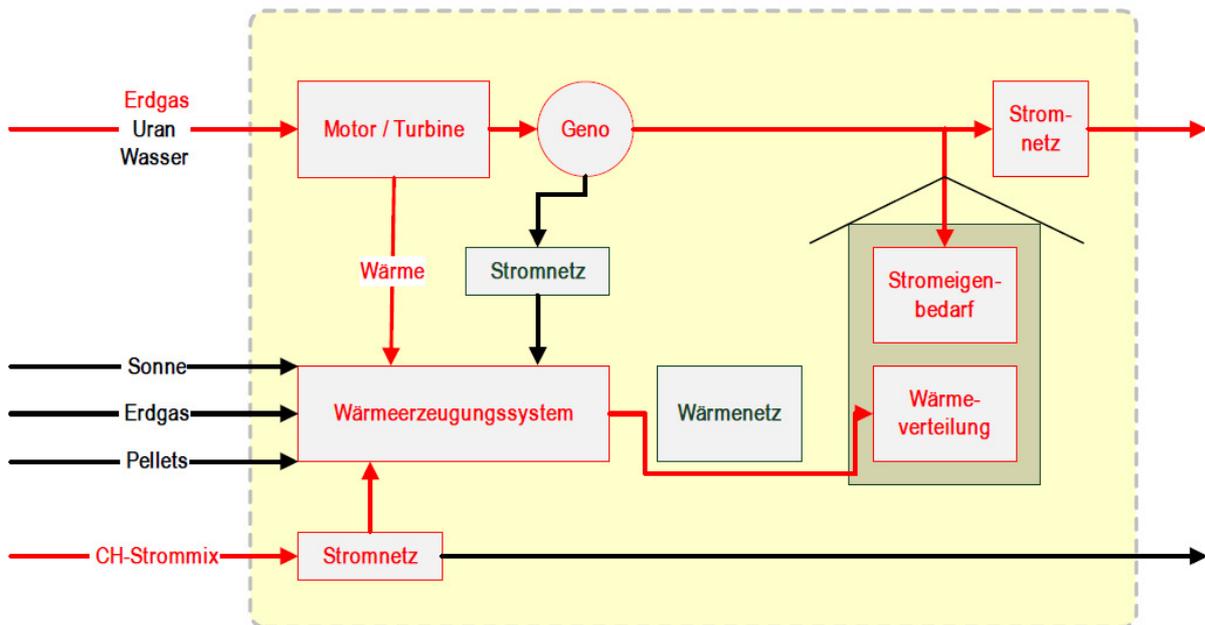


Abbildung 3.6 BHKW 160 kW<sub>el</sub> plus Wärmepumpenheizung.

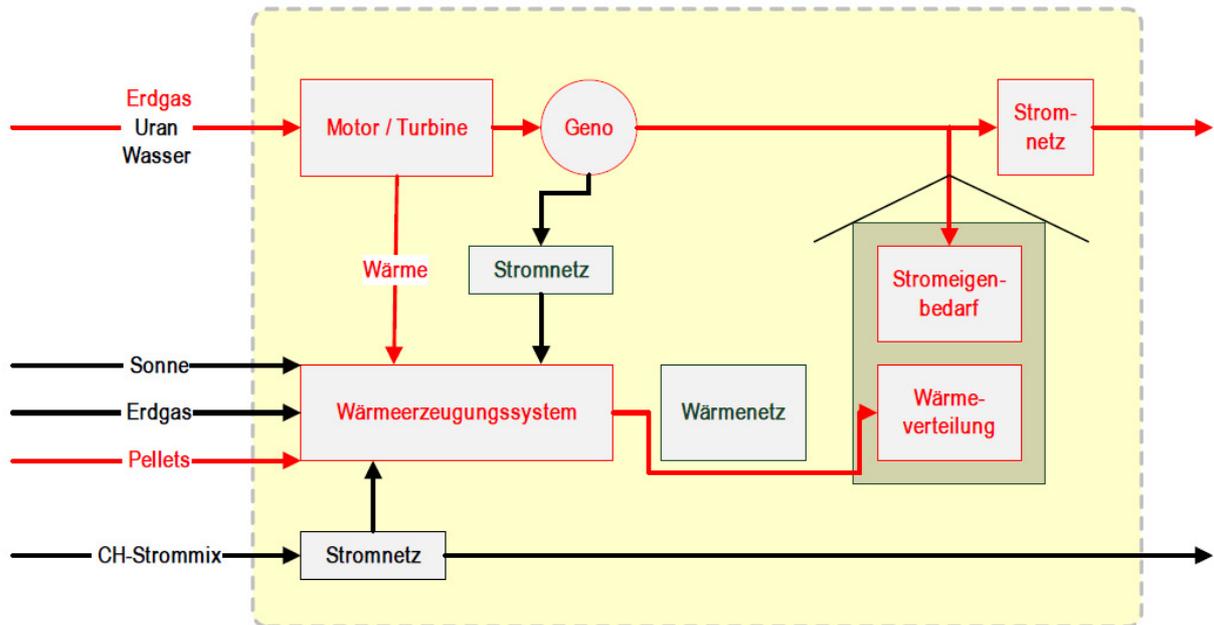


Abbildung 3.7 BHKW 160 kW<sub>el</sub> plus Pelletheizung.

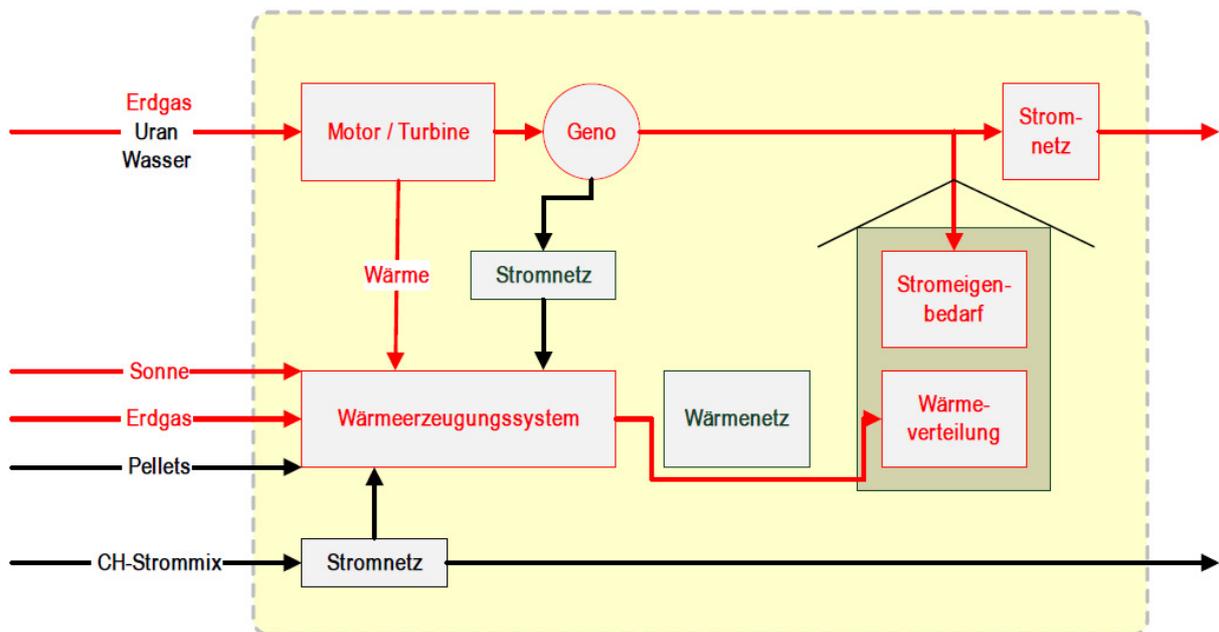


Abbildung 3.8 BHKW 160 kW<sub>el</sub> plus Sonnenkollektorheizung plus Gasheizung.

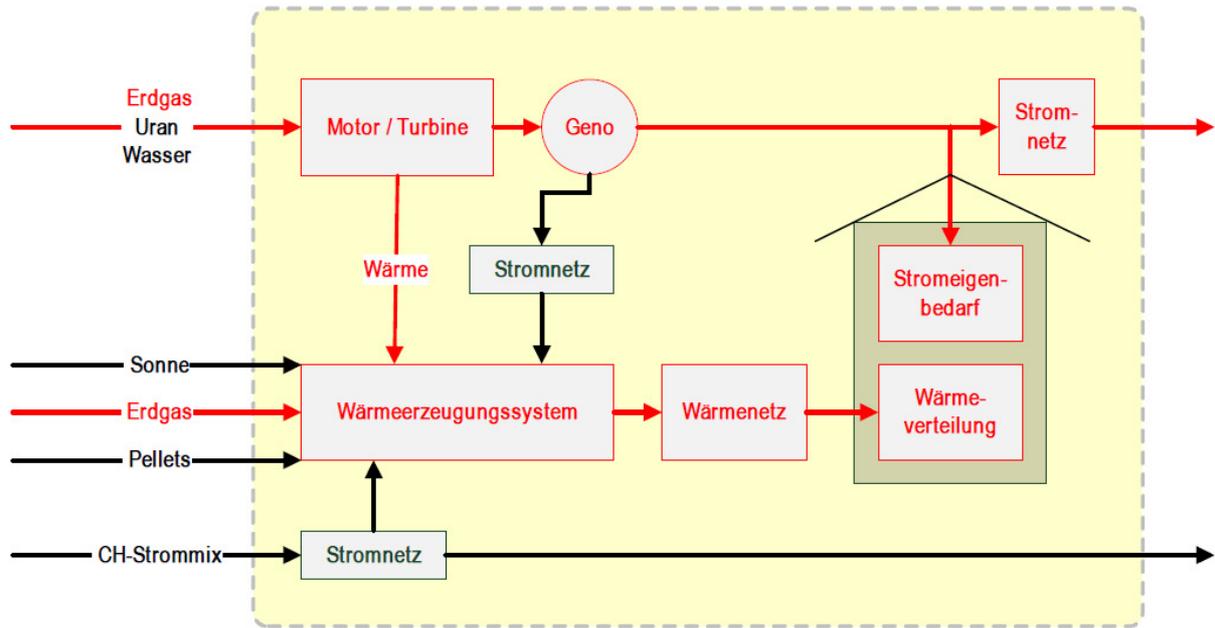


Abbildung 3.9 BHKW 1000 kW<sub>el</sub> plus Gasheizung.

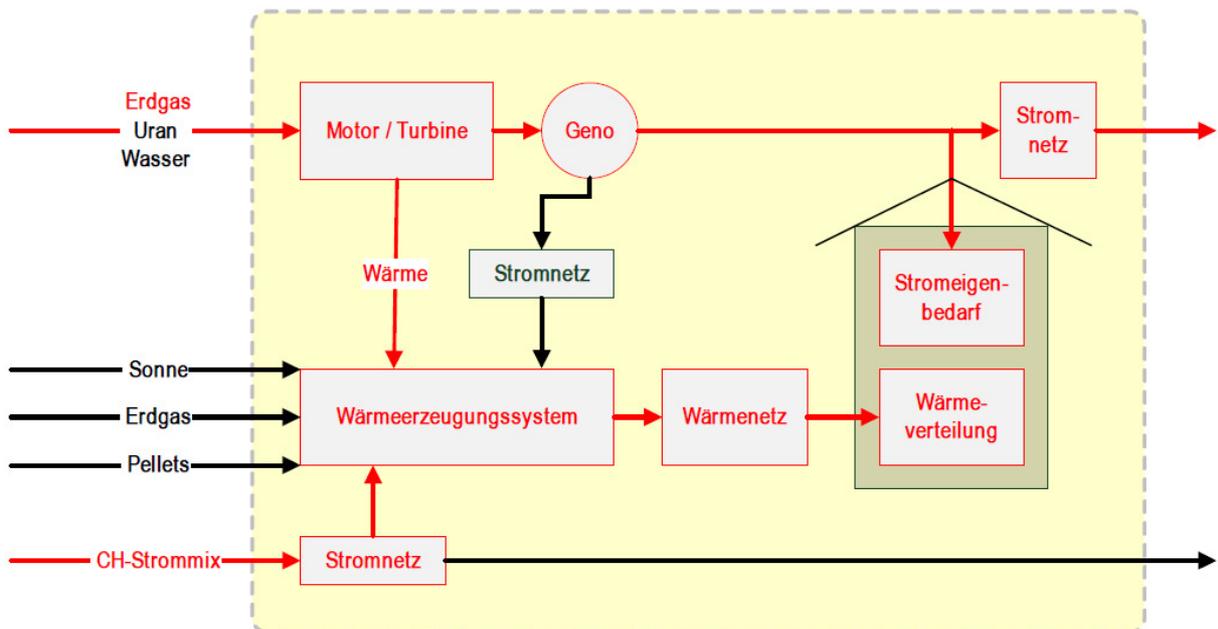


Abbildung 3.10 BHKW 1000 kW<sub>el</sub> plus Wärmepumpenheizung.

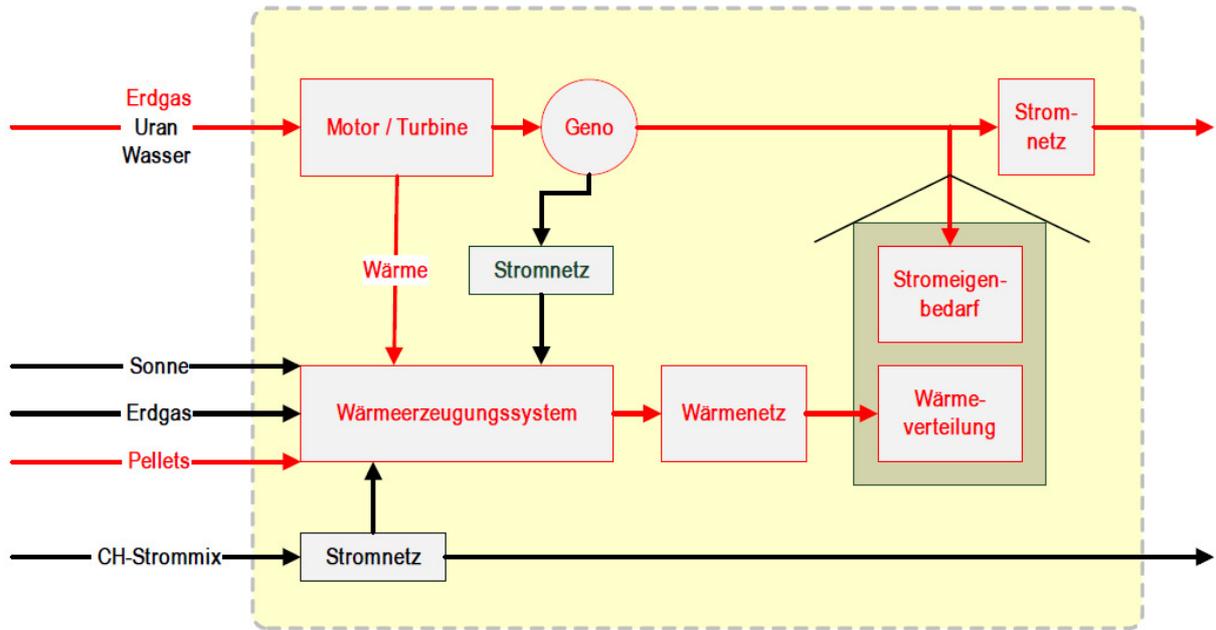


Abbildung 3.11 BHKW 1000 kW<sub>el</sub> plus Pelletheizung.

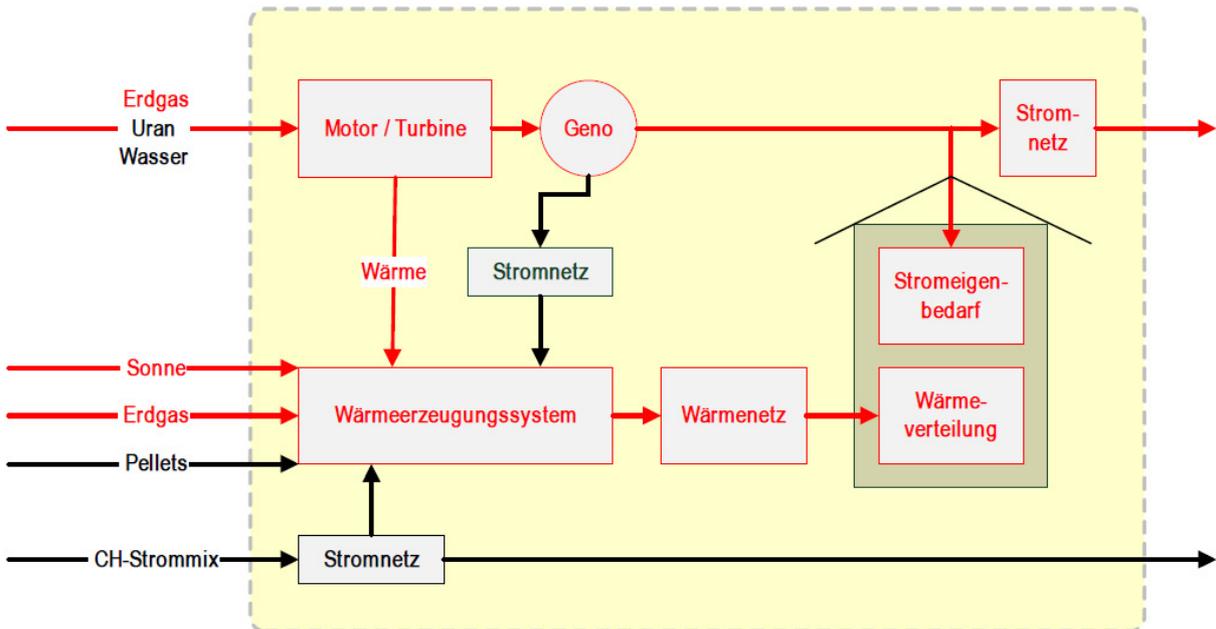


Abbildung 3.12 BHKW 1000 kW<sub>el</sub> plus Sonnenkollektorheizung plus Gasheizung.

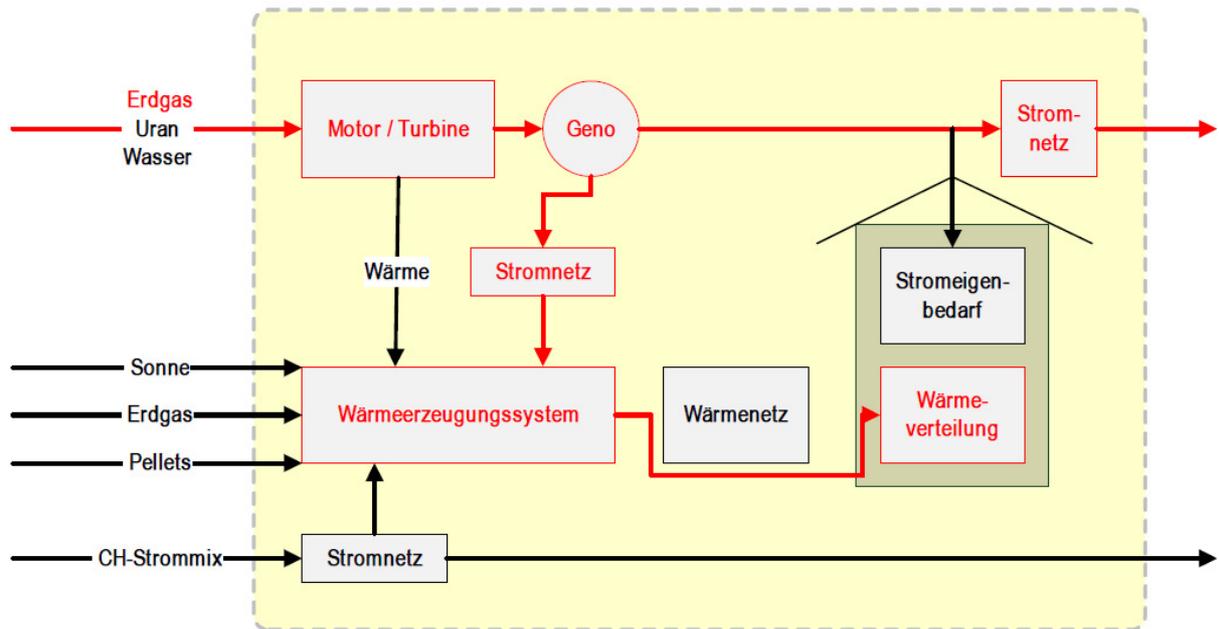


Abbildung 3.13 Gaskombi-Kraftwerk plus Wärmepumpe EFH/MFH.

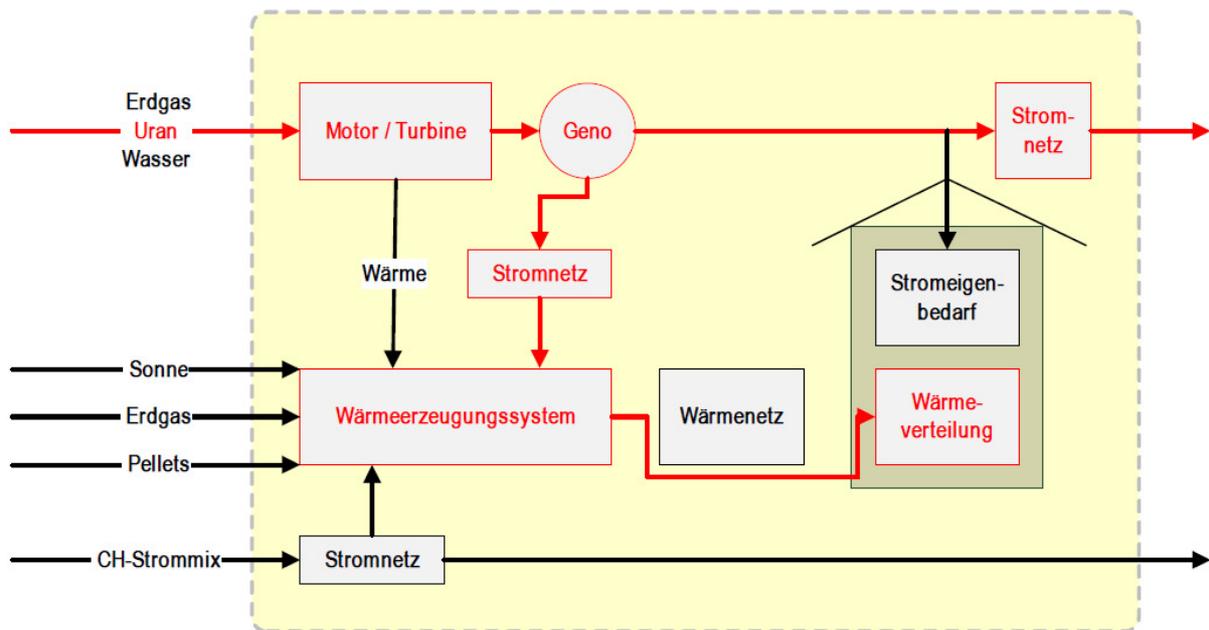


Abbildung 3.14 Kernkraftwerk plus Wärmepumpe EFH/MFH.

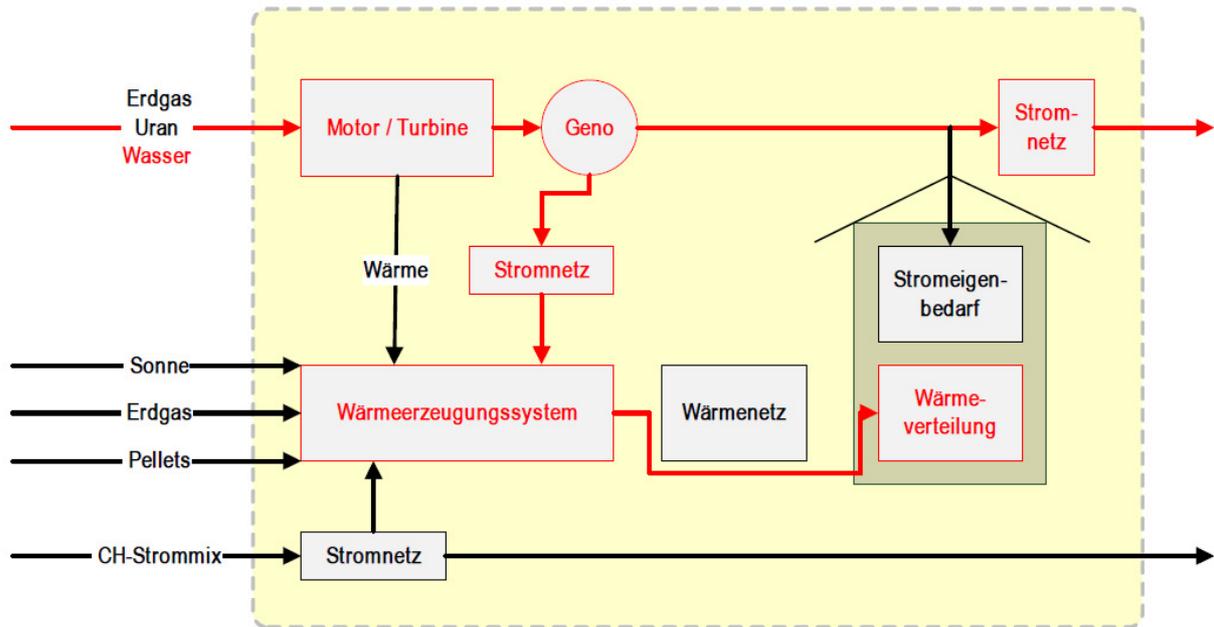


Abbildung 3.15 Wasserkraftwerk plus Wärmepumpe EFH/MFH.

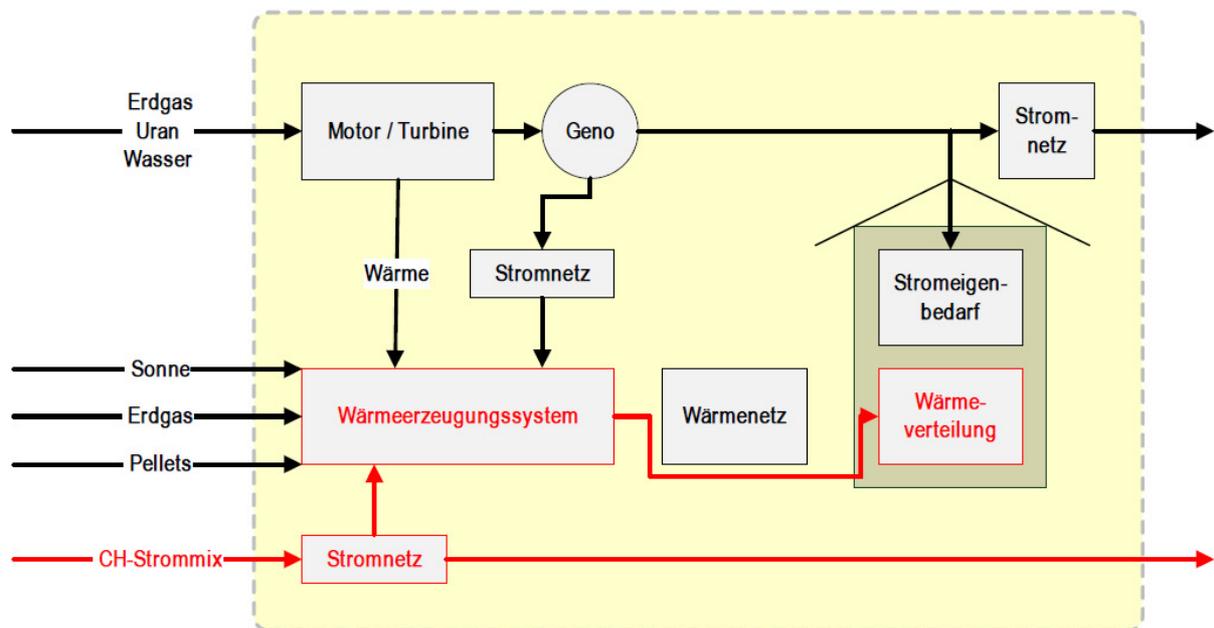


Abbildung 3.16 CH-Strommix plus Wärmepumpe EFH/MFH.

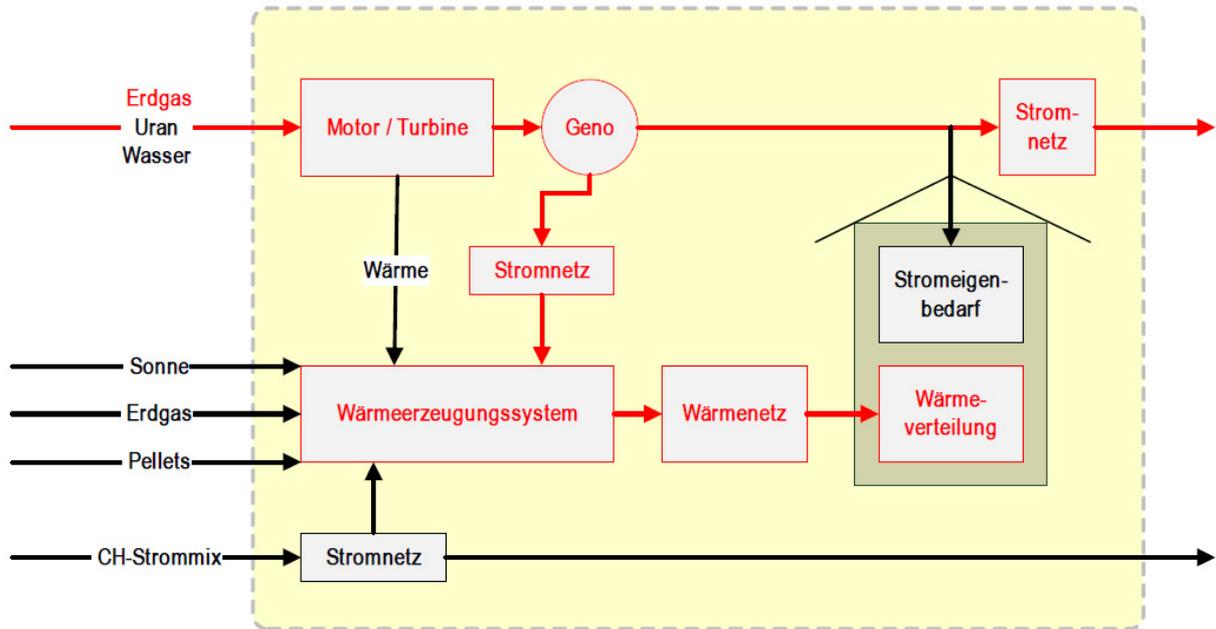


Abbildung 3.17 Gaskombi-Kraftwerk plus Wärmepumpe Gewerbe/Industrie.

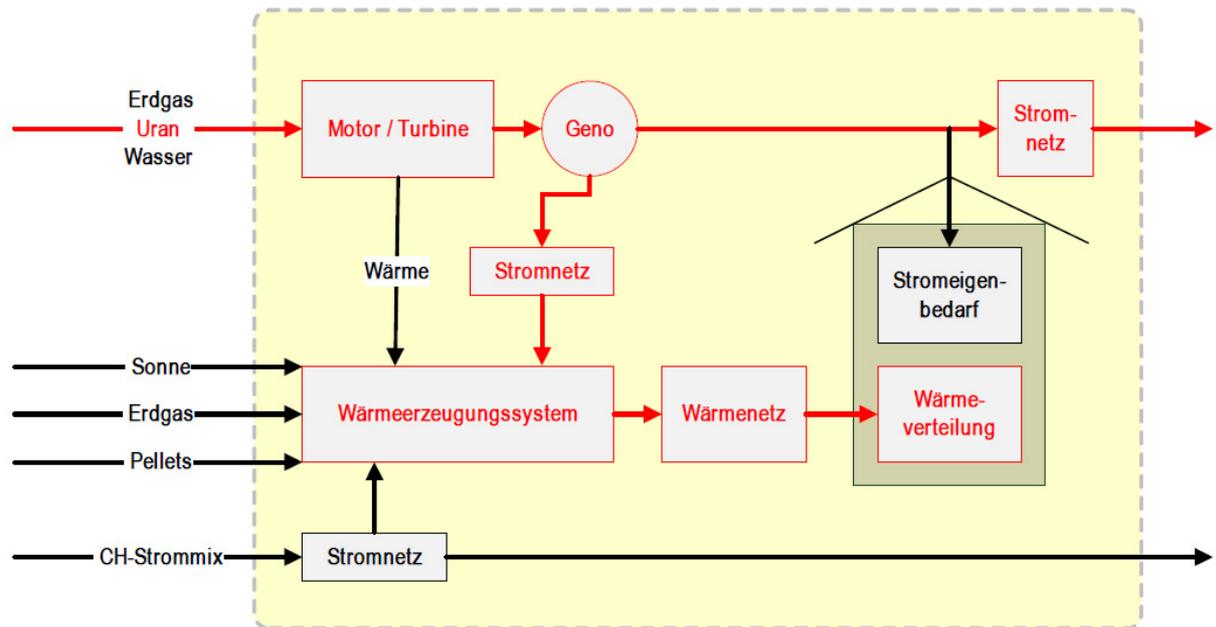


Abbildung 3.18 Kernkraftwerk plus Wärmepumpe Gewerbe/Industrie.

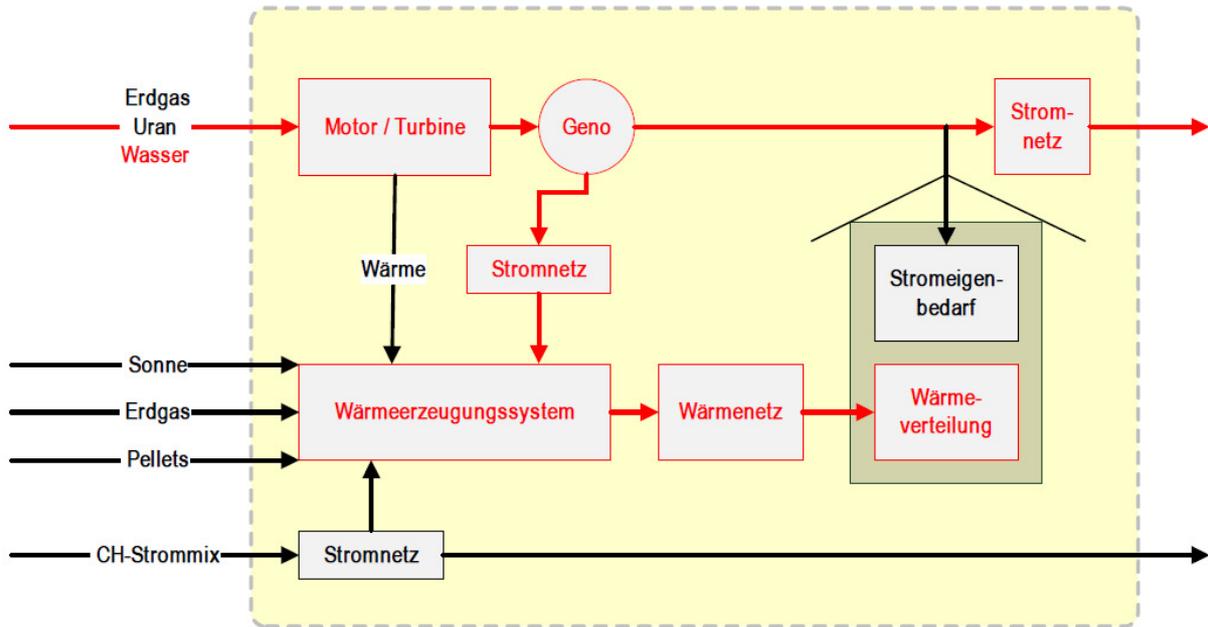


Abbildung 3.19 Wasserkraftwerk plus Wärmepumpe Gewerbe/Industrie.

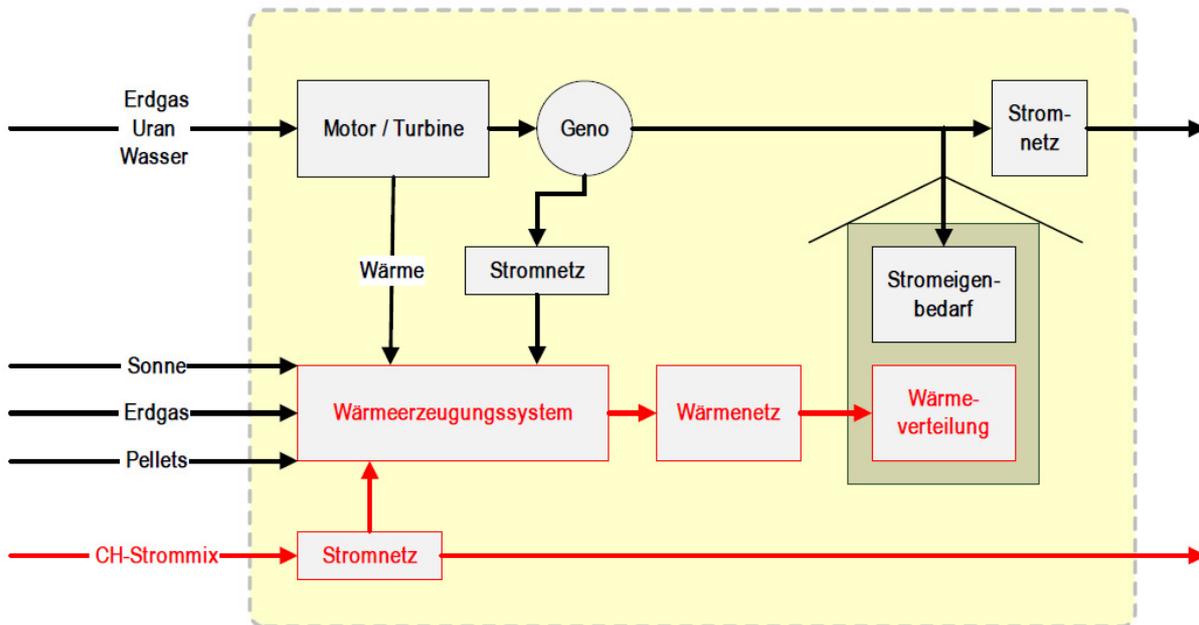


Abbildung 3.20 CH-Strommix plus Wärmepumpe Gewerbe/Industrie.

## 4 Einfluss dezentraler Stromerzeugung auf die Kosten von Netzen und Systemdienstleistungen und die Preise der Stromkunden

### 4.1 Ausgangslage

Eine zunehmende Durchdringung der Stromnetze mit dezentraler Erzeugung (DE) durch WKK-Anlagen hat Auswirkungen auf deren Betrieb und Schutzkonzepte. In geringem Umfang beeinflusst werden die Netzverluste und die Netzkosten. Trotz des geringen Kosteneinflusses können die Auswirkungen auf die Stromrechnung der Niederspannungskunden aufgrund nicht verursachergerechter Kostenwälzungsmodelle erheblich sein. Dieser Effekt soll nachfolgend qualitativ dargestellt und volkswirtschaftlich sinnvolle Optionen diskutiert werden.

### 4.2 Einfluss der DE auf die Netzverluste

In der Schweiz fallen ca. 7% der erzeugten Strommenge als Verluste in den Übertragungs- und Verteilnetzen an. Der mit Abstand grösste Teil der Verluste entsteht in der Niederspannungsebene (Netzebenen 6 und 7, Definition siehe Anhang), in welche die dezentralen Erzeugungsanlagen einspeisen.

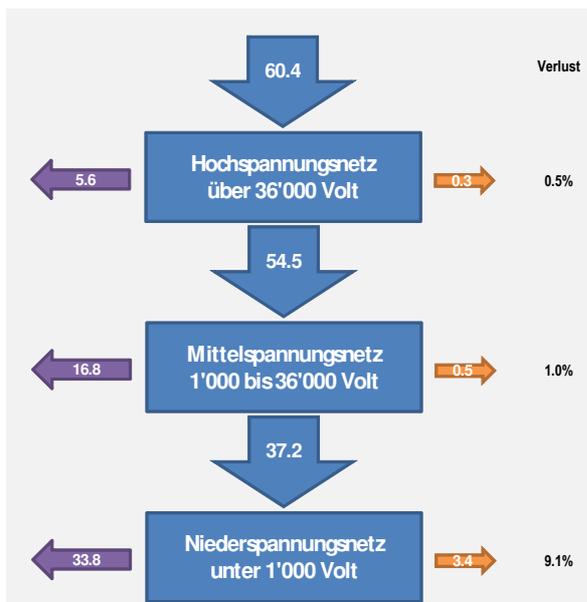


Abbildung 4.1 Modell der Stromverteilung in der Schweiz, Zahlen 2004, in TWh, violett = Ausspeisungen, orange = Verluste (Frischknecht et al. 2007b).

Inwiefern nun die dezentrale Einspeisung in das Niederspannungsnetz die Verluste beeinflusst, ist von den individuellen, zeitlich variierenden Stromflüssen und somit von der spezifischen lokalen Topologie sowie den Lastprofilen der Erzeuger und der Verbraucher abhängig.

In der Tendenz werden die Verluste bei lokaler Erzeugung und gleichzeitiger lokaler Nutzung verringert. Übersteigt die lokale Erzeugung die lokale Nachfrage, nehmen die Verluste allerdings wieder zu und können den Wert ohne dezentrale Einspeisung sogar übertreffen (vgl. Abbildung 4.2).

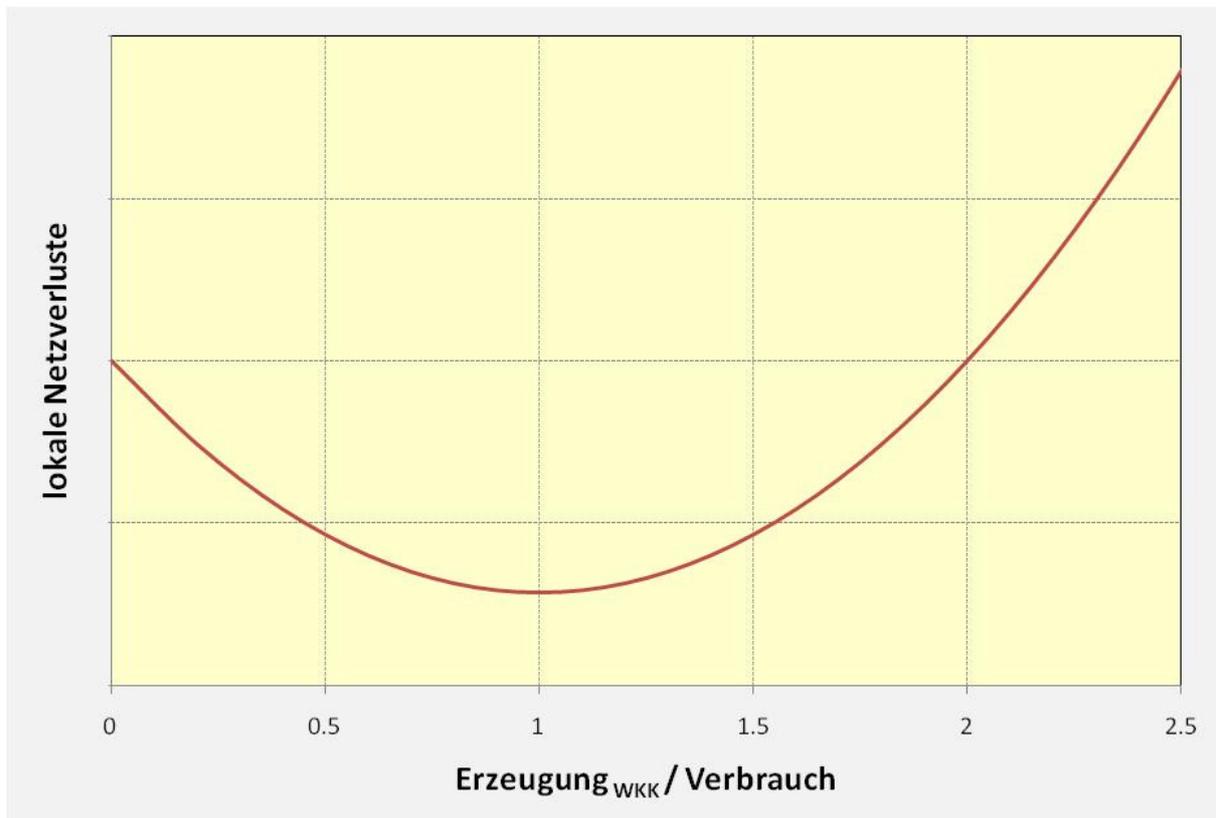


Abbildung 4.2 Idealisierter qualitativer Verlauf der Ohm'schen Verluste im Niederspannungsnetz (Zeitpunkt- resp. Leistungsbetrachtung).

Im Einfamilienhausbereich kann davon ausgegangen werden, dass der integrale Netzverlust über die gesamte Betriebsdauer durch die dezentrale Stromeinspeisung durch WKK in der Tendenz geringfügig reduziert wird. Der Einfluss auf die Kosten der Verlustenergie wird ebenfalls entsprechend gering eingeschätzt.

### 4.3 Einfluss der DE auf die Netzinvestitionen

Im Gegensatz zu den Netzverlusten, wo der zeitliche Leistungsverlauf massgeblich ist, ist für die Dimensionierung der Netze und die damit verbundenen Investitionen ausschliesslich die maximale Belastung entscheidend. Bei der Netzplanung muss berücksichtigt werden, dass wärmegeführte WKK-Anlagen einem witterungsbedingten Fahrplan folgen und sich nicht nach der Stromnachfrage richten. Der massgebliche Leistungsnutzen leitet sich aus dem Kollektiv der WKK-Anlagen in einem zu versorgenden Netzbereich ab und steigt mit der Anzahl Anlagen an<sup>8</sup>. E-Control (2005) untersuchte die theoretisch maximal möglichen Kosteneinsparungen für Österreich, wo bereits heute<sup>9</sup> ca. 14% der Stromerzeugung mittels dezentraler Anlagen erfolgt (Tabelle 4.1).

<sup>8</sup> Eine grössere Anzahl unabhängig von einander geregelter Anlagen führt statistisch zu einer besseren Verschachtelung des Summenerzeugungsprofils und somit zu einem grösseren gesicherten Leistungsband.

<sup>9</sup> "heute" bezieht sich in der erwähnten Studie auf das Jahr 2003

**Tabelle 4.1** Theoretisch maximal mögliche Kostenreduktion beim Netzausbau als Folge der dezentralen Stromspeisung in Österreich, ideale Annahmen (Werte = theoretische Obergrenze).

Ausbau	Total	Netzebene							Dezentrale Erzeugung	
		7	6	5	4	3	2	1	Leistung / MW	Energie / GWh/a
ohne DE	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0	0
heute	6.14%	0.00%	0.04%	0.00%	2.30%	1.40%	2.40%	0.00%	1'930	9'230
Zubau	4.03%	0.00%	0.03%	0.00%	1.40%	1.00%	1.60%	0.00%	2'385	11'470
<b>Total</b>	<b>10.17%</b>	<b>0.00%</b>	<b>0.07%</b>	<b>0.00%</b>	<b>3.70%</b>	<b>2.40%</b>	<b>4.00%</b>	<b>0.00%</b>	<b>4'315</b>	<b>20'700</b>

In den Netzebenen 2...4 kann sich unter optimalen Bedingungen langfristig durch verzögerte Investitionen eine maximale Reduktion des Netzanlageninvestitionsbedarfs im tiefen einstelligen Prozentbereich pro Netzebene einstellen. In den übrigen Netzebenen ist der Leistungsnutzen so gering, dass auch in einem "BHKW-Endausbau" keine nennenswerten Reduktionen auftreten. In Gebieten mit extremer dezentraler Erzeugung könnte allerdings sogar das Gegenteil, nämlich die Notwendigkeit einer zusätzlichen Netzverstärkung, eintreten. Technisch ist folglich eine oft diskutierte allgemeine Vergütung für "vermeidene Netzkosten" bei dezentraler Einspeisung nicht zu rechtfertigen.

Falls sich Einsparungen aufgrund eines erst zu einem späteren Zeitpunktes notwendigen Netzausbaus einstellen, dann speziell dort, wo noch eine alte Netzinfrastruktur vorhanden ist. Wie das Beispiel des NOK-Netzes zeigt, eignen sich umgekehrt bereits erneuerte Netze kaum für Einsparungen durch dezentrale Einspeisung. Vor einigen Jahren wurde der Umbau des 50 kV-Netzes auf 110 kV beschlossen, welcher heute bereits weit fortgeschritten ist. Das bedeutet, dass in der ganzen Nordostschweiz auf weite Sicht (>50 Jahre) gerade in den in der österreichischen Studie als interessant dargestellten Netzebenen 2 bis 4 überhaupt kein Potenzial für Kosteneinsparungen durch einen verzögerten Netzausbau mehr besteht.

#### 4.4 Einfluss der DE auf die Kosten der Systemdienstleistungen

Als Systemdienstleistungen (SDL) werden die folgenden, für die sichere, stabile Stromversorgung zwingend notwendigen Aufgaben bezeichnet:

- Frequenzstabilität durch Primär-, Sekundär- und Tertiärregelenergie
- Fahrplanmanagement
- Spannungsqualität und Blindleistungsregelung
- Netzwiederaufbau, Schwarzstart

Heute erfolgt der Einsatz dezentraler Erzeugungseinheiten vollständig unabhängig von den Erfordernissen des Stromversorgungssystems. Diese leisten somit zwar einen quantitativen, nicht aber einen qualitativen Beitrag zur Stromversorgung. Somit sind die gesamten Kosten für die Systemdienstleistungen zum heutigen Zeitpunkt mehr oder weniger unabhängig vom WKK-Ausbau<sup>10</sup>.

Aufgrund technologischer Entwicklungen könnten Blockheizkraftwerke zukünftig in der Lage sein, gewisse Systemdienstleistungen zu erbringen. Als virtuelles Kraftwerk zusammen gefasst, kann eine grössere Anzahl leittechnisch verbundener WKK-Anlagen von einer Netzleitstelle innerhalb gewisser Grenzen gezielt zur Erbringung einzelner Systemdienstleistungen (z.B. Fahrplanmanagement, Reserveleistung, etc.) eingesetzt werden. Diese SDL würden zu Marktpreisen weitere Einnahmen für den Anlagenbesitzer generieren. Mutale und Stbrac (2001) von der University of Manchester befürchten jedoch, dass der Wert der SDL im Verhältnis zu den Mehrinvestitionen in thermische

<sup>10</sup> Während das Kollektiv einer grossen Anzahl BHKW's annähernd ein Grundlastprofil erzeugt und somit keine vermehrten Systemdienstleistungen beansprucht werden, ist die Situation bei der Einspeisung durch Photovoltaik- und Windkraftwerke grundsätzlich unterschiedlich. Diese Fälle ergeben einen grösseren Bedarf an Systemdienstleistungen und Netzkapazitäten.

Speicher, Rückkühler, Steuerung und Leittechnik sowie zu den betrieblichen Einschränkungen durch den direkten Eingriff des Netzbetreibers in die WKK-Anlagensteuerung relativ gering sein würde.

## 4.5 Heutige Kostenwälzung

Aufgrund des Systemcharakters der Stromversorgungsinfrastruktur ist es physikalisch unerheblich, ob eine WKK-Anlage einen ans Netz gekoppelten Verbraucher direkt versorgt (Eigenversorgung) oder ob der Strom vom Nachbarn bezogen wird. Im Gesamtsystem fallen exakt dieselben Kosten an. Kommerziell ist es heute jedoch entscheidend, auf welcher Seite des Stromzählers sich das BHKW befindet. Die übliche Praxis ist, dass Kleinbezüger eine geringe Miete für den Stromzähler (Fixkosten) und, ausgehend von einem Normlastprofil, einen reinen Arbeitspreis (variable Kosten) bezahlen. Dieser Arbeitspreis beinhaltet Produktion, Übertragung, Verteilung, SDL, Abgaben und Steuern. Die teilweise Eigenversorgung führt dazu, dass der Kunde nicht mehr das zu Grunde gelegte Normlastprofil bezieht und somit eigentlich einen anderen (höheren) Arbeitspreis bezahlen müsste.

Durch die teilweise Eigenversorgung umgeht der WKK-Besitzer folglich die Begleichung der von ihm während dieser Zeit beanspruchten Systemdienstleistungen und verursachten Netzfixkosten, da diese nur für den Nettoenergiebezug aus dem Netz verrechnet werden. Dieser Zustand ergibt sich bis heute aus der ungenügenden technischen Messausrüstung mit fehlender Lastgangmessung für eine differenziertere Preisgestaltung. Für eine korrekte Erfassung und Berücksichtigung der Eigen-erzeugung und der damit verbundenen Systembelastung gibt es bis heute keine Rechtsgrundlage.

Ist der Anteil der dezentralen Eigenversorgung gering, fällt die durch den beschriebenen Effekt verursachte Quersubventionierung für die Kunden, die ihre elektrische Energie aus dem Stromnetz beziehen, nicht ins Gewicht. Bei zunehmender Eigenversorgung jedoch müssen die (absolut gesehen konstanten) Systemkosten auf eine immer geringere verrechenbare Energiemenge verteilt werden, was zu einer erheblichen Verteuerung für die fremdversorgten Kunden führen kann (vgl. Abbildung 4.3).

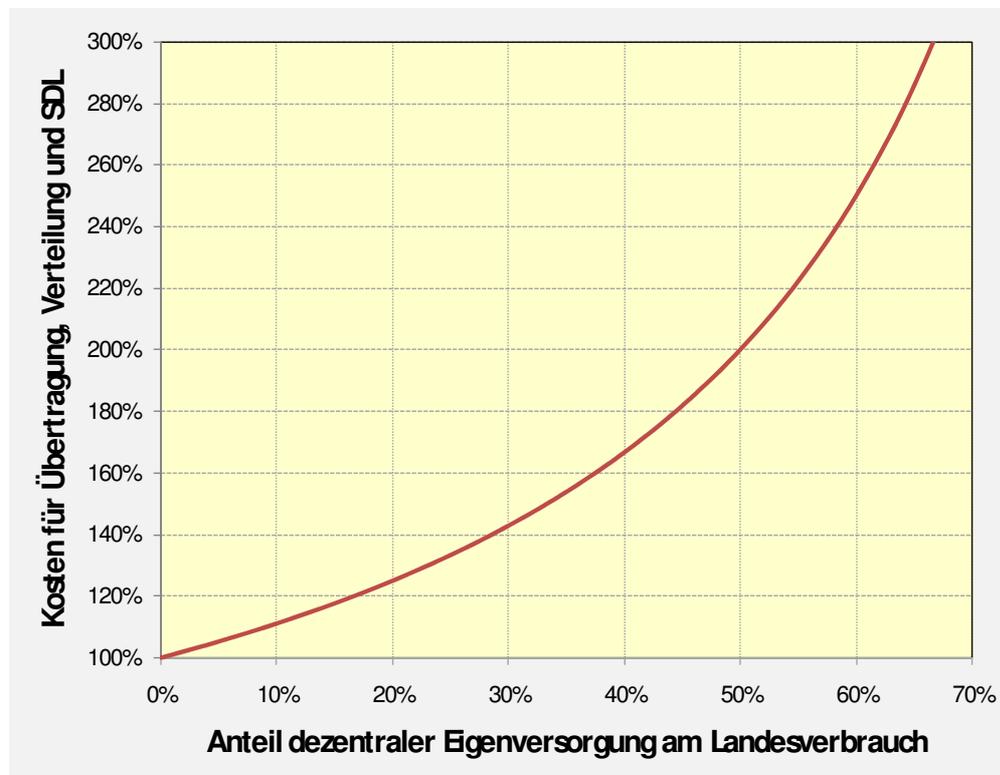


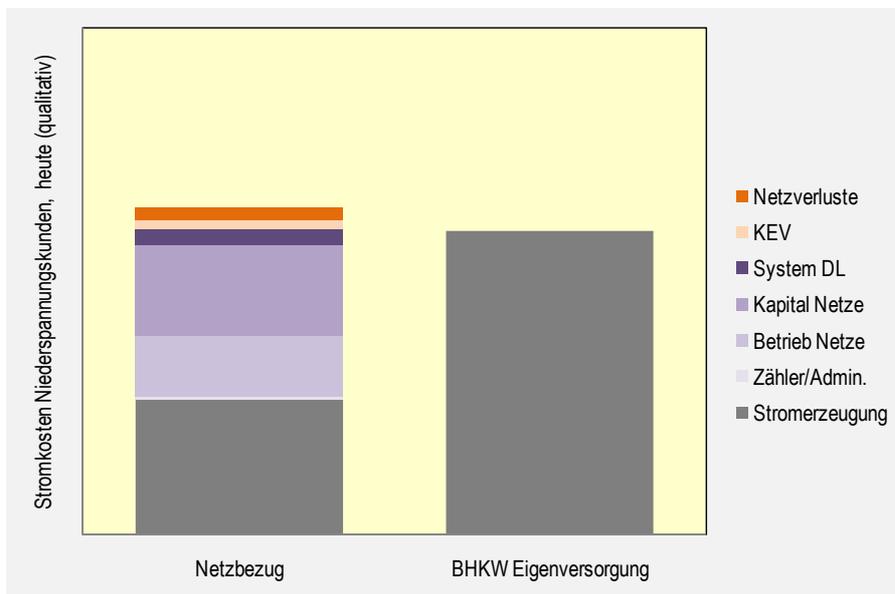
Abbildung 4.3 Durch die Quersubventionierung verursachte Kostensteigerung für die fremdversorgten Stromkunden.

Dieser aus Sicht der Kostenwahrheit unerwünschte Effekt wird häufig unter dem Begriff "Grid-Parity" zur Bezeichnung des unternehmerischen Tradeoffs für teure dezentrale Stromerzeugungssysteme zur Eigenversorgung zitiert.

Nachfolgend werden die Kostenstrukturen für die folgenden drei Fälle qualitativ vergleichsweise dargestellt:

- Vergleich Bezug von Lieferant vs. Eigenerzeugung mit BHKW, Situation heute (Abbildung 4.4)
- Vergleich Bezug von Lieferant vs. Eigenerzeugung mit BHKW, Modell verursachergerechte Kostenwälzung, heute (Abbildung 4.5)
- Vergleich Bezug von Lieferant vs. Eigenerzeugung mit BHKW, Modell verursachergerechte Kostenwälzung, in 30 Jahren (Abbildung 4.6)

Die quantitativen Verhältnisse dieser Kostenbetrachtung sind in hohem Masse von den konkreten Verhältnissen und Randbedingungen abhängig. Eine allgemein gültige Aussage kann deshalb nicht gemacht werden. Aus diesem Grund sind die nachfolgenden Illustrationen auf einer qualitativen Basis erstellt worden. Es sollen damit ausschliesslich die unterschiedlichen Kostenstrukturen mit den enthaltenen Komponenten dargestellt werden.



**Abbildung 4.4** Die sog. "Grid-Parity" ist erreicht, wenn die gesamten Kosten des aus dem Netz bezogenen Stroms gleich den reinen Erzeugungskosten der eigenen Stromproduktion sind. Sind diese wie im dargestellten Beispiel tiefer als die Gesamtkosten bei Netzbezug, ist die Eigenerzeugung aus unternehmerischer Sicht des BHKW-Betreibers rentabel.

Die ungewollte Quersubventionierung des durch die Betreiber von BHKW's selbst erzeugten und genutzten Stromes ist für diese bei der heute geltenden Praxis aus betriebswirtschaftlicher Sicht vorteilhaft. Die Gesamtkosten für die Landesstromversorgung steigen jedoch durch den Einsatz von BHKW's überproportional an, so dass sich dies volkswirtschaftlich nachteilig auswirkt.

Durch die Einführung von intelligenten Netzen (sog. Smart Grids) wird es zukünftig möglich sein, auch Kleinverbrauchern volkswirtschaftlich anzustrebende verursachergerechte Preise in Rechnung zu stellen, so dass auch für eigenerzeugten Strom alle beanspruchten Leistungen vergütet werden müssen.

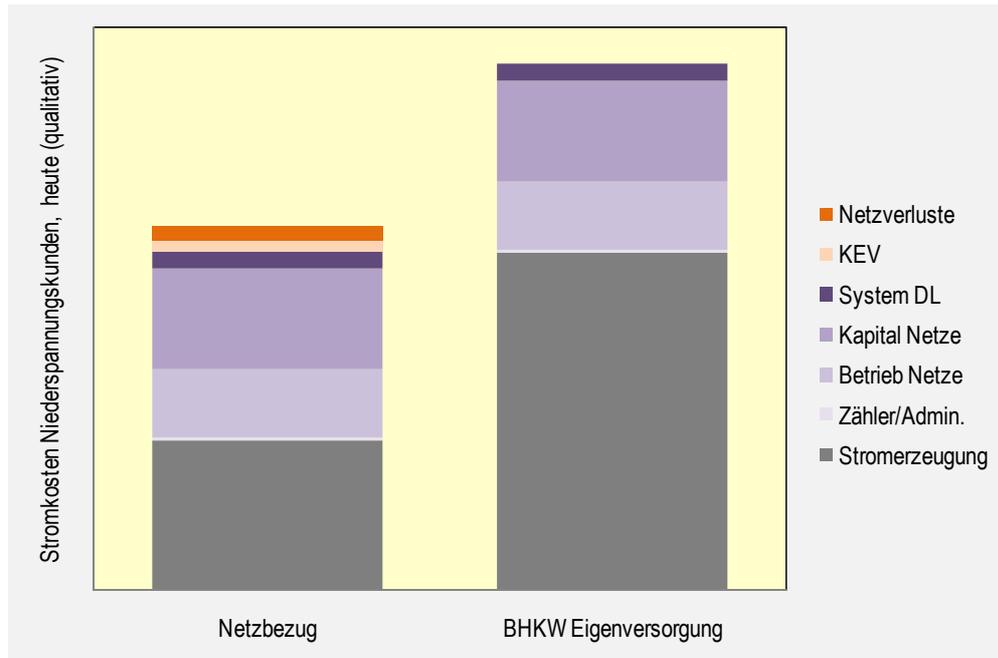
Sollte der Wunsch bestehen, WKK aufgrund eines gesellschaftlichen Bedürfnisses zu fördern, muss dies gezielt geschehen, und nicht anhand einer zufälligen Quersubventionierung, wie dies heute der Fall ist. Die Grundlagen dazu sind im StromVG/VV bzw. EnG vorhanden. Diese Frage ist von der Politik zu klären.

## 4.6 Verursachergerechte Kostenwälzung

Grundsätzlich entstehen durch den Anschluss eines Verbrauchers an das elektrische Versorgungsnetz folgende Arten von Kosten:

- Durch die maximal auftretende Belastung bestimmte Kosten
- Periodisch wiederkehrende Kosten
- Durch die bezogene Energiemenge bestimmte Kosten

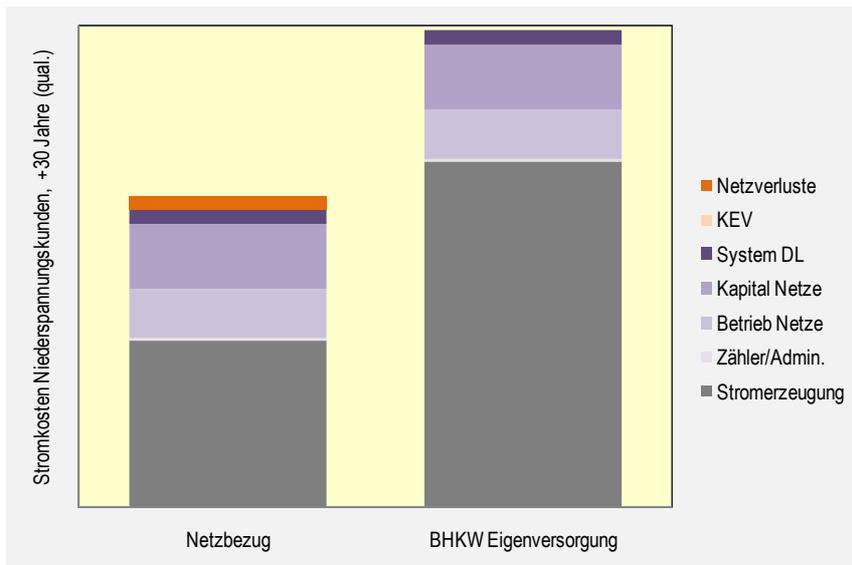
Während die ersten beiden Kategorien Fixkosten darstellen und über 90% der Systemkosten ausmachen, handelt es sich bei der dritten Kategorie um variable Kosten.



**Abbildung 4.5** Stromgestehungskosten beim Haushaltkunden (Niederspannung, Kleinbezüger), Situation heute: Grau: Stromerzeugung; violett: Fixkosten Netz- und Systemdienstleistungen; orange: variable Kosten Netz- und Systemdienstleistungen.

Die Fixkosten fallen definitionsgemäss unabhängig von der bezogenen Energiemenge an. Das ist u.a. dann bedeutend, wenn ein Kunde einen Teil seines Bedarfes durch Eigenerzeugung beispielsweise mittels WKK deckt. Die Fixkosten für Netze und Systeme fallen trotz teilweiser Eigenversorgung in gleichem Masse wie ohne Eigenversorgung an (vgl. Abbildung 4.5). Daraus ist zu folgern, dass diese Kosten auch vom Eigenerzeuger zu übernehmen sind. In der heutigen Praxis fallen bei Eigenversorgung nur die eigenen Erzeugungskosten an (vgl. Abbildung 4.4), was zu der erwähnten Quersubventionierung führt.

Heute kann ganz grob von einer Zusammensetzung des Strompreises für Niederspannungskleinbezüger von ca. 40% Stromerzeugung zu etwa 60% Netz und Systemdienstleistungen ausgegangen werden. Zukünftig ist aufgrund teurerer Erzeugung (und damit steigendem Marktpreis) und höherer Effizienz im Netzbereich mit einer Verschiebung zu je etwa hälftiger Anteile zu erwarten (vgl. Abbildung 4.6). Diese Tendenz entschärft die Problematik der heutigen, nicht verursachergerechten Fakturierung der Netz- und Systemkosten geringfügig.



**Abbildung 4.6** Stromgestehungskosten beim Haushaltskunden (Niederspannung, Kleinbezüger), Situation in 30 Jahren: Grau: Stromerzeugung; violett: Fixkosten Netz- und Systemdienstleistungen; orange: variable Kosten Netz- und Systemdienstleistungen.

## 4.7 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die dezentrale Stromeinspeisung ins Niederspannungsnetz beeinflusst sowohl die Netzverluste wie auch die Investitionen in den Netzausbau. Die Netzverluste werden in der Regel geringfügig reduziert. Bei alten Übertragungs- und Verteilnetzen können gewisse notwendige Investitionen zu einem späteren Zeitpunkt getätigt werden. Bei bereits erneuerten und ausgebauten Netzen, wie wir sie beispielsweise in der Nordostschweiz vorfinden, entfällt dieser Vorteil während mehrerer Jahrzehnte.

Der Einfluss dezentraler WKK auf die Systemkosten des Stromversorgungssystems muss von Fall zu Fall im Detail geklärt werden. Eine allgemeine Aussage ist nicht möglich. In den meisten Fällen ist die Auswirkung gering. Sie kann sowohl positiv wie auch negativ sein. Unabhängig davon, ob dezentral erzeugter Strom zur Eigenbedarfsdeckung genutzt wird oder zurück ins Netz gespeist wird, fallen im System die gesamten Kosten für die Systemdienstleistungen an. Im Gegensatz zur heutigen Situation, wo BHKW wärmegeführt betrieben werden und somit keine Rücksicht auf die Anforderungen des Stromversorgungssystems nehmen, könnten diese zukünftig, leittechnisch zusammengefasst und miteinander zu virtuellen Kraftwerken verbunden, in eingeschränktem Umfang ebenfalls Systemdienstleistungen erbringen. Ob dies jedoch wirtschaftlich interessant sein wird, ist fraglich. Aus technischer Sicht ist die Optimierung des gesamten Stromversorgungssystems jedoch sinnvoll. Dazu ist der Einsatz von Smart Grids und Smart Metering eine zwingende Voraussetzung.

Der Einsatz dieser innovativen Informationsfeatures im Netz- und Messbereich würde des weiteren eine verursachergerechte Kostenwälzung für Netzbenutzung und Systemdienstleistungen ermöglichen. Die heutige Praxis bei dezentraler Stromerzeugung zum Eigenbedarf entspricht nämlich einer massiven Quersubventionierung des selbst erzeugten und verbrauchten Stroms auf Kosten der übrigen Stromkunden, da die erwähnten Leistungen in gleicher Masse bezogen werden wie bei Fremdversorgung, jedoch für den selbst genutzten Anteil nicht verrechnet werden. Eine verursachergerechte Umlegung aller Leistungen wäre zwecks Minimierung der Gesamtkosten des Stromversorgungssystems aus volkswirtschaftlicher Sicht anzustreben. Dies würde jedoch die Wirtschaftlichkeit von BHKW erheblich verschlechtern. Grundsätzlich führt eine solche verursachergerechte Berechnung der Stromkosten beim Niederspannungsbezüger gegenüber heute zu einem deutlich höheren Leistungspreis (Fixkosten) bei einem geringeren Arbeitspreis (variable Kosten).

## 5 Indikatoren zur Bewertung der Systeme

Die folgenden Unterkapitel enthalten die Beschreibung der einzelnen Indikatoren sowie die Darstellung und Interpretation der technologiespezifischen Quantifizierung, d.h. der individuellen Ergebnisse für die verschiedenen Technologien. Zusammenfassend sind die Indikatoren in Tabelle 5.1 angeführt.

Im Fall der Kombination von zentralen Kraftwerken und Wärmepumpen verschiedener Leistungskategorien werden in den Grafiken mancher Einzelindikatoren (Ausnahmen: Energiekosten (Kap. 5.3.2.1) und Brennstoffpreisvolatilität (Kap. 5.3.3.2)) zwecks besserer Übersichtlichkeit nur die Ergebnisse für die Einfamilienhaus-Kombinationen mit der 5 kW<sub>th</sub>-Wärmepumpe dargestellt, da die Resultate mit grösseren Wärmepumpen für diese Indikatoren nicht nennenswert abweichen.

**Tabelle 5.1 Indikatoren zur Nachhaltigkeitsbewertung in dieser Studie.**

	<b>Indikator</b>
<b>1</b>	<b>Umwelt</b>
1.1	Ressourcen
1.1.1	Fossile Primärenergie
1.1.2	Uran
1.1.3	Erze
1.2	Klimawandel
1.2.1	THG, LCA
1.3	Ökosystem
1.3.1	Schäden an Flora und Fauna
1.4	Abfälle
1.4.1	Nicht radioaktive Abfälle
1.4.2	Radioaktive Abfälle
<b>2</b>	<b>Soziale Aspekte</b>
2.1	Menschliche Gesundheit
2.1.1	Normalbetrieb
2.1.2	Schwere Unfälle
2.2	Wahrgenommene Risiken
2.2.1	Risikoaversion (bei Unfällen)
2.2.2	Einschlusszeit für "kritische" Abfälle
2.3	Landschafts- & Siedlungsqualität
2.3.1	Visuelle Beeinträchtigung der Landschaftsqualität
2.3.2	Verkehrsaufkommen (Gütertransport)
<b>3</b>	<b>Wirtschaft</b>
3.1	Leistungen der Branche
3.1.1	Beschäftigung
3.2	Wirkung auf die Kunden
3.2.1	Energiekosten
3.3	Versorgungssicherheit & Flexibilität
3.3.1	Beitrag zur Autonomie der Energieversorgung
3.3.2	Brennstoffpreisvolatilität
3.3.3	Flexibilität aufgrund d. Grenzkosten (Verbraucherperspektive)
3.3.4	Flexibilität d. Produktion: Nutzen für das Gesamtenergiesystem

### 5.1 Umwelt

Im Bereich Umwelt finden sich Indikatoren, welche die heute als bedeutend angesehene Probleme im ökologischen Bereich im weiteren Sinne repräsentieren, auch wenn sich die damit verbundenen Probleme nicht auf den Umweltbereich beschränken, sondern teilweise auch aus gesellschaftlicher und ökonomischer Sicht eine Rolle spielen.

Sämtliche Indikatoren in diesem Bereich werden basierend auf vollständigen Lebenszyklusanalysen (Ökobilanzen) berechnet, d.h. es werden nicht nur die Betriebsemissionen und andere direkte, schädliche Auswirkungen der WKK-Anlagen bzw. Kraftwerke berücksichtigt, sondern vollständige Energieketten inkl. der Gewinnung der Ressourcen, deren Verarbeitung, Transportprozessen, der

Infrastruktur und der Entsorgung aller anfallenden Abfälle. Für die Modellierung der Energiesysteme zur Strom- und Wärmeversorgung werden Daten aus der Ökobilanzdatenbank ecoinvent verwendet (ecoinvent data v2.0).

Die Umweltindikatoren werden für die Elektrizität ab Grosskraftwerk und BHKW auf Niederspannungsniveau berechnet. Das bedeutet, dass sowohl die Stromverluste bei Übertragung und Verteilung, als auch die Aufwendungen für das Elektrizitätsnetz in den Berechnungen berücksichtigt werden. Dabei wird dem möglichen Eigenverbrauch der BHKW-Betreiber Rechnung getragen, indem die Verteilungs- und Übertragungsverluste bei dezentraler Erzeugung um 50% verringert werden.<sup>11</sup>

## 5.1.1 Ressourcen

In der Kategorie Ressourcen werden nicht erneuerbare Rohstoffe erfasst. Darunter fallen sowohl energetische als auch nicht energetische Rohstoffe. Der Ressourcenverbrauch wird in der Kategorie Umwelt gemessen, auch wenn mit deren Förderung nicht nur Umwelt- sondern auch ökonomische und gesellschaftliche Problemfelder verknüpft sind.<sup>12</sup>

### 5.1.1.1 Fossile Primärenergie

Hier wird der Primärenergiegehalt (auch kumulativer Energieaufwand genannt (Frischknecht et al. 2007a)) sämtlicher verbrauchter fossiler Energieträger (Erdöl, Erdgas und Kohle) gemessen, unabhängig von der unterschiedlichen Knappheit der verschiedenen Ressourcen.

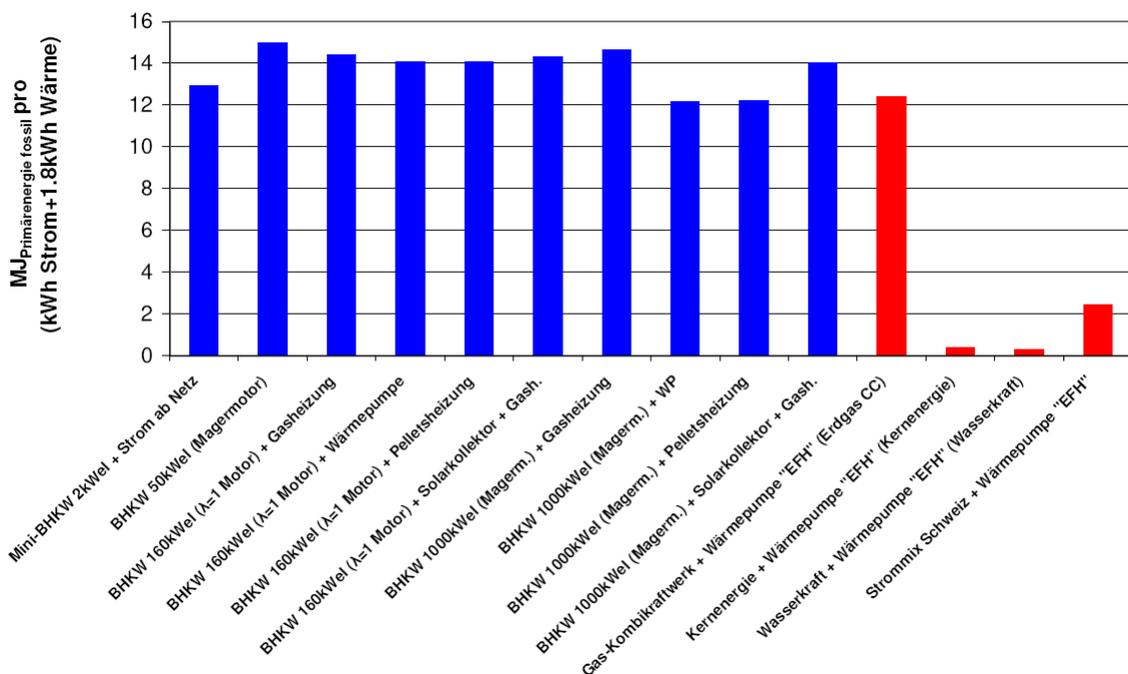


Abbildung 5.1 Fossiler Primärenergiebedarf (nur Resultate für EFH-Kombination „zentrale Stromproduktion + WP 5 kW<sub>th</sub>“ dargestellt).

<sup>11</sup> Die hier unterstellte Rate von 50% Eigenverbrauch bei dezentraler Stromerzeugung entspricht einer für die dezentralen Systeme eher positiven Annahme, da Verbrauch und Produktion nicht nur örtlich, sondern auch zeitlich synchron stattfinden müssen, um nicht ins Stromnetz einspeisen zu müssen.

<sup>12</sup> Als gesellschaftliche Aspekte der Rohstoffförderung wären der Flächenverbrauch oder die fallweise vorkommende Umsiedlung von Personen zur Ermöglichung des Zugriffs zu nennen. Ökonomische Aspekte beinhalten in diesem Zusammenhang beispielsweise die mit zunehmender Knappheit steigenden Preise der Rohstoffe, die damit verbundene Konkurrenzfähigkeit alternativer Energieträger, etc.

Am besten schneiden naturgemäss Wasserkraft und Kernenergie und damit auch der Strommix ab. Der vergleichsweise geringe fossile Energieverbrauch bei Wasserkraft und Kernenergie wird vor allem in zahlreichen Prozessen der Energieketten, also indirekt, verursacht. Beim Strommix fallen die Stromimporte – teilweise aus fossil betriebenen Kraftwerken – ins Gewicht. Bei den verschiedenen BHKW sind hauptsächlich die unterschiedlichen Gesamtwirkungsgrade und die Art der Zusatzheizung (fossil vs. erneuerbar; vor allem bei der 1 MW-Anlage) in den Ergebnissen sichtbar. Beim 1 MW-BHKW wird der Einfluss der Art der Zusatzheizung deutlich: Wärmepumpen und Pelletsheizungen verbrauchen nur sehr geringe Mengen an fossiler Energie.

### 5.1.1.2 Uran

Der Energiegehalt des verbrauchten Urans wird anhand der aus einem kg Natururan gewinnbaren thermischen Energie in heute gängigen Leichtwasserreaktoren von 560'000 MJ/kg berechnet (Frischknecht et al. 2007a).

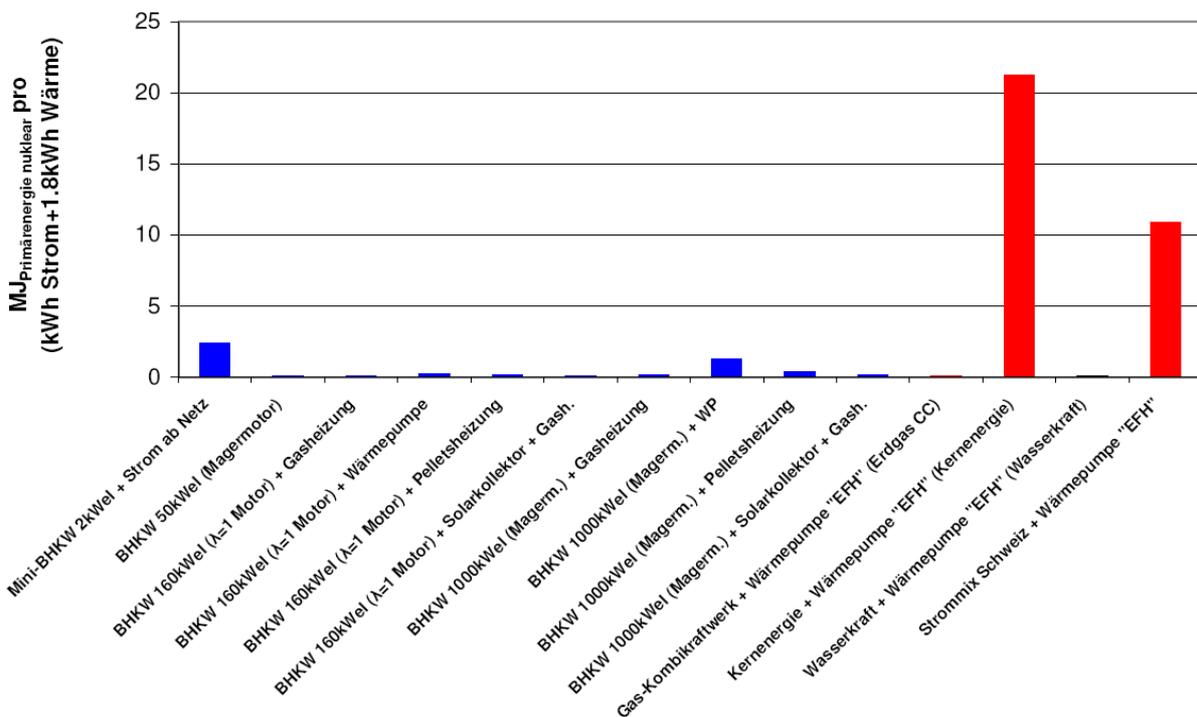


Abbildung 5.2 Nuklearer Primärenergiebedarf (nur Resultate für EFH-Kombination „zentrale Stromproduktion + WP 5 kW<sub>th</sub>“ dargestellt).

Uran wird direkt nur von Kernkraftwerken verbraucht. Deren Beitrag zum Strommix wird bei der Energieversorgung mit „Strommix Schweiz + Wärmepumpe“ und beim Mini-BHKW sichtbar. Die restlichen Technologien brauchen nur indirekt, also über den Stromverbrauch, Uran, z.B. beim Pressen der Holzpellets.

### 5.1.1.3 Erze

Die verbrauchten Mengen an ausgewählten metallischen Erzen werden – gewichtet mit der relativen Knappheit der globalen Vorkommen bezogen auf die Referenzsubstanz Antimon – zu einer Gesamtmasse addiert (nach Guinée et al. 2001a, Guinée et al. 2001b).

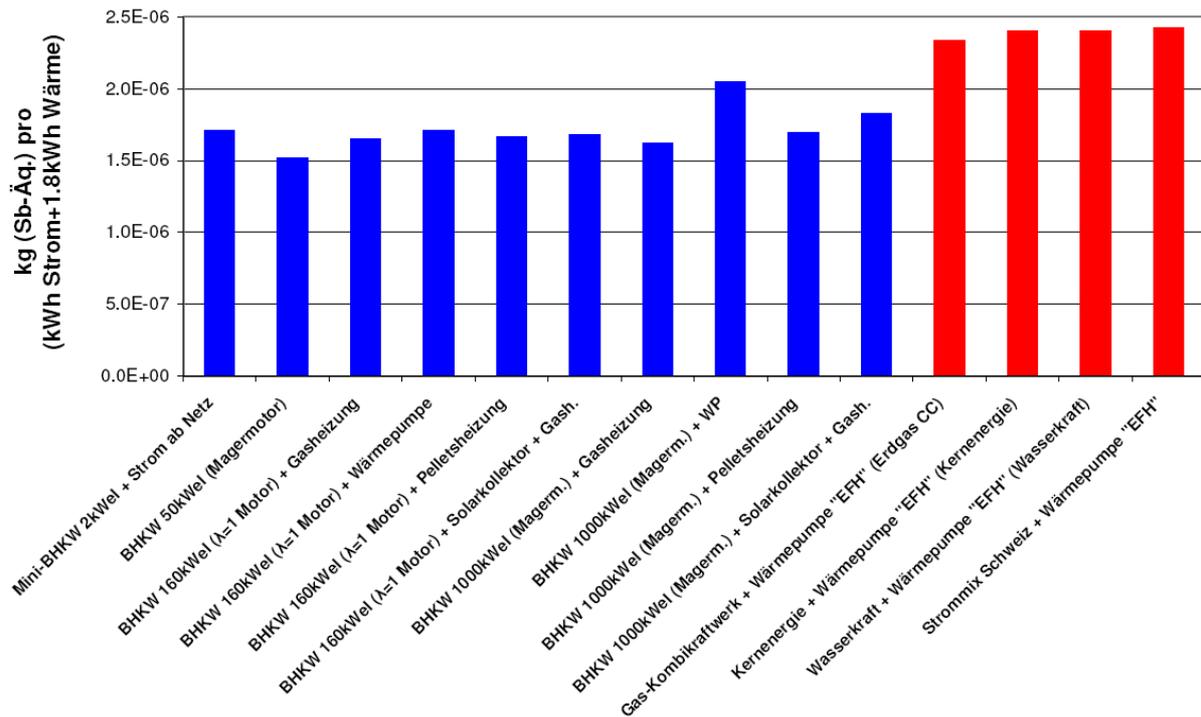


Abbildung 5.3 Verbrauch an metallischen Erzen (nur Resultate für EFH-Kombination „zentrale Stromproduktion + WP 5 kW<sub>th</sub>“ dargestellt).

Dominiert wird dieser Indikator von den Beiträgen des Kupferverbrauchs für das Stromnetz, da einerseits der Mengenverbrauch erheblich ist und andererseits Kupfer als knapper Rohstoff im Vergleich zu anderen Metallen relativ hoch gewichtet wird.<sup>13</sup> Der Unterschied zwischen zentralen und dezentralen Systemen liegt in der Wärmeversorgung: Die Wärmepumpe braucht zusätzlich Strom, der über das Stromnetz transportiert wird, deshalb die grösseren Beiträge aus der Infrastruktur des Stromnetzes und damit die höheren (schlechteren) Indikatorwerte (das gilt in geringerem Ausmass auch für die WP als Zusatzheizung für die beiden grösseren BHKW).

## 5.1.2 Klimawandel

Der von den anthropogenen Treibhausgasemissionen verursachte Klimawandel ist zweifellos nicht nur ein Umweltproblem, da von dessen Folgen die Gesellschaft als Ganzes inkl. unseres Wirtschaftssystems betroffen sein wird. Dieser Umstand sollte bei der Gewichtung der Indikatoren im Rahmen der Multi-Kriterien-Analyse (siehe Kap. 6) berücksichtigt werden.

### 5.1.2.1 Treibhausgasemissionen

Mit diesem Indikator werden die gesamten klimawirksamen Luftemissionen (Treibhausgase) gemessen, gewichtet addiert mit deren Treibhausgaspotenzial (IPCC 2007).

<sup>13</sup> Zur Erinnerung: Alle auf LCA basierenden Indikatoren für den Stromverbrauch werden auf Niederspannungsniveau berechnet.

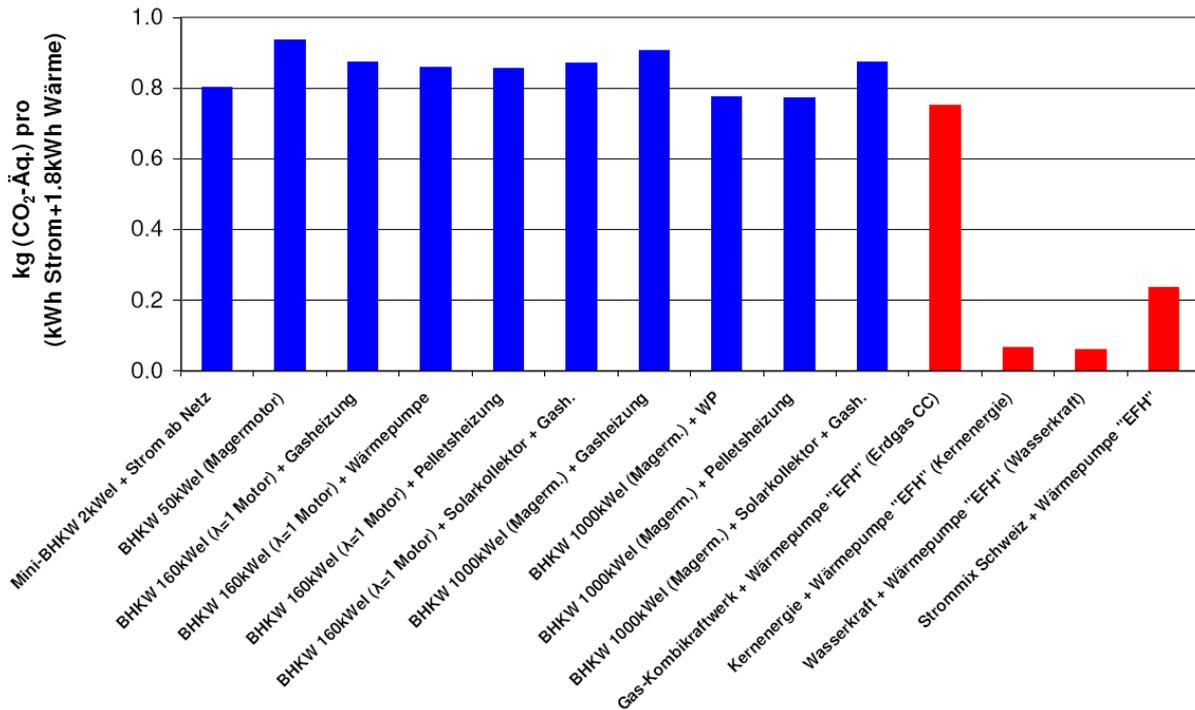


Abbildung 5.4 Treibhausgasemissionen (nur Resultate für EFH-Kombination „zentrale Stromproduktion + WP 5 kW<sub>th</sub>“ dargestellt).

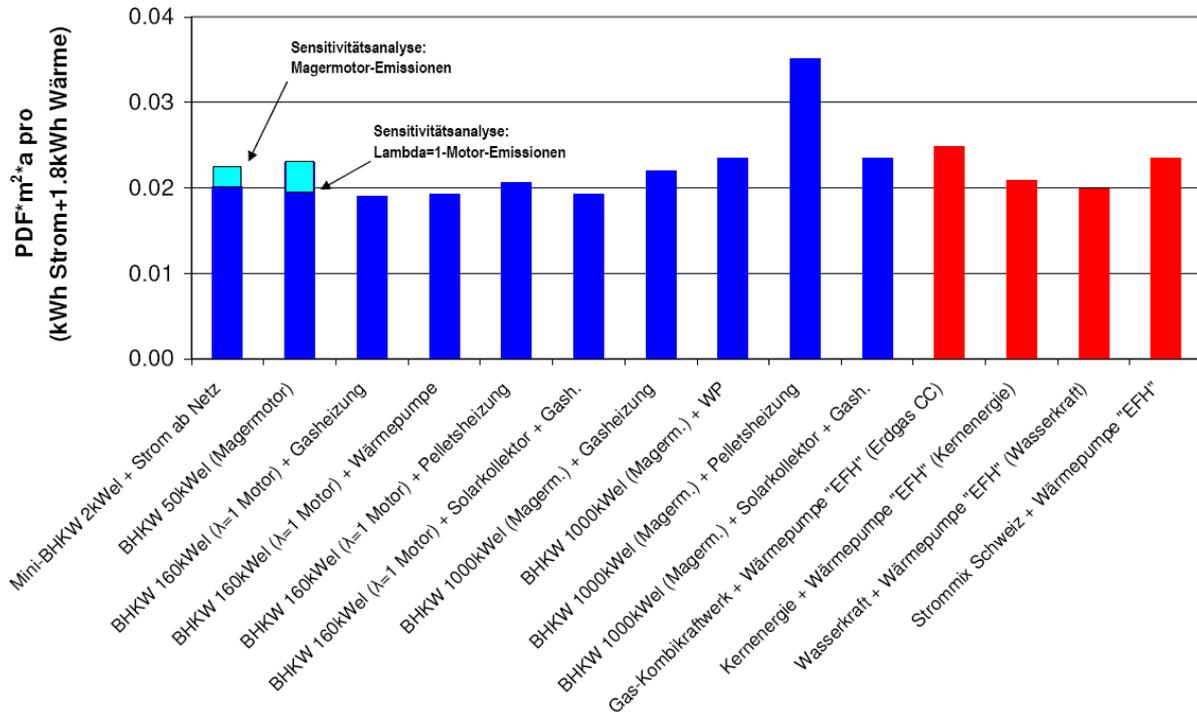
Die Resultate sind jenen des fossilen Primärenergieverbrauchs ähnlich. Am besten schneiden die im Betrieb CO<sub>2</sub>-freien Systeme Wasserkraft und Kernenergie (+ WP) ab, die Emissionen in den restlichen Teilen der Energieketten sind gering. Die Unterschiede innerhalb der BHKW resultieren aus den verschiedenen Gesamtwirkungsgraden und den THG-Emissionen der Zusatzheizungen.

### 5.1.3 Ökosystem

#### 5.1.3.1 Schäden an Flora und Fauna

Negative Auswirkungen auf Ökosysteme werden mit Hilfe der LCIA-Methode Eco-Indicator 99 gemessen (Goedkoop & Spriensma 2000).<sup>14</sup> Dies beinhaltet den Verlust ausgewählter Arten (PDF – „Potentially Disappeared Fraction“) durch den Einfluss von ökotoxischen Substanzen, Landnutzung sowie Versauerung und Überdüngung infolge verschiedener Schadstoffemissionen.

<sup>14</sup> „Hierarchische“ Perspektive, „durchschnittliche“ Gewichtung.



**Abbildung 5.5** Beeinträchtigung der Ökosystemqualität (nur Resultate für EFH-Kombination „zentrale Stromproduktion + WP 5 kW<sub>th</sub>“ dargestellt).

Die Unterschiede zwischen den einzelnen Systemen sind relativ gering, die Ausnahme stellt die Pelletsheizung dar. Hier macht sich der vergleichsweise hohe Landverbrauch der Forstwirtschaft für die Holzpellets bemerkbar. Ein grosser Beitrag stammt aus der Kupferproduktion (Verbrauch für das Stromnetz, vgl. Kap. 5.1.1.3), was die Ergebnisse der zentralen Stromproduktion im Vergleich zu den BHKW verschlechtert.

Die Sensitivitätsanalysen bzgl. Emissionsverhalten der beiden betrachteten BHKW-Technologien (Mager- bzw. λ=1-Motor, Kap. 3.1.1.5) für das Mini-BHKW 2 kW<sub>el</sub> und das 50 kW<sub>el</sub> BHKW zeigen einen relativ geringen Einfluss auf diesen Indikator.

## 5.1.4 Abfälle

Mit den beiden Abfallindikatoren sollen keine tatsächlich auftretenden Umweltschäden als Folge einer sachgerechten Abfallentsorgung quantifiziert werden. Diese Effekte – Emissionen ins Grundwasser und in die Atmosphäre, Verkehrsaufkommen durch den Abfalltransport, etc. – sind von anderen Indikatoren erfasst. Diese Indikatoren sollen es ermöglichen, die von einer nicht wie vorgesehen funktionierenden Abfallentsorgung für Mensch und Umwelt ausgehende potenzielle Gefahr zu berücksichtigen.

### 5.1.4.1 Nicht radioaktive Abfälle

Hier wird die gesamte Menge an nicht radioaktiven Abfällen gemessen, unabhängig davon, um welche Art von nicht radioaktiven Stoffen es sich handelt und wo diese entsorgt werden.

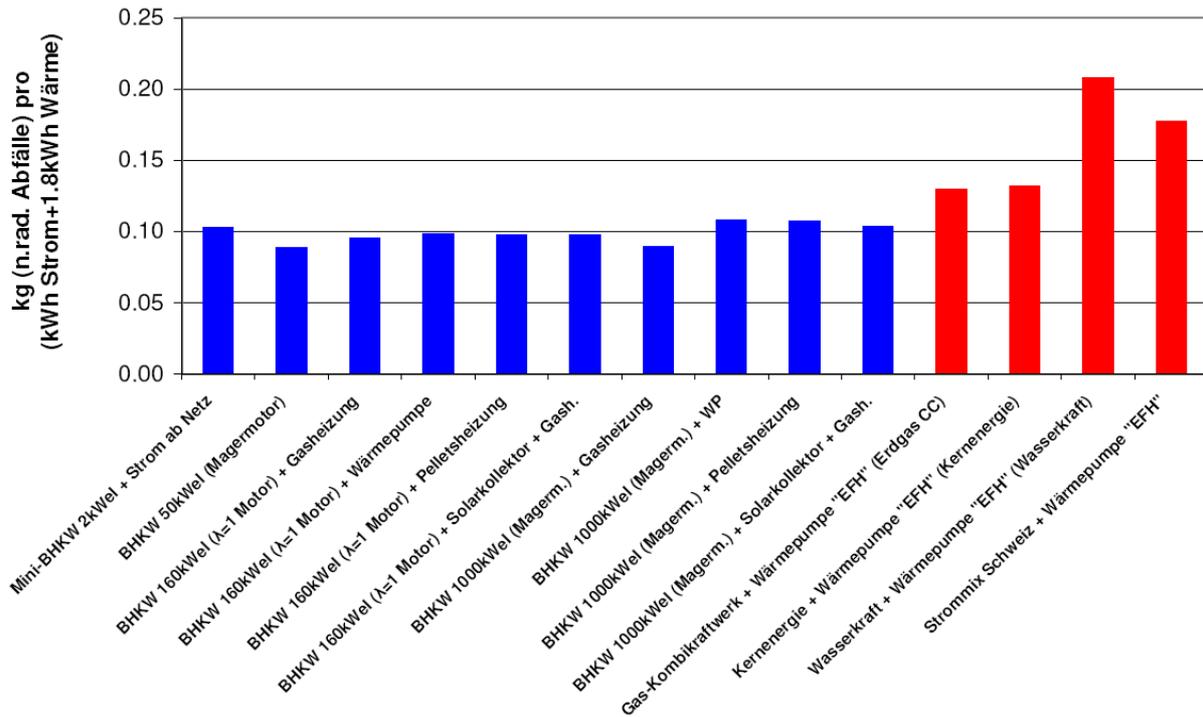


Abbildung 5.6 Nicht radioaktive Abfälle (nur Resultate für EFH-Kombination „zentrale Stromproduktion + WP 5 kW<sub>th</sub>“ dargestellt).

Vergleichsweise grosse Abfallmengen fallen wiederum bei der Kupfergewinnung an, d.h. das Stromnetz (d.h. über den Stromverbrauch, direkt oder durch Wärmepumpen) trägt einen hohen Anteil zu den Ergebnissen dieses Indikators bei. Grosse Abfallmengen fallen auch am Ende der Lebensdauer von Wasserkraftwerken an, Staumauern müssen abgebrochen bzw. ersetzt werden. Die allgemein höheren Werte von zentralen gegenüber dezentralen Systemen resultieren aus der Wärmeversorgung: Die Wärmepumpe braucht zusätzlich Strom, der über das Stromnetz transportiert wird, deshalb die grösseren Beiträge (gilt in geringerem Ausmass auch für die WP als Zusatzheizung für die beiden grösseren BHKW).

#### 5.1.4.2 Radioaktive Abfälle

Dieser Indikator erfasst sämtliche radioaktiven Abfälle, die zur Endlagerung in geologischen Tiefenlagern vorgesehen sind: schwach-, mittel- und hochaktive Substanzen.

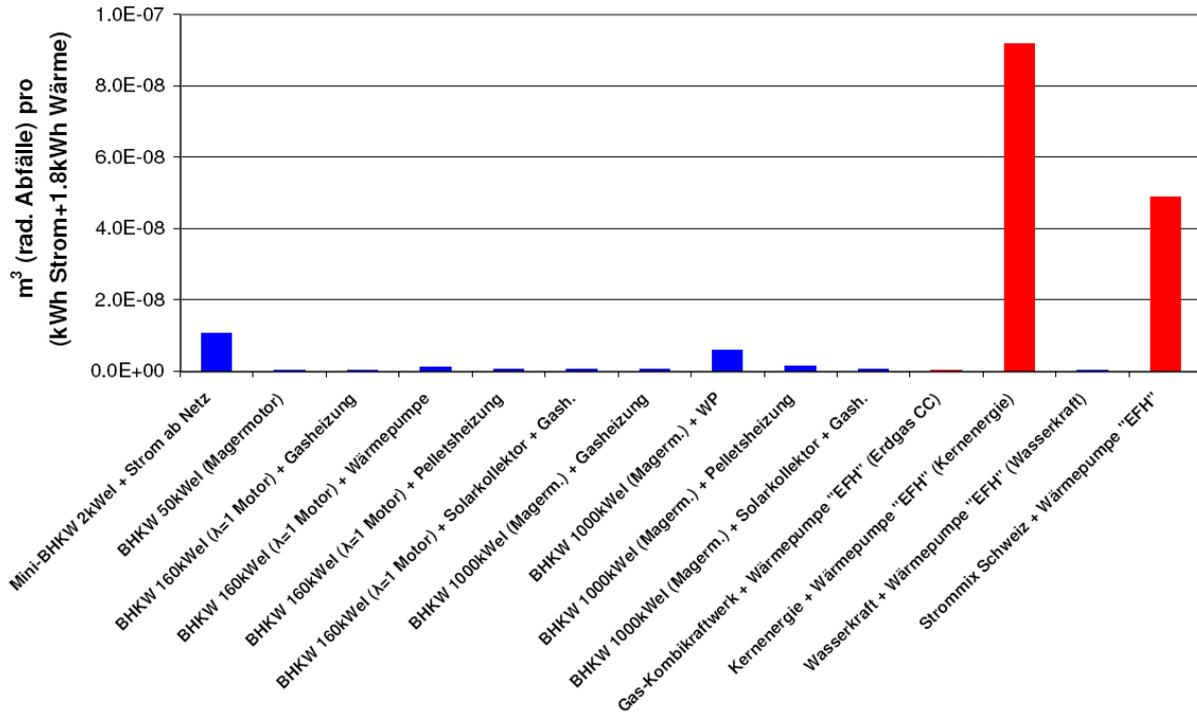


Abbildung 5.7 Radioaktive Abfälle (nur Resultate für EFH-Kombination „zentrale Stromproduktion + WP 5 kW<sub>th</sub>“ dargestellt).

Radioaktive Abfälle fallen direkt nur beim Betrieb von Kernkraftwerken an, indirekt in den verschiedenen Energieketten über den Verbrauch von KKW-Strom, z.B. über Strombezug ab Netz für den Betrieb der Wärmepumpe.

## 5.2 Soziale Aspekte

Unter sozialen Aspekten werden ausgewählte Gesichtspunkte berücksichtigt, die für eine differenzierende Bewertung der analysierten Optionen zur Energieversorgung aus gesellschaftlicher Sicht herangezogen werden können.

### 5.2.1 Menschliche Gesundheit

Hier wird zwischen Schäden an der menschlichen Gesundheit aufgrund des Normalbetriebs der WKK-Anlagen, der Kraftwerke und Heizungen sowie der zugehörigen Energieketten auf der einen Seite sowie den Folgen von schweren Unfällen im Energiesektor auf der anderen Seite unterschieden.

#### 5.2.1.1 Normalbetrieb

Dieser Indikator misst den Verlust an Lebenserwartung (in Form von verlorenen Lebensjahren – Years of Life Lost, „YOLL“), der durch von Luftschadstoffemissionen ausgelösten Gesundheitsschäden verursacht wird. Diese Schäden beinhalten beispielsweise chronische Bronchitis und andere Atemwegserkrankungen, Krebsfälle, etc. Die Schäden werden standortspezifisch (Standort: Schweiz) unter Berücksichtigung der Ausbreitung der Schadstoffe, welche direkt von den WKK-Anlagen, Kraftwerken und Heizungen emittiert werden, und der davon betroffenen Bevölkerung berechnet. Für die so genannten Schadensfaktoren (YOLL pro kg emittiertem Schadstoff) für die im Rest der Energieketten produzierten Schadstoffe werden europäische Durchschnittswerte verwendet.

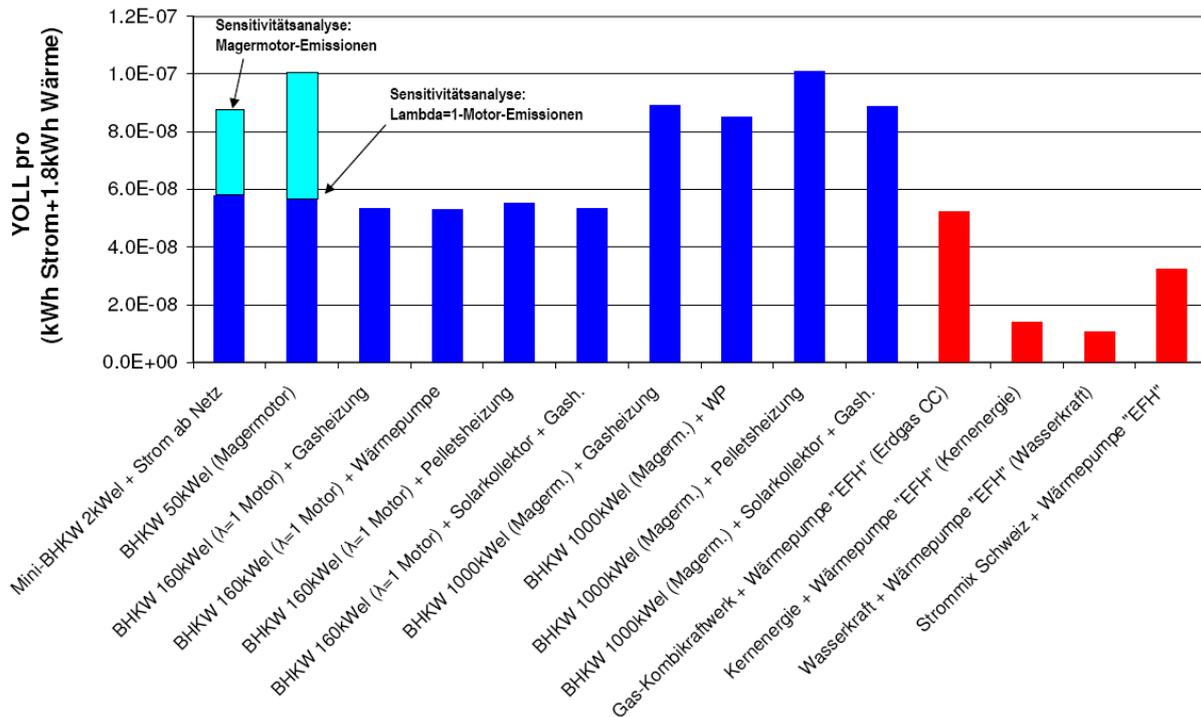


Abbildung 5.8 Verlorene Lebensjahre („YOLL“ – Years Of Life Lost; nur Resultate für EFH-Kombination „zentrale Stromproduktion + WP 5 kW<sub>th</sub>“ dargestellt).

Hauptverantwortlich für die Gesundheitsschäden sind bei den meisten Systemen Stickoxide (NO<sub>x</sub>), Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>) und NMVOC-Emissionen. Partikelemissionen liefern bei der Pelletsheizung und dem Schweizer Strommix (durch Stromimporte) eine nennenswerte Rolle. Die Systeme mit den geringsten Luftschadstoffemissionen sind wiederum Wasserkraft und Kernenergie. Bei den BHKW ist weniger die Anlagenleistung oder die Effizienz entscheidend, sondern die Anlagentechnologie: Die Magermotoren (50 kW<sub>el</sub>- und 1 MW<sub>el</sub>-Anlage) weisen deutlich höhere NO<sub>x</sub>-Emissionen auf als λ=1 Motoren. Beim 1 MW<sub>el</sub> BHKW ist auch der Einfluss der Zusatzheizung auf das Ergebnis zu sehen: am wenigsten gesundheitsschädliche Emissionen verursacht die Wärmepumpe, am anderen Ende der Skala die Pelletsheizung.

Die Sensitivitätsanalysen bzgl. Emissionsverhalten der beiden betrachteten BHKW-Technologien (Mager- bzw. λ=1-Motor, Kap. 3.1.1.5) für das Mini-BHKW 2 kW<sub>el</sub> und das 50 kW<sub>el</sub> BHKW zeigen einen deutlichen Einfluss auf diesen Indikator: Der Hauptunterschied wird von den NO<sub>x</sub>-Emissionen verursacht, die beim Magermotor um einiges höher sind als beim λ=1-Motor.

### 5.2.1.2 Schwere Unfälle

Unter schweren Unfällen werden hier Unfälle im Energiesektor verstanden, bei denen mindestens fünf Todesfälle zu verzeichnen sind. Die berechneten Zahlen stammen aus einer Sammlung an historischen Unfalldaten der Datenbank ENSAD (Burgherr & Hirschberg 2008, Burgherr et al. 2004). Wie bei den Indikatoren im Bereich Umwelt werden hier die kompletten Energieketten berücksichtigt. Die summierten Todesfälle werden auf die von der jeweiligen Energiekette produzierte Energiemenge bezogen.

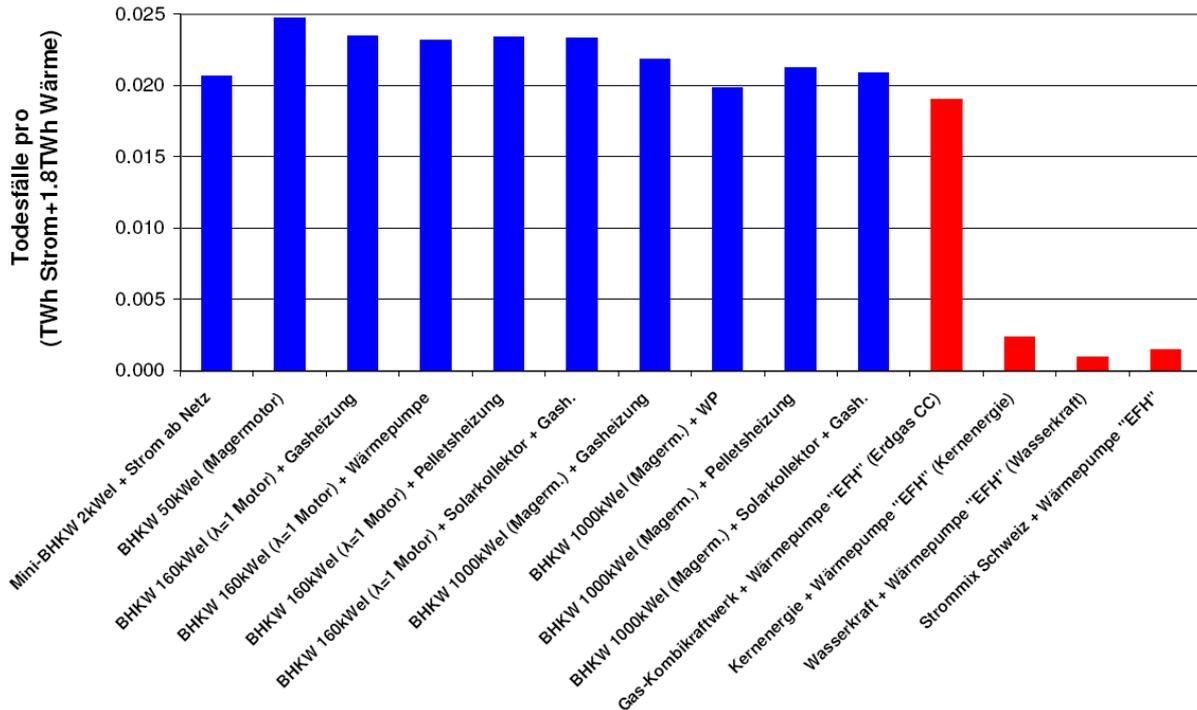


Abbildung 5.9 Todesfälle bei schweren Unfällen im Normalbetrieb (nur Resultate für EFH-Kombination „zentrale Stromproduktion + WP 5 kW<sub>in</sub>“ dargestellt).

Aus den historischen Unfalldaten ergibt sich ein klarer Vorteil von Wasserkraft und Kernenergie gegenüber der Erdgaskette. Welche Heizung gewählt wird, spielt eine vergleichsweise untergeordnete Rolle, wobei die Wärmepumpe am besten abschneidet.

## 5.2.2 Wahrgenommene Risiken

In dieser Kategorie werden potenzielle Risikofaktoren, die aus gesellschaftlicher Sicht eine Rolle spielen und hinsichtlich derer sich die verschiedenen Optionen zur Strom- und Wärmeversorgung unterscheiden, erfasst.

### 5.2.2.1 Risikoaversion (bei Unfällen)

Dieser Indikator quantifiziert die jeweils maximalen Unfallfolgen (in Form von potenziellen Todesfällen), unabhängig von der Wahrscheinlichkeit des Eintretens dieses schwersten anzunehmenden Unfalls und wiederum für die kompletten Energieketten. Es wird für die verschiedenen Technologien(-kombinationen) jeweils nur die „Hauptenergiekette“ betrachtet, d.h. für BHKW und das GuD-Kraftwerk die Erdgaskette, ohne den geringfügigen, indirekten Stromverbrauch aus Kern- und Wasserkraftwerken. Beim Strommix werden die Anteile der einzelnen Energieketten berücksichtigt. Während für fossile Energieketten auf historische Unfalldaten zurückgegriffen wird, stammen die Zahlen für Kernenergie und Wasserkraft aus probabilistischen Berechnungen für die Folgen eines kerntechnischen Störfalls bzw. des Bruchs eines Staudamms in der Schweiz.

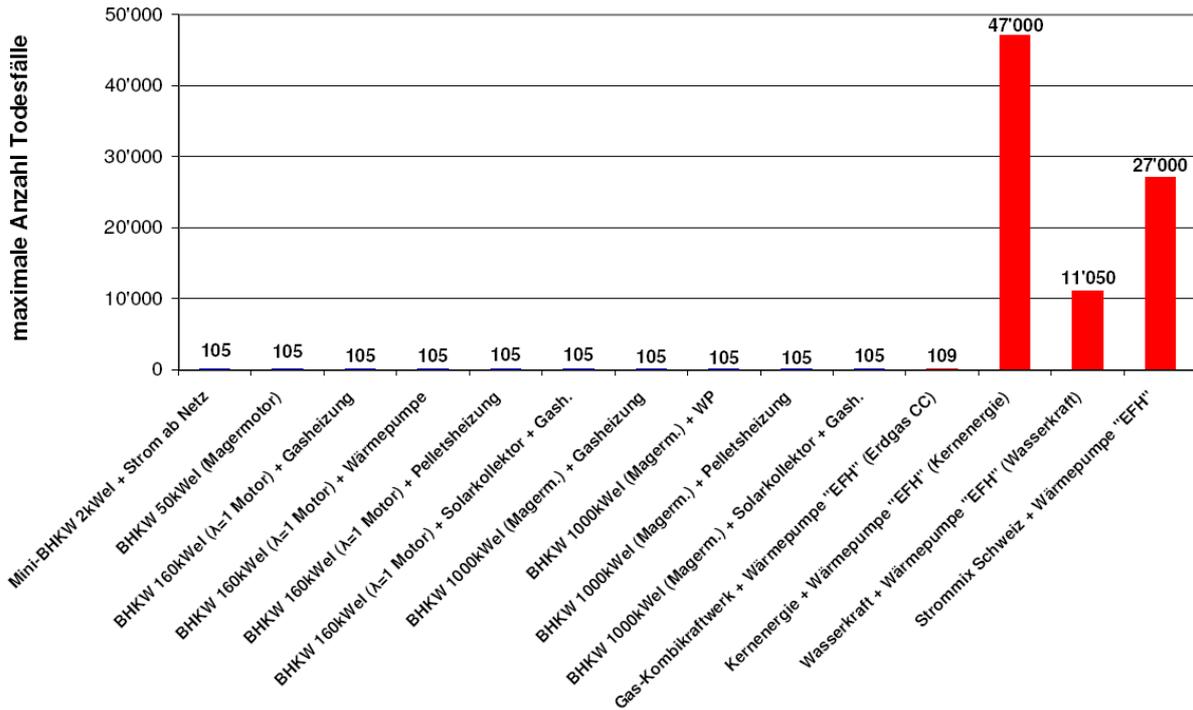


Abbildung 5.10 Maximale Zahl an Todesfällen im Fall von Störfällen (nur Resultate für EFH-Kombination „zentrale Stromproduktion + WP 5 kW<sub>th</sub>“ dargestellt).

Bei Erdgassystemen (BHKW und GuD-Kraftwerk) liegt die Anzahl im Bereich von 100 Todesfällen und ist auf der Skala der Grafik kaum sichtbar. Die grösstmöglichen Folgen können bei einem KKW-Unfall auftreten, aber auch der Bruch eines Staudamms kann schwerwiegende Auswirkungen haben.

### 5.2.2.2 Einschusszeit für "kritische" Abfälle

Die nötige Einschusszeit für radioaktive Abfälle beträgt Hunderttausende von Jahren. Im Vergleich dazu können nicht radioaktive Abfälle vernachlässigt werden. Dieser Indikator gibt deswegen keine absoluten Zeiträume an, sondern repräsentiert den Verbrauch an Strom aus Kernkraftwerken (repräsentativ für die anfallenden radioaktiven Abfälle), sofern nennenswert. Damit soll dem Umstand Rechnung getragen werden, dass die Gesellschaft dafür sorgen muss, dass radioaktive Abfälle über sehr lange Zeiträume sicher verwahrt werden müssen.

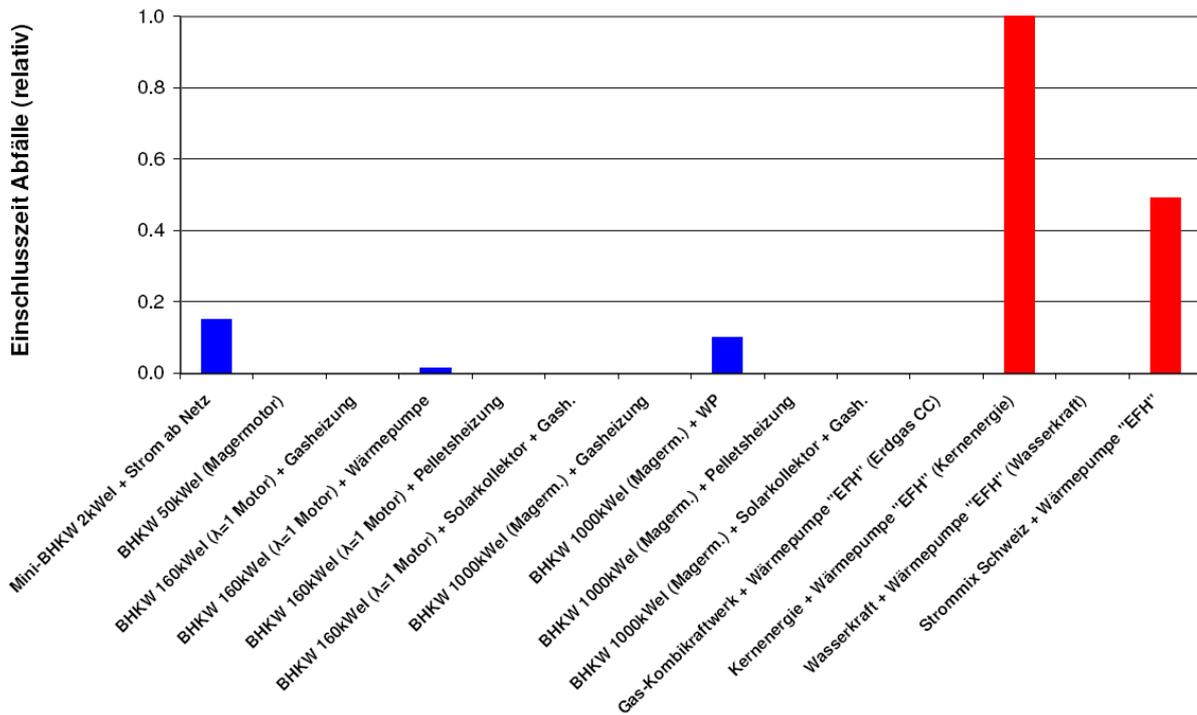


Abbildung 5.11 Relative Einschlusszeit von kritischen (radioaktiven) Abfällen (relative Skala – je höher, desto schlechter; nur Resultate für EFH-Kombination „zentrale Stromproduktion + WP 5 kW<sub>th</sub>“ dargestellt).

Bei den BHKW fallen die Abfälle mit langer Einschlusszeit indirekt über den Verbrauch an Strom aus Kernkraftwerken an.

## 5.2.3 Landschafts- und Siedlungsqualität

Diese Indikatoren sind teilweise subjektiver Natur und messen (auch) von der Bevölkerung wahrgenommene Störungen.

### 5.2.3.1 Visuelle Beeinträchtigungen

Hier werden die objektiv von der jeweiligen Energietechnologie belegte Fläche sowie der Anteil der Bevölkerung, der eine signifikante ästhetische Beeinträchtigung der Region durch den Bau von Energiegewinnungsanlagen wahrnimmt, zu einem Indikator kombiniert. Bei der Abschätzung des Indikatorwertes (basierend auf Expertenbefragungen) werden die vollständigen Energieketten berücksichtigt, d.h. etwa auch die Brennstoffgewinnung und der –transport.

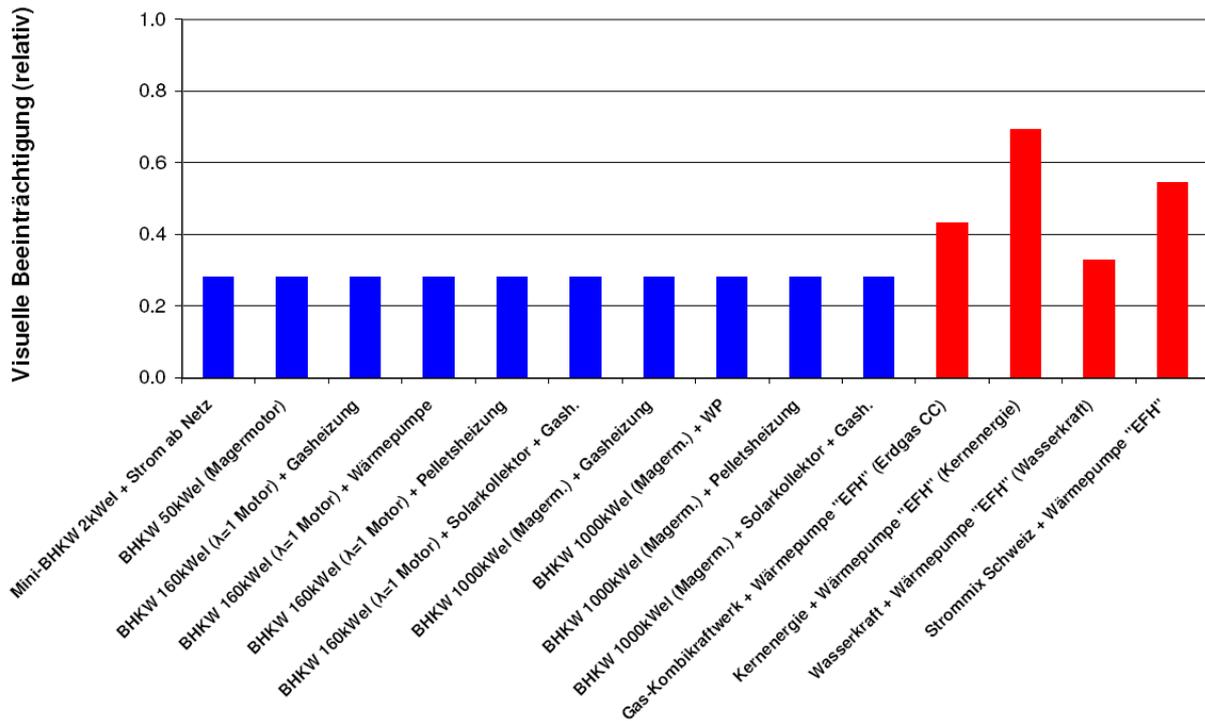


Abbildung 5.12 Visuelle Beeinträchtigung (relative Skala – je höher, desto schlechter; nur Resultate für EFH-Kombination „zentrale Stromproduktion + WP 5 kW<sub>th</sub>“ dargestellt).

Die BHKW befinden sich zwar in Gebäuden und stellen keine visuelle Störung dar, Erdgasgewinnung, -aufbereitung, -transport und -speicherung sind Anrainern aber mitunter ein Dorn im Auge. Die grösste Störung verursachen offensichtlich KKW-Kühltürme. Weniger negativ werden Gas- und Wasserkraftwerke wahrgenommen.

### 5.2.3.2 Verkehrsaufkommen (Gütertransport)

Dieser Indikator misst das gesamte in den Energieketten auftretende Verkehrsaufkommen für den Gütertransport auf Strasse und Schiene; er soll das damit verbundene Potenzial an subjektiver und objektiver Störung (beispielsweise durch Lärm) repräsentieren.

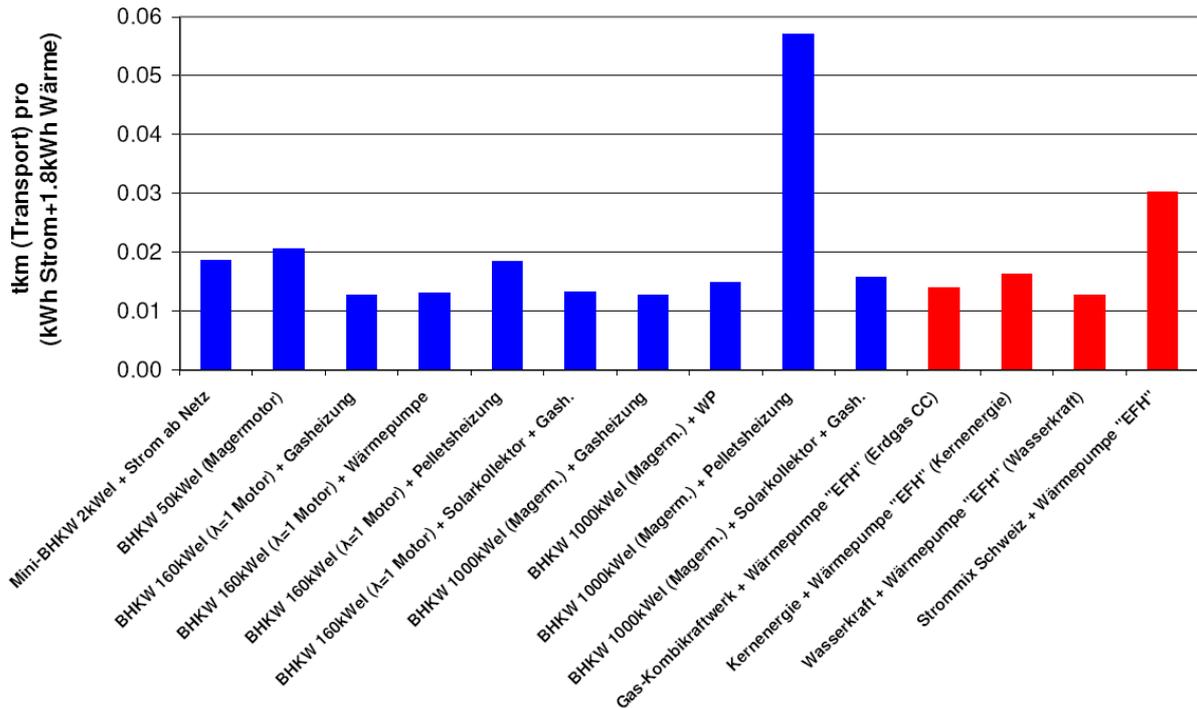


Abbildung 5.13 Verkehrsaufkommen durch Gütertransport (nur Resultate für EFH-Kombination „zentrale Stromproduktion + WP 5 kW<sub>th</sub>“ dargestellt).

Die mit Abstand grössten Auslöser von Gütertransporten sind der Holztransport für die Holzpelletsproduktion sowie der Transport der fertigen Pellets zum Verbraucher.

## 5.3 Wirtschaft

Der Bereich Wirtschaft beinhaltet Indikatoren, welche die Beschäftigung messen, die Energieproduktionskosten und verschiedene Faktoren, die für Versorgungssicherheit und Flexibilität der Energieversorgung eine Rolle spielen.

### 5.3.1 Leistungen der Branche

#### 5.3.1.1 Beschäftigung

Dieser Indikator misst die Zahl der Arbeitsplätze, die mit der Bereitstellung von Strom und Raumwärme durch die verschiedenen Systeme verbunden ist. Dies beinhalten sowohl die Herstellung, Installation und Wartung der Anlagen, als auch die Produktion und Bereitstellung der Brennstoffe sowie der Elektrizität über das Stromnetz. Die Arbeitsintensität der BHKW basiert auf Daten zur Produktivität der Herstellung von Motoren, ergänzt um die zusätzlichen Anlagenteile und den Installationsaufwand in neuen Gebäuden. Die so erhaltenen Werte wurden konservativerweise mit einem „Sicherheitsfaktor“ von 3 multipliziert. Für die Wärmepumpen und Zusatzheizungen wurden die entsprechend gleiche Arbeitsintensität angenommen, wobei die Arbeitsintensität jeweils basierend auf den Kostendaten an die Anlagenleistungen angepasst wurde. Insgesamt dominiert der Anteil der Brennstoffversorgung an der Arbeitsintensität der Gesamtsysteme gegenüber den installierten Anlagen. Die Arbeitsintensität der Gasversorgung basiert auf detailliert verfügbaren Daten aus den USA. Die Arbeitsintensität der Stromversorgung aus zentralen Kraftwerken beinhaltet die vollständigen Elektrizitätsketten, inkl. Brennstoffversorgung, Bau und Betrieb der Kraftwerke. Für den Strommix wurde ein gewichteter Schnitt der einzelnen Technologien berechnet.

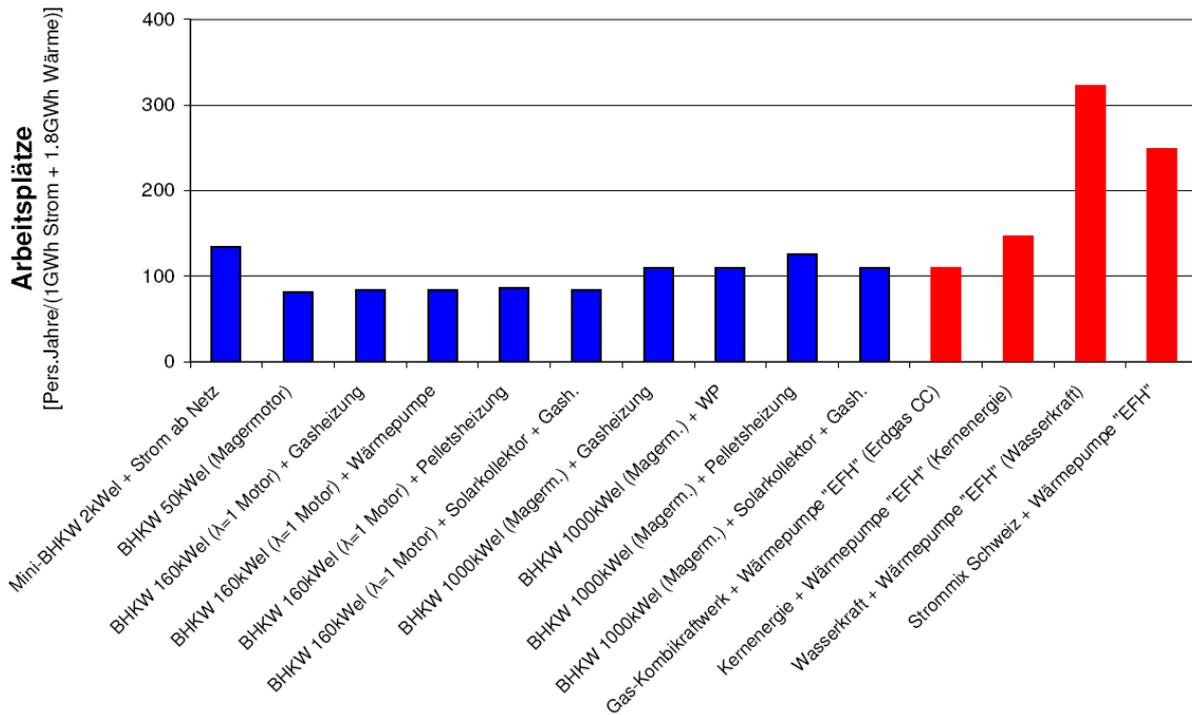


Abbildung 5.14 Arbeitsplätze (nur Resultate für EFH-Kombination „zentrale Stromproduktion + WP 5 kW<sub>th</sub>“ dargestellt).

Die Erdgastechnologien sind generell am wenigsten arbeitsintensiv. Beim 2 kW<sub>el</sub> BHKW wirkt sich der externe Strombezug auf das Ergebnis aus, beim 1 MW<sub>el</sub> BHKW die zusätzliche Wärmequelle. Den grössten Beschäftigungseffekt löst den verfügbaren Daten zufolge Strom ab Wasserkraftwerken aus. Eine detaillierte Aufschlüsselung der Ergebnisse in die einzelnen Komponenten ist im Anhang, Kap. 8.1, zu finden.

## 5.3.2 Wirkung auf die Kunden

### 5.3.2.1 Energiekosten

Die Energiekosten beinhalten die Kosten von Strom und Wärme ab BHKW und der Zusatzheizungen bei dezentralen Systemen bzw. für zentrale Systeme die Elektrizitätskosten (abhängig vom Kraftwerkstyp) und die Kosten der Wärme ab Wärmepumpe. Dazu kommen jeweils die Kosten für die Wärmeverteilung im Haus – angenommen wird hier die Installation einer Fussbodenheizung für alle Heizungsoptionen. Bei der Berechnung der Gesamtkosten werden die (amortisierten) Kapitalkosten der jeweiligen Systeme berücksichtigt, die Kosten von Betrieb und Wartung sowie die Brennstoffkosten und Elektrizitätskosten (Produktion, Übertragung und Verteilung, Einspeisevergütung für Strom aus neuen Erneuerbaren). Die Systemkosten (Übertragung und Verteilung, Einspeisevergütung) wurden für alle Produktionstechnologien als identisch angenommen (pro kWh Elektrizität) und betragen 7.5 Rp./kWh. Tarife abhängig von Lastprofilen wurden nicht berücksichtigt. Bei den dezentralen BHKW-Optionen wird in erster Näherung angenommen, dass 50% des produzierten Stroms extern über das Stromnetz verteilt wird. Dieser Anteil wird mit den Systemkosten beaufschlagt.

Die angegebenen Energiekosten beziehen sich auf die Produktion bzw. Bezug von 1 MWh Elektrizität plus 1.8 MWh Nutzwärme. Steuern werden weder beim Strombezug aus den Grosskraftwerken, noch bei der Produktion mit BHKW berücksichtigt, da sie aus Sicht der Gesellschaft lediglich eine Transferleistung darstellen.

Die Stromerzeugungskosten wurden für den heutigen Schweizer Kernenergiemix auf 5 Rp./kWh geschätzt, für die bestehenden Wasserkraftanlagen auf heute durchschnittlich rund 10 Rp./kWh. Für die Stromerzeugung in neuen Erdgaskraftwerken werden Kosten von 8.5 Rp./kWh veranschlagt. Die Kostendaten der BHKW stammen weitgehend aus (Gantner et al. 2001), (BFE 2003), (Heck & Bauer 2005), (ASUE 2005), (MiniBHKW 2009), (Vaillant 2009).<sup>15</sup> Die Berechnung der Kosten der Heizungen basiert auf Angaben in (VSG 2009, KlimaInnovativ 2009, IEA 2009, CEC 2009).

Bei den Kosten für Erdgas wurde zwischen verschiedenen Druckniveaus bzw. Abnahmemengen unterschieden. Während die „kleinen“ BHKW (2 kW<sub>el</sub>, 50 kW<sub>el</sub> und 160 kW<sub>el</sub>) Erdgas auf Niederdruckniveau zum Endkundenpreis beziehen, stammt der Brennstoff für das 1 MW<sub>el</sub> BHKW und das Kombikraftwerk aus der Hochdruckleitung. Es werden drei verschiedene Erdgastarife berücksichtigt: 80 CHF/MW<sub>th</sub> für den Betrieb des 2 kW<sub>el</sub> BHKW, 60 CHF/MW<sub>th</sub> für die 50 kW<sub>el</sub>, 160 kW<sub>el</sub> und 1 MW<sub>el</sub> BHKW und 45 CHF/MW<sub>th</sub> für das GuD-Kraftwerk (VSG 2008, Axpo 2009, Erdgas Zürich 2009, EWB 2009). Für den Preis der Pellets wurde der Durchschnitt des Zeitraums Dezember 2007 bis Oktober 2008 von rund 7.5 Rp./kWh<sub>th</sub> verwendet (Holzenergie Schweiz 2008).

Detaillierte Kostenaufstellungen für alle Systeme sind im Anhang (Kap. 8.1) zu finden, ebenso eine detaillierte Aufschlüsselung der Gesamtkosten in Beiträge einzelner Komponenten.

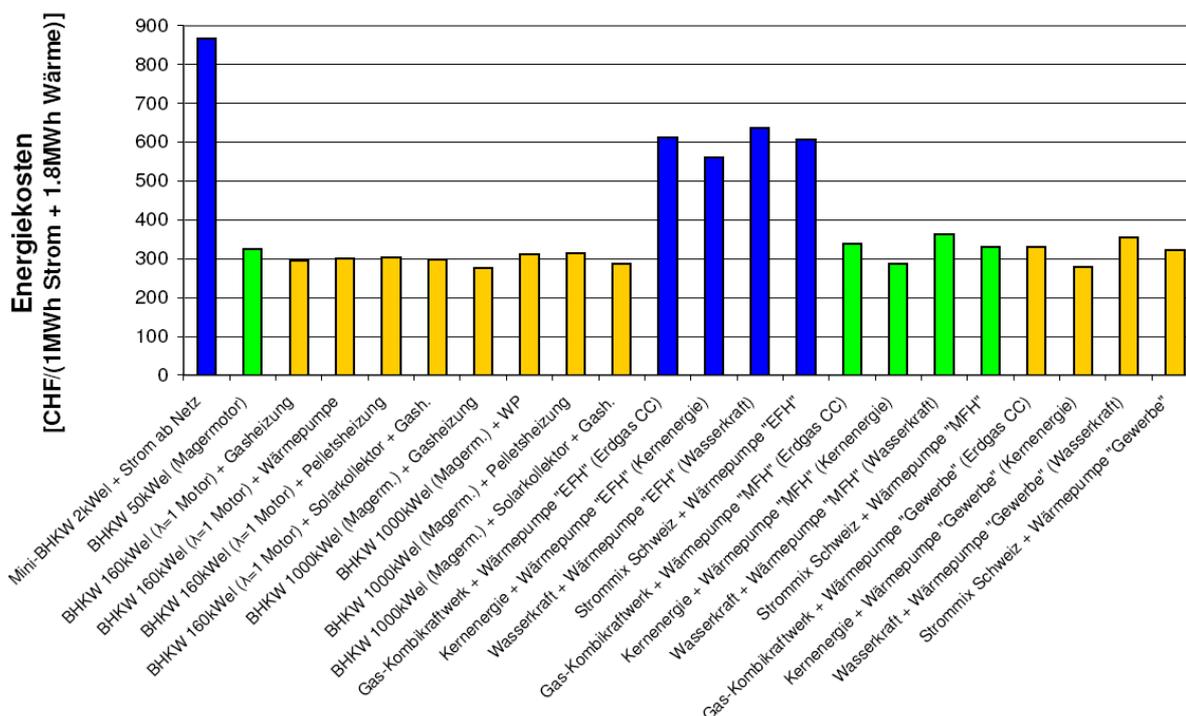


Abbildung 5.15 Energiekosten; blau: EFH, grün: MFH, orange: Industrie/Gewerbe.

### 5.3.3 Versorgungssicherheit und Flexibilität

#### 5.3.3.1 Beitrag zur Autonomie der Energieversorgung

Dieser Indikator berücksichtigt einerseits, ob der Brennstoff zur Energieversorgung aus heimischen Quellen stammt oder importiert werden muss, andererseits, ob er erneuerbar ist oder nicht. Weiter wird die Lagerfähigkeit von importierten, nicht erneuerbaren Energieträgern berücksichtigt. Dies ergibt für Erdgas einen Wert von Null (0), für Kernenergie von fünf (5) und für Wasserkraft, Pellets und Sonne

<sup>15</sup> Kapitalkosten: relativ geringer Einfluss auf die Gesamtenergiekosten; evtl. Unterschätzung; Anhang: Grafik Kostensplit

zehn (10). Die Indikatorwerte der verschiedenen Systeme werden basierend auf den Beiträgen der einzelnen Energieträger berechnet.

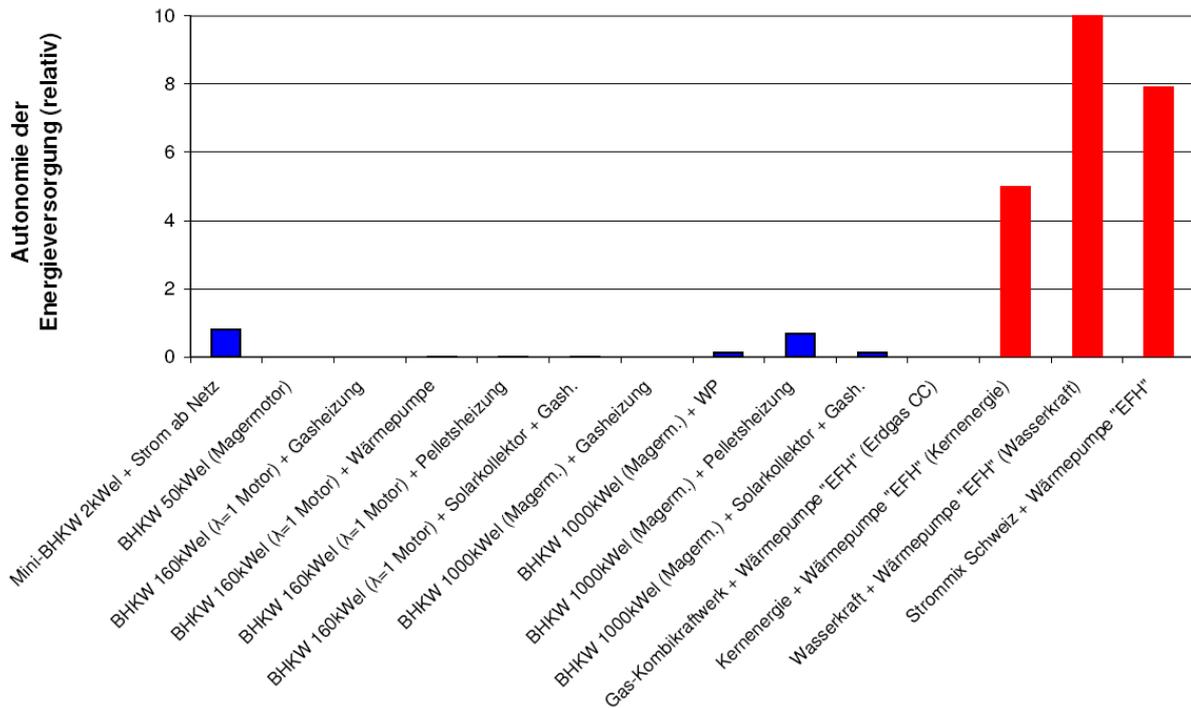


Abbildung 5.16 Autonomie der Energieversorgung (relative Skala – je höher, desto besser; nur Resultate für EFH-Kombination „zentrale Stromproduktion + WP 5 kW<sub>th</sub>“ dargestellt).

### 5.3.3.2 Brennstoffpreisvolatilität

Dieser Indikator beruht auf dem Verhältnis Primärenergiekosten zu durchschnittlichen Energiekosten der Systemoptionen. Je niedriger der Index, desto besser das System. Bei den verschiedenen Erdgassystemen entsprechen die Primärenergiekosten dem Endkundenpreis für den Brennstoff, d.h. den drei unterschiedlichen Bezugstarifen für Klein-, Mittel- und Grossverbraucher (siehe Kap. 5.3.2.1).

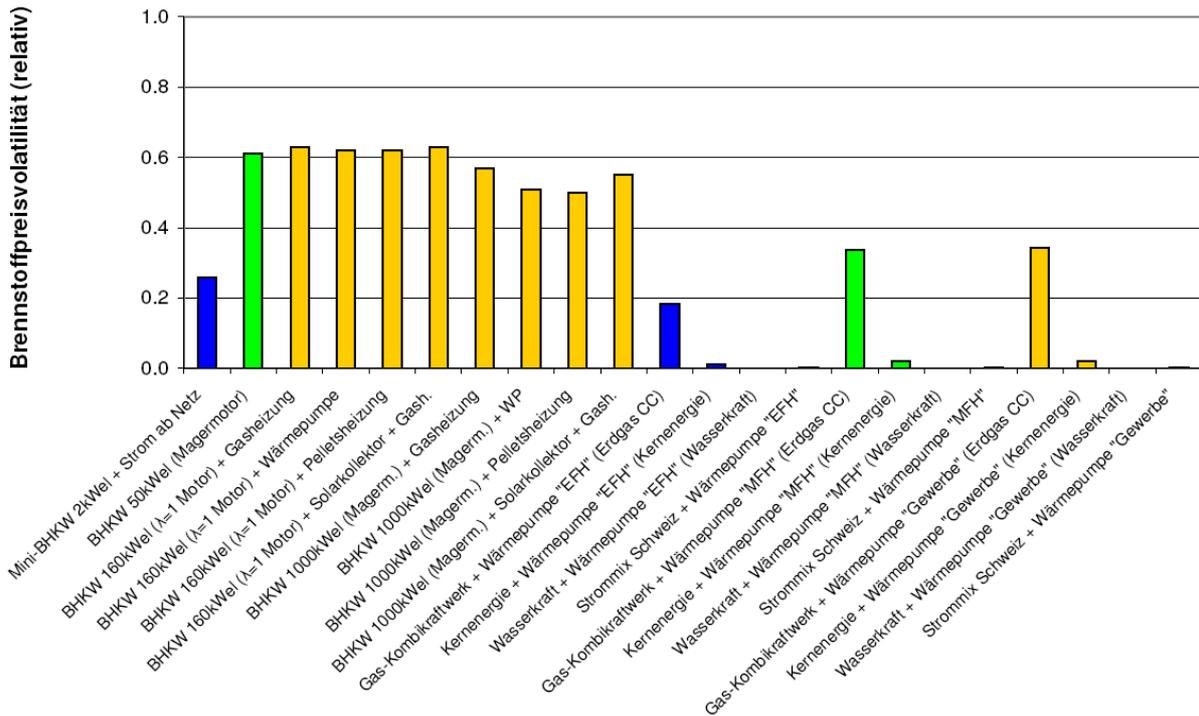


Abbildung 5.17 Brennstoffpreisvolatilität (relative Skala – je niedriger, desto besser); blau: EFH, grün: MFH, orange: Industrie/Gewerbe.

Je höher der Anteil der Primärenergiekosten (Brennstoffkosten) an den Gesamtkosten der verschiedenen Optionen, desto schlechter das Ergebnis. Das 2 kW<sub>el</sub> BHKW schneidet vor allem wegen der höheren Gesamtkosten besser ab als die BHKW höherer Leistung. Die Kostenanteile der „Brennstoffe“ bei Kernenergie und Wasserkraft sind vergleichsweise gering.

### 5.3.3.3 Flexibilität aufgrund der Grenzkosten aus Verbraucherperspektive

Die Grenzkosten für den Verbraucher werden als Summe von Brennstoffkosten, Strombezugspreisen und variablen Betriebs- und Wartungskosten berechnet<sup>16</sup>. Je geringer die Grenzkosten, desto besser ist das System.

<sup>16</sup> Da der Nutzwärmebezug als nicht regelbar angenommen wird, werden sämtliche Wartungs- und Betriebskosten als fixe Kostenbestandteile kategorisiert.

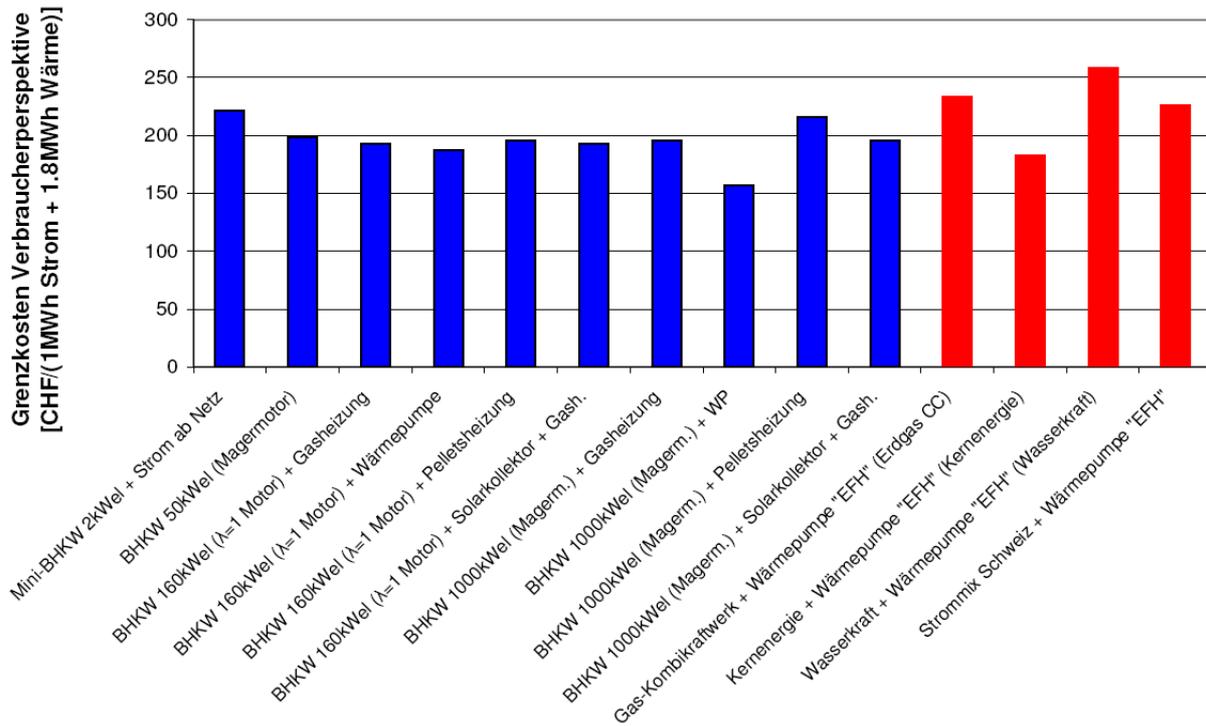


Abbildung 5.18 Grenzkosten der Energiebereitstellung (nur Resultate für EFH-Kombination „zentrale Stromproduktion + WP 5 kW<sub>th</sub>“ dargestellt).

### 5.3.3.4 Flexibilität der Produktion

Dieser Indikator gibt an, wie flexibel eine Technologie(kombination) aus Sicht des Betreibers des Gesamtenergiesystems zur Stabilisierung des Systems genutzt werden kann. Er wird auf einer relativen Skala gemessen und basiert auf Expertenschätzungen bezüglich des Beitrags der Technologie(kombination) zur flexiblen Regelung des Gesamtsystems. Je höher der relative Indikatorwert, desto besser eine Technologie(kombination). Da für die BHKW ein wärmegeführter Betrieb angenommen wird und deswegen die Stromerzeugung kaum an den Gesamtbedarf angepasst werden kann, werden die BHKW als nicht flexibel kategorisiert. Bei den zentralen Kraftwerken wird der Bedarf an Raumwärme und Strom zum Betrieb der Wärmepumpen als nicht regelbar bzw. fix vorgegeben angenommen. Die verschiedenen Kraftwerkstechnologien unterscheiden sich jedoch hinsichtlich Flexibilität der Stromproduktion. Unter den zentralen Optionen schneidet die wenig flexible Stromproduktion mit Kernkraftwerken am schlechtesten ab, am besten die Erdgassysteme. Dazwischen liegt das Ergebnis für Strom aus Wasserkraftwerken.<sup>17</sup>

In Zukunft kann damit gerechnet werden, dass mit Hilfe so genannter „smart grids“ eine grosse Anzahl BHKW zentral geregelt werden kann und BHKW damit besser zu einer flexiblen Versorgung beitragen werden.

<sup>17</sup> Laufkraftwerke sind im Gegensatz zu Speicherkraftwerken schlecht regelbar.

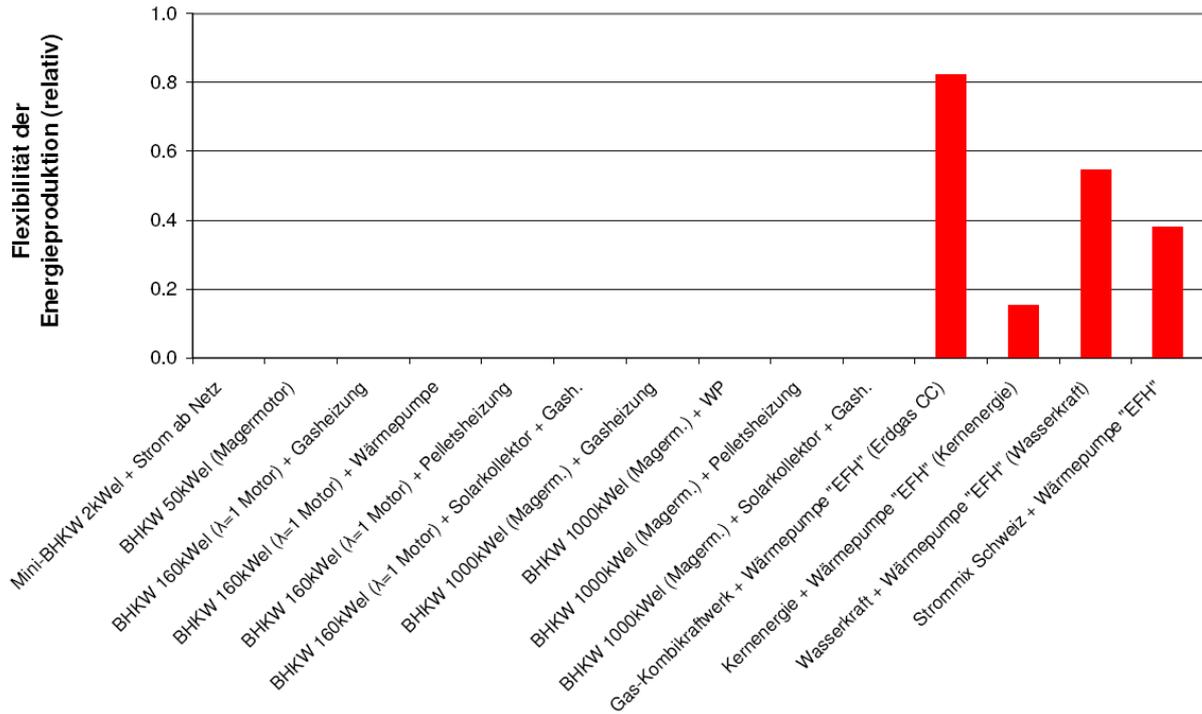


Abbildung 5.19 Flexibilität der Produktion (relative Skala – je höher, desto besser; nur Resultate für EFH-Kombination „zentrale Stromproduktion + WP 5 kW<sub>th</sub>“ dargestellt).

## 6 Multi-Kriterien-Analyse

Die Multi-Kriterien-Analyse („Multi-Criteria-Decision-Analysis, MCDA) dient dazu, die technologie-spezifischen Ergebnisse der einzelnen Indikatoren zu aggregieren und damit die verschiedenen Technologieoptionen anhand einer einzigen Masszahl (hier: der so genannte „Nachhaltigkeits-Index<sup>18)</sup> vergleichen zu können.<sup>19</sup> Die MCDA in dieser Studie basiert wie bereits in diversen früheren Arbeiten dieser Art (Hirschberg et al. 2004, Hirschberg et al. 2007, Roth et al. 2008) auf dem so genannten „weighted sum approach“. Dabei müssen die einzelnen Indikatoren, die in Haupt- und Unterkategorien (oder -ebenen) eingeteilt sind, normiert<sup>20</sup> und anschliessend gewichtet werden. Das heisst, dass die Bedeutung der Indikatoren im Hinblick auf eine nachhaltige Energieversorgung individuell festgelegt werden kann, was die Berücksichtigung unterschiedlicher Wertvorstellungen und Präferenzen möglich macht. Daraus folgt, dass es kein „richtiges“ Resultat der Multi-Kriterien-Analyse geben kann, je nach Gewichtung fallen die Resultate unterschiedlich aus. Üblicherweise können jedoch klare Trends in den Ergebnissen aufgezeigt und allgemein gültige Aussagen für die Reihung der bewerteten Optionen getroffen werden. Im Folgenden werden die Resultate verschiedener MCDA-Varianten, d.h. unterschiedlicher Gewichtungsprofile inkl. Sensitivitätsanalysen, dargestellt und diskutiert.

Verglichen werden dabei jeweils Anlagen mit einem ähnlichen Einsatzzweck, d.h. in einer vergleichbaren Leistungsklasse. Das 2 kW<sub>el</sub> BHKW für Einfamilienhäuser wird mit der Kombination von zentral erzeugter Elektrizität und Raumwärme ab Wärmepumpe mit ähnlicher jährlicher Raumwärmeproduktion verglichen. Das gleiche gilt für die grösseren BHKW (50 kW<sub>el</sub> für Mehrfamilienhäuser; 160 kW<sub>el</sub> und 1 MW<sub>el</sub> für Gewerbegebäude, Industrie, Einkaufszentren, Spitäler)<sup>21</sup>. Die Wärmeversorgung mit Nahwärmeverbunden wird hier nicht betrachtet. Für diese Studie wird angenommen, dass sich die Wärmepumpen der verschiedenen Leistungsklassen lediglich aus ökonomischer Sicht nennenswert unterscheiden, d.h. bei den Indikatoren „Energiekosten“ (Kap. 5.3.2.1) und „Brennstoffpreisvolatilität“ (Kap. 5.3.3.2). Die möglichen Auswirkungen der WP-Leistung auf andere Indikatoren werden in erster Näherung als nicht relevant für die Ergebnisse der Nachhaltigkeitsbeurteilung angesehen.

### 6.1 Interpretation

**Die Art und Weise, wie der Nachhaltigkeitsindex in dieser Studie berechnet wird, erlaubt ausschliesslich den direkten Vergleich von Technologien, die demselben Einsatzzweck dienen. Das bedeutet, dass Vergleiche der Absolutwerte des Nachhaltigkeitsindex zwischen den verschiedenen Leistungsklassen „EFH“, „MFH“ und „Gewerbe/Industrie“ nicht zulässig sind.**

Grund dafür ist, dass die Normierung der Einzelindikatoren und die Berechnung der Indexwerte jeweils nur mit jener Auswahl an Technologien erfolgt, die in der jeweiligen Klasse einsetzbar sind. Dieses Vorgehen verhindert, dass die aggregierten Ergebnisse der Technologien in einer bestimmten Klasse durch die Berücksichtigung von minimalen oder maximalen Indikatorwerten von Technologien ausserhalb dieser Klasse verzerrt werden. Das erhöht die Differenzierung in den Gesamtergebnissen

<sup>18</sup> Je höher der Index, bzw. je mehr Punkte ein System erreicht, desto besser das Ergebnis aus Sicht der Nachhaltigkeit.

<sup>19</sup> Die einzelnen Indikatoren sind in Kap. 5 beschrieben und für die verschiedenen Technologien quantifiziert.

<sup>20</sup> Normiert bedeutet in diesem Zusammenhang, dass sämtliche technologiespezifischen Ergebnisse eines Indikators ins Verhältnis gesetzt werden zum Ergebnis der bei diesem Indikator „schlechtesten“ bzw. „besten“ Technologie. Die beste Technologie erhält je Indikator 100 Punkte, die schlechteste Null Punkte.

<sup>21</sup> Wärmepumpen mit einer Jahreswärmeproduktion wie das 1 MW<sub>el</sub> BHKW sind am Markt nicht als Massenprodukte erhältlich. Es wird deshalb hier angenommen, dass im Vergleich mit dem 1 MW<sub>el</sub> BHKW die Wärmepumpe, die der Produktion des 160 kW<sub>el</sub> BHKW entspricht, mehrere Male installiert ist. Für die Indikatoren der Optionen zentraler Stromproduktion + WP ergeben sich daraus keine Unterschiede, die beiden BHKW 160 kW<sub>el</sub> und 1 MW<sub>el</sub> werden gemeinsam damit verglichen.

innerhalb der einzelnen Bereiche EFH, MFH und Gewerbe/Industrie und ermöglicht aussagekräftigere Resultate.

Diese „Einschränkung“ resultiert aus dem hier verwendeten „weighted sum approach“ zur Gewichtung und Aggregation der Einzelindikatoren zum Nachhaltigkeitsindex, da die bei jedem Einzelindikator beste und schlechteste Technologieoptionen den Wertebereich bestimmen, in dem die Ergebnisse normiert werden. In diesem Bereich werden also zwischen Null (=Minimum) und 100 Punkte (=Maximum) vergeben. Wird eine neue Technologie berücksichtigt, die bei einem Indikator ein Ergebnis ausserhalb des Wertebereichs der bisher berücksichtigten Technologien liegt, so wird dieser Technologie neu der normierte Wert Null oder 100 zugewiesen und als Folge davon verändert sich das normierte Ergebnis der anderen Technologien bei diesem Indikator. Zu einer Verzerrung in den verschiedenen Leistungsklassen würde es kommen, wenn das Minimum oder Maximum bei einzelnen Indikatoren von Technologien gebildet würde, die in der betrachteten Leistungsklasse nicht eingesetzt werden können, insbesondere wenn diese Technologien in ihren Ergebnissen weit ausserhalb des Wertebereichs der tatsächlich in einer Leistungsklasse auftretenden Indikatorwerte liegen.

## 6.2 Gewichtung

### 6.2.1 „Standard“-Profil

Als „Standard“-Profil wird die Referenzgewichtung bezeichnet: Diese soll einer gesellschaftlich allgemein akzeptablen, konsensorientierten und von naturwissenschaftlichen Erkenntnissen geleiteten Gewichtung der Indikatoren entsprechen. Hier wird vor allem berücksichtigt, welche der bewerteten Faktoren (Indikatoren) aus heutiger Sicht für eine nachhaltige Entwicklung unserer Energieversorgung eine mehr oder weniger grosse Rolle spielen. In Tabelle 6.1 ist die Verteilung der Gewichte auf die verschiedenen Indikatoren dargestellt.<sup>22</sup>

Eine nachhaltige Entwicklung setzt die Gleichberechtigung der drei „Hauptpfeiler“ Ökologie (Umwelt), Gesellschaft (Soziale Aspekte) und Wirtschaft voraus. Vor diesem Hintergrund erhalten diese drei Bereiche auf oberster Ebene das gleiche Gewicht.

Aus heutiger Sicht stellt der von den anthropogenen Treibhausgasemissionen verursachte Klimawandel das primäre Umweltproblem dar und wird daher am höchsten gewichtet, ohne aber die anderen Aspekte zu vernachlässigen. Im Bereich Ressourcen erscheint die Limitierung der fossilen Energieträger als das dringlichste Problem. Neben ihrem Einsatz als Energieträger werden sie – insbesondere Erdöl – als Ausgangsstoff für viele alltägliche Produkte eingesetzt. Im Gegensatz dazu kann Uran nur zur Energieversorgung verwendet werden.<sup>23</sup> Ausserdem sind ökonomisch nutzbare Uranvorkommen weltweit in deutlich grösserem Umfang vorhanden als fossile Energieressourcen (OECD 2008, BP 2008). Bei metallischen Erzen stellt sich eher das Problem einer hochgradigen und ökonomischen Rückgewinnung aus den Abfallströmen bzw. einer Substitution im jeweiligen Anwendungszweck im Verknappungsfall als der Begrenztheit der Vorkommen an sich. Im Bereich „Abfälle“ sind aus gesellschaftlicher Sicht die radioaktiven Abfälle problematischer als die nicht radioaktiven. Die hier vorgenommene Gewichtung soll jedoch nichts über das tatsächliche von den Afalltypen ausgehende Gefährdungspotenzial für die Umwelt aussagen (siehe Kap. 0).

Unter den sozialen Aspekten werden die negativen Einflüsse auf die menschliche Gesundheit am höchsten gewichtet, da diese grosse Teile der Bevölkerung betreffen und sowohl die Lebenserwartung als auch die Lebensqualität erheblich einschränken können. Dabei werden die von Luftschadstoffen

---

<sup>22</sup> Die Summe der Gewichte muss auf Ebene der einzelnen Haupt- und Unterkategorien nicht grundsätzlich 100 bzw. 1 betragen. Dies ist der Übersichtlichkeit jedoch sicherlich zuträglich, deswegen wird bei den hier diskutierten Gewichtungen stets so vorgegangen, dass die Summe der Gewichte der Indikatoren auf jeder Ebene 100 beträgt.

<sup>23</sup> Neben Kernbrennstoffen kann Uran auch noch zur Herstellung von Kernwaffen eingesetzt werden, was aber kaum als „nützlicher“ Zweck angesehen werden kann.

tagtäglich im Normalbetrieb der technischen Systeme verursachten Schäden höher gewichtet als die bei relativ seltenen schweren Unfällen auftretenden Todesopfer. Der maximal möglichen Anzahl an Todesopfern bei einem hypothetischen Unfall (Risikoaversion) wird höheres Gewicht beigemessen als der relativen Einschlusszeit für kritische Abfälle, da der Indikator Risikoaversion einen Schluss auf das tatsächlich vorhandene, höchstmögliche Gefährdungspotenzial (wenn auch bei sehr geringer Wahrscheinlichkeit) zulässt, von den Abfällen im Gegensatz dazu selbst im Fall des Versagens der technischen Barrieren eine vergleichsweise geringe Gefahr für Mensch und Umwelt ausgeht.

Im Bereich Wirtschaft wird das grösste Gewicht der Wirkung auf die Kunden, repräsentiert durch die Energiekosten, zugemessen. Versorgungssicherheit und Flexibilität der Energieversorgung wird höher bewertet als die Leistungen der Energiebranche in Form von Schaffung von Arbeitsplätzen.

Die MCDA-Resultate (das „Ranking“ der verschiedenen Optionen) in Form des Nachhaltigkeitsindex für die Standardgewichtung sind in Abbildung 6.1 bis Abbildung 6.12 dargestellt.

Tabelle 6.1 Gewichtungsfaktoren im „Standard-Profil“ dieser Studie.

		Ebene1	Ebene2	Ebene3
	<b>Indikator</b>			
<b>1</b>	<b>Umwelt</b>	<b>33.33</b>		
1.1	Ressourcen		20	
1.1.1	Fossile Primärenergie			60
1.1.2	Uran			10
1.1.3	Erze			30
1.2	Klimawandel		40	
1.2.1	Treibhausgasemissionen			100
1.3	Ökosystem		20	
1.3.1	Schäden an Flora und Fauna			100
1.4	Abfälle		20	
1.4.1	Nicht radioaktive Abfälle			30
1.4.2	Radioaktive Abfälle			70
<b>2</b>	<b>Soziale Aspekte</b>	<b>33.33</b>		
2.1	Menschliche Gesundheit		60	
2.1.1	Normalbetrieb			80
2.1.2	Schwere Unfälle			20
2.2	Risiken		20	
2.2.1	Risikoaversion (bei Unfällen)			70
2.2.2	Einschlusszeit für "kritische" Abfälle			30
2.3	Landschafts- & Siedlungsqualität		20	
2.3.1	Visuelle Beeinträchtigung der Landschaftsqualität			50
2.3.2	Verkehrsaufkommen (Gütertransport)			50
<b>3</b>	<b>Wirtschaft</b>	<b>33.33</b>		
3.1	Leistungen der Branche		15	
3.1.1	Beschäftigung			100
3.2	Wirkung auf die Kunden		50	
3.2.1	Energiekosten			100
3.3	Versorgungssicherheit & Flexibilität		35	
3.3.1	Beitrag zur Autonomie der Energieversorgung			25
3.3.2	Brennstoffpreisvolatilität			25
3.3.3	Flexibilität aufgrund d. Grenzkosten (Verbraucherperspektive)			25
3.3.4	Flexibilität d. Produktion: Nutzen für das Gesamtenergiesystem			25

### 6.2.1.1 Bereich "Einfamilienhaus"

Hier wird das 2 kW<sub>el</sub> BHKW mit den Optionen „Strom aus Grosskraftwerken + Wärmepumpe“ im „Standard“-Gewichtungsprofil verglichen. Abbildung 6.1 zeigt das Ergebnis für den Nachhaltigkeitsindex. Deutlich am besten schneiden die zentralen Optionen „Wasserkraft + Wärmepumpe“, gefolgt von „Kernenergie + Wärmepumpe“ ab, am schlechtesten das 2 kW<sub>el</sub> BHKW, hauptsächlich wegen der mit Abstand höheren Kosten, die auch relativ stark gewichtet werden. Die Ergebnisse von „Wasserkraft + WP“ in den Bereichen Umwelt und soziale Aspekte sind die mit Abstand besten, da Wasserkraft nur bei den gering gewichteten Indikatoren „Erze“ sowie „nicht radioaktive Abfälle“ schlecht abschneidet. Die Kombination „Kernenergie + WP“ bekommt im Bereich Wirtschaft aufgrund der vergleichsweise geringen Energiekosten die meisten Punkte.

Die Sensitivitätsanalyse bzgl. BHKW-Emissionen (Vergleich Magermotor vs.  $\lambda=1$ -Motor, siehe Kap. 3.1.1.5) zeigt, dass das BHKW mit den höheren Emissionen des Magermotors noch schlechter abschneidet. Hauptsächlich dafür verantwortlich ist die höhere Zahl an verlorenen Lebensjahren (Kap. 5.2.1.1) durch die höheren Magermotoremissionen.

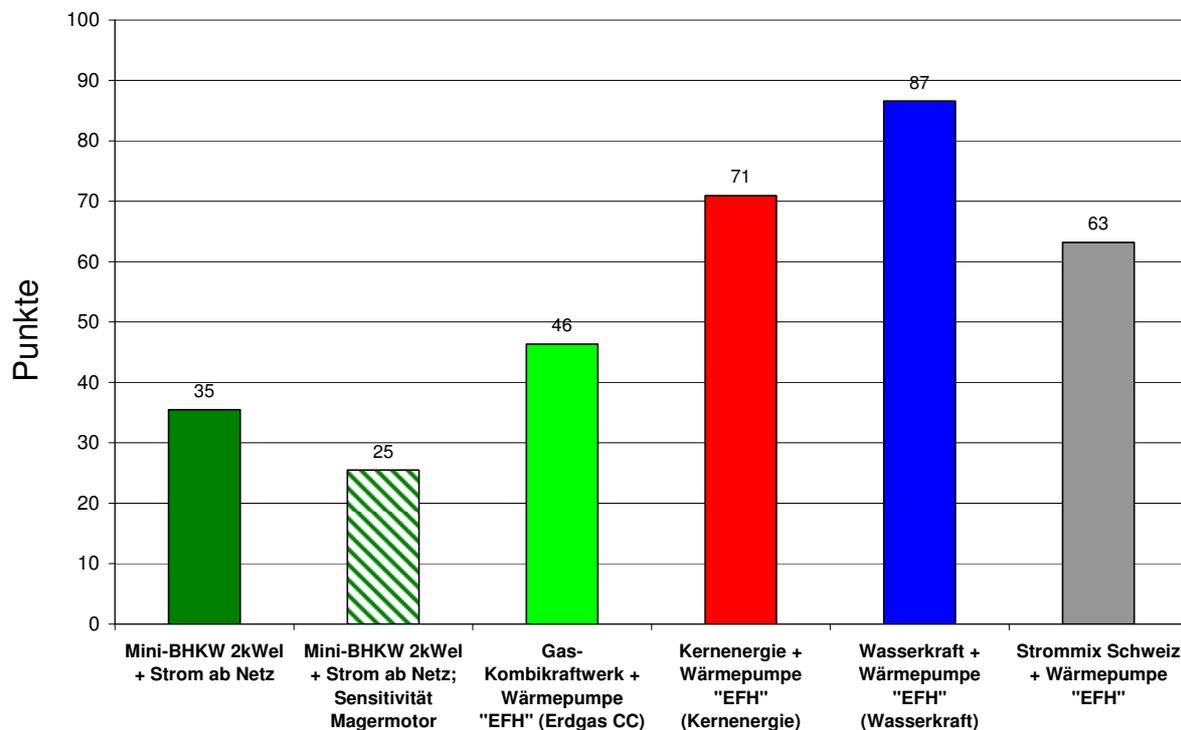


Abbildung 6.1 MCDA-Resultat mit Standardgewichtung der Nachhaltigkeitsindikatoren für die Anlagen(kombinationen) im Bereich "Einfamilienhaus".

### 6.2.1.2 Bereich "Mehrfamilienhaus"

Hier wird das 50 kW<sub>el</sub> BHKW mit den Optionen „Strom aus Grosskraftwerken + Wärmepumpe“ im „Standard“-Gewichtungsprofil verglichen. Abbildung 6.2 zeigt das Ergebnis für den Nachhaltigkeitsindex. Die Kombinationen „Wasserkraft + Wärmepumpe“, gefolgt von „Kernenergie + Wärmepumpe“, erreichen die besten Ergebnisse. Am unteren Ende der Skala ist das Magermotor-BHKW zu finden. Im Vergleich zum Einfamilienhaus profitiert das BHKW vor allem von deutlich geringeren Anlagenkosten (50 kW<sub>el</sub> im Vergleich zu 2 kW<sub>el</sub>).

Die Sensitivitätsanalyse bzgl. BHKW-Emissionen (Vergleich Magermotor vs.  $\lambda=1$ -Motor, siehe Kap. 3.1.1.5) zeigt, dass das BHKW mit den niedrigeren Emissionen des  $\lambda=1$ -Motors deutlich besser abschneidet.

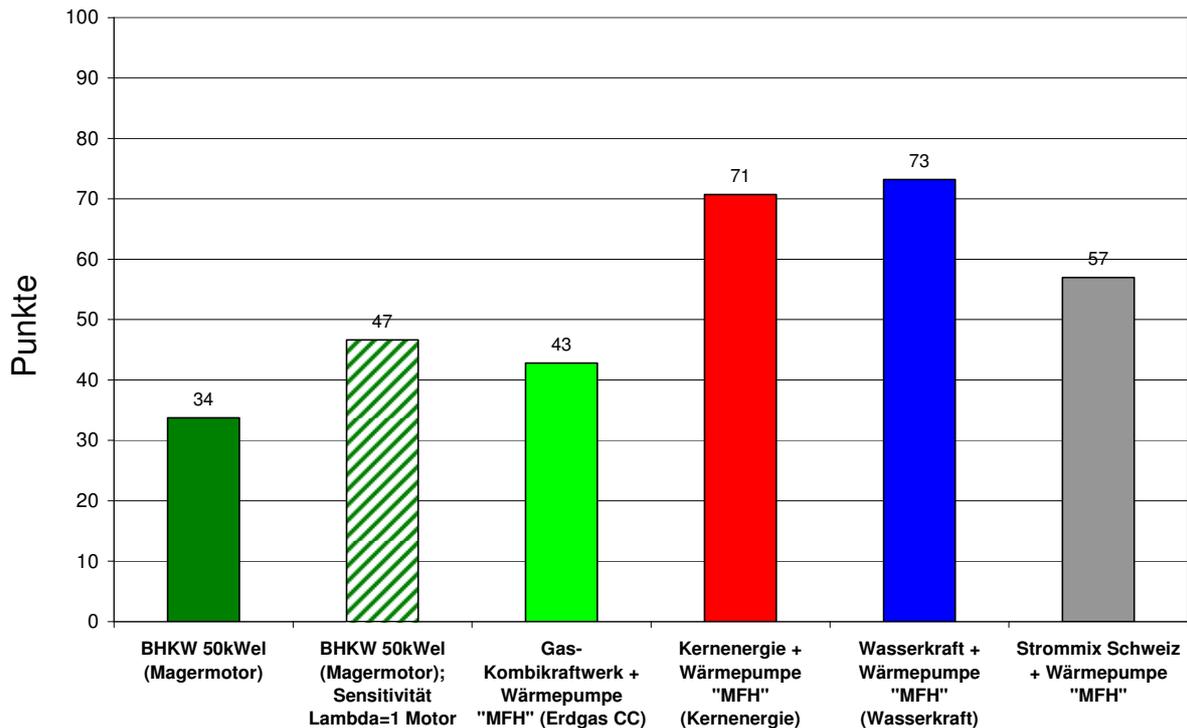


Abbildung 6.2 MCDA-Resultat mit Standardgewichtung der Nachhaltigkeitsindikatoren für die Anlagenkombinationen im Bereich "Mehrfamilienhaus".

### 6.2.1.3 Bereich "Gewerbe"

Hier werden das 160 kW<sub>el</sub> BHKW und das 1 MW<sub>el</sub> BHKW mit den Optionen „Strom aus Grosskraftwerken + Wärmepumpe“ im „Standard“-Gewichtungsprofil verglichen. Abbildung 6.3 zeigt das Ergebnis für den Nachhaltigkeitsindex.

Auch hier erreicht die Kombination „Wasserkraft + Wärmepumpe“ den höchsten Nachhaltigkeitsindex, gefolgt von „Kernenergie + Wärmepumpe“. Mit Ausnahme der Variante „1 MW<sub>el</sub> BHKW + Pelletsheizung“, das insgesamt am schlechtesten abschneidet, liegt der Index bei allen BHKW in einem knappen Bereich, etwa in der Mitte der Skala. Die gegenüber des 1 MW<sub>el</sub> BHKW höheren Kosten werden von der 160 kW<sub>el</sub>-Anlage durch geringere Luftschadstoffemissionen und daraus resultierend weniger Gesundheitsschäden (siehe Indikator „Menschliche Gesundheit, Normalbetrieb“, Kap. 5.2.1.1) kompensiert. Die Option „Erdgas-GuD + WP“ schneidet geringfügig schlechter ab als die meisten BHKW-Varianten, hauptsächlich wegen der vergleichsweise höheren Systemkosten.

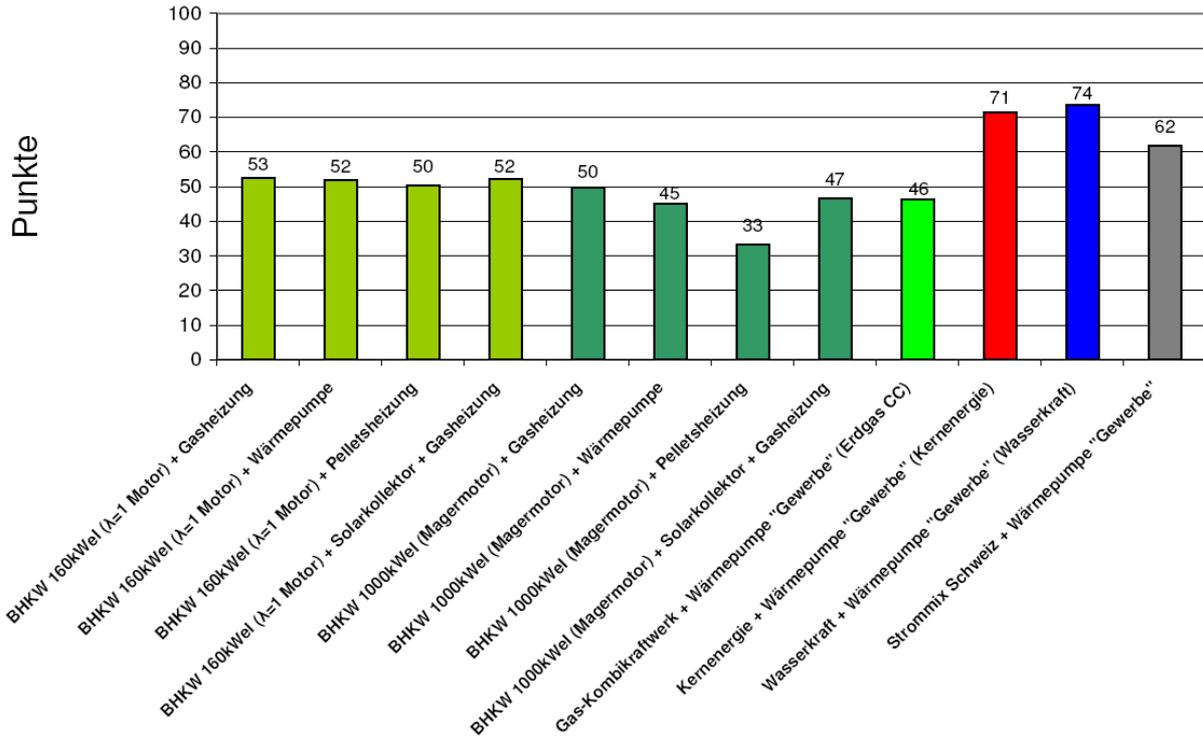


Abbildung 6.3 MCDA-Resultat mit Standardgewichtung der Nachhaltigkeitsindikatoren für die Anlagen(kombinationen) im Bereich "Gewerbe/Industrie".

## 6.2.2 Sensitivität auf oberster Gewichtungsebene

Gewichtungsprofile mit Schwerpunkt auf Umwelt, sozialen Aspekten oder Wirtschaft werden durch eine Gewichtung auf der obersten Nachhaltigkeitsebene der drei Bereiche von 80:10:10 (Umwelt:soziale Aspekte:Wirtschaft) (Abbildung 6.4 bis Abbildung 6.6), 10:80:10 (Abbildung 6.7 bis Abbildung 6.9) und 10:10:80 (Abbildung 6.10 bis Abbildung 6.12) repräsentiert. Die Gewichtung auf den unteren Ebenen bleibt wie im Standardprofil (Tabelle 6.1).

### 6.2.2.1 Schwerpunkt „Umwelt“

Abbildung 6.4 bis Abbildung 6.6 zeigen die MCDA-Resultate mit dem Fokus der Gewichtung im Bereich „Umwelt“.

Der Schwerpunkt „Umwelt“ in der Gewichtung bringt für „Wasserkraft + WP“ und „Kernenergie + WP“ noch etwas bessere Ergebnisse als das Standard-Gewichtungsprofil, während die Kombination „Erdgas-GuD-Kraftwerk+WP“ etwas schlechter abschneidet. Im Bereich EFH bringt diese Gewichtung markante Verbesserungen für das 2 kW<sub>el</sub> BHKW, da die beinahe prohibitiv hohen Kosten viel weniger Einfluss auf das Ergebnis haben.

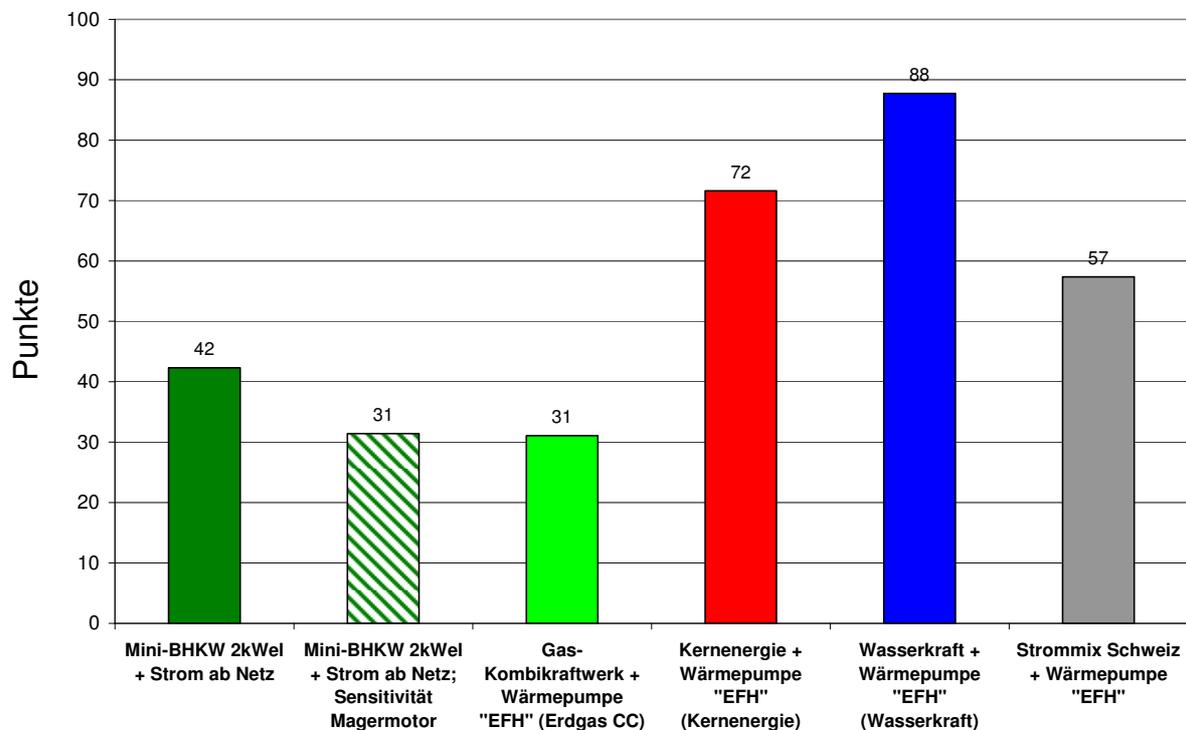


Abbildung 6.4 MCDA-Resultat für den Bereich „Einfamilienhaus“, Gewichtung mit Fokus „Umwelt“.

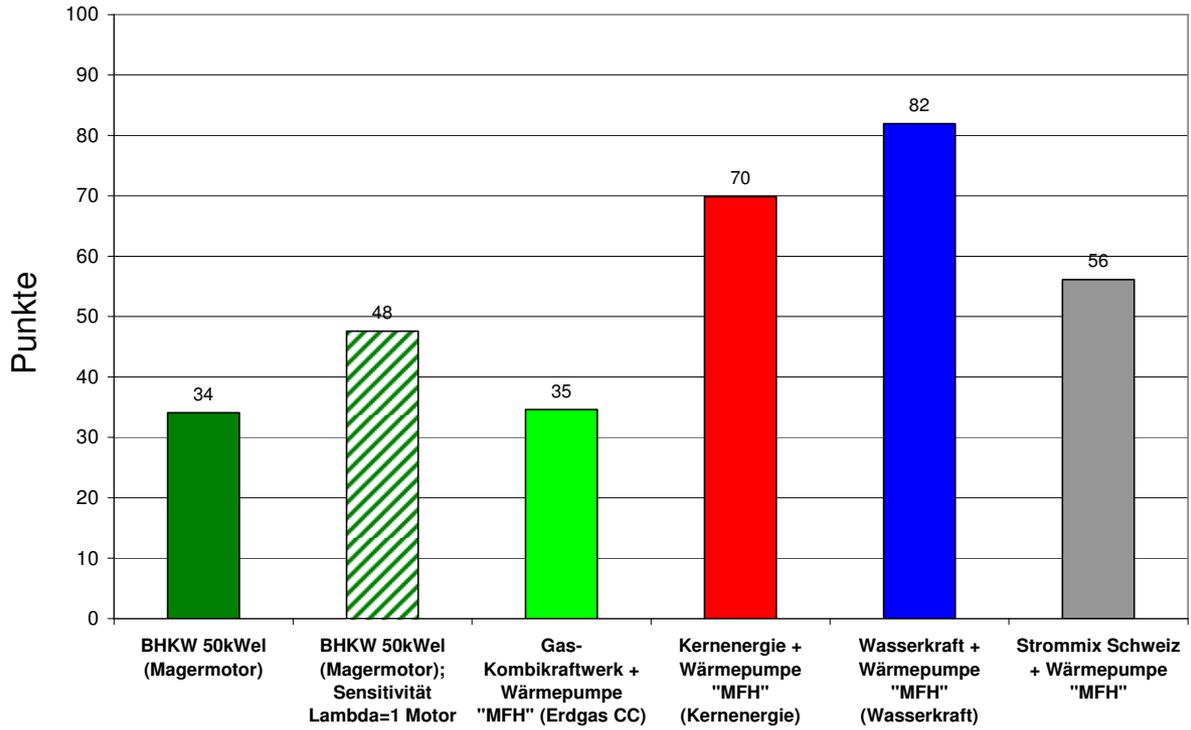


Abbildung 6.5 MCDA-Resultat für den Bereich „Mehrfamilienhaus“, Gewichtung mit Fokus „Umwelt“.

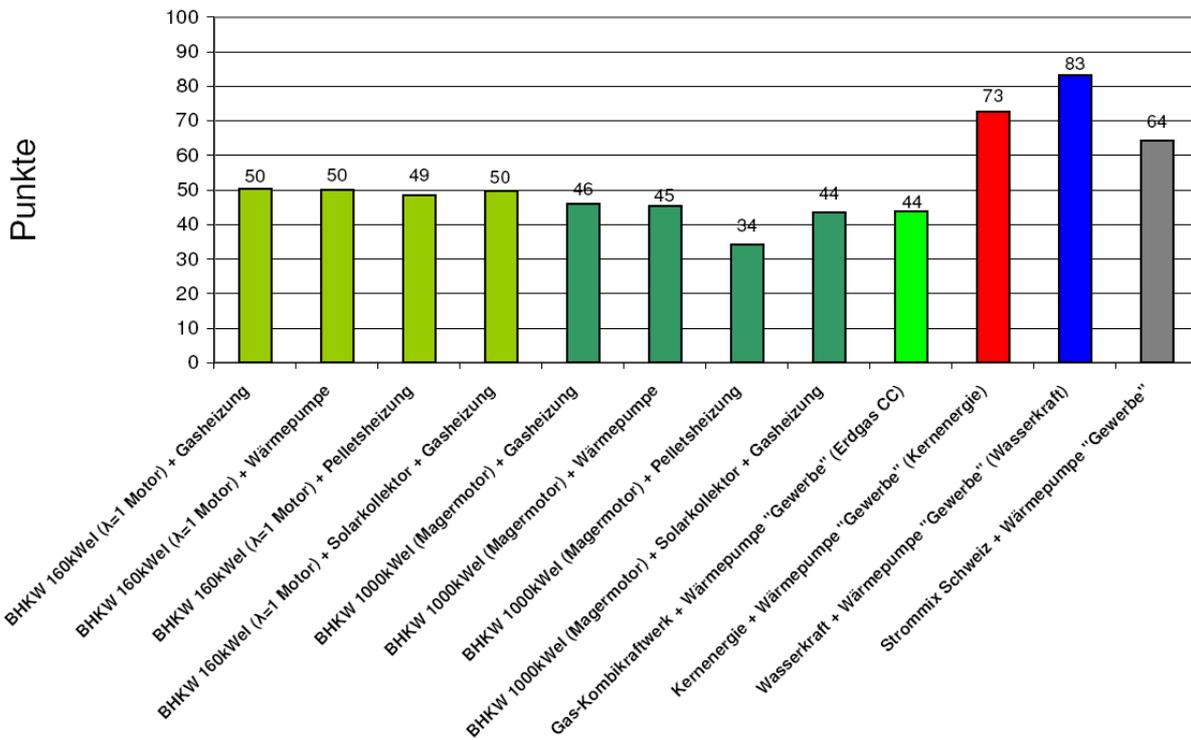


Abbildung 6.6 MCDA-Resultat für den Bereich „Gewerbe/Industrie“, Gewichtung mit Fokus „Umwelt“.

### 6.2.2.2 Schwerpunkt „Soziale Aspekte“

Abbildung 6.7 bis Abbildung 6.9 zeigen die MCDA-Resultate mit dem Fokus der Gewichtung im Bereich „Soziale Aspekte“.

Der Schwerpunkt „Soziale Aspekte“ in der Gewichtung bringt für „Wasserkraft + WP“ bessere Ergebnisse als das Standard-Gewichtungsprofil, „Kernenergie + WP“ schneidet hingegen meist etwas schlechter ab, da die wahrgenommenen Risiken stärker in das Ergebnis einfließen. Eine markante Verbesserung ergibt sich für die Option „Erdgas-GuD + WP“, vor allem gegenüber den BHKW (50 kW<sub>el</sub> – MFH und 1 MW<sub>el</sub> – Gewerbe/Industrie), die vergleichsweise hohe Luftschadstoffemissionen (und damit Gesundheitsschäden, siehe Indikator „Menschliche Gesundheit, Normalbetrieb“, Kap. 5.2.1.1) aufweisen. Der markante Einfluss der BHKW-Emissionen ist auch in den Sensitivitätsanalysen für EFH und MFH zu erkennen.

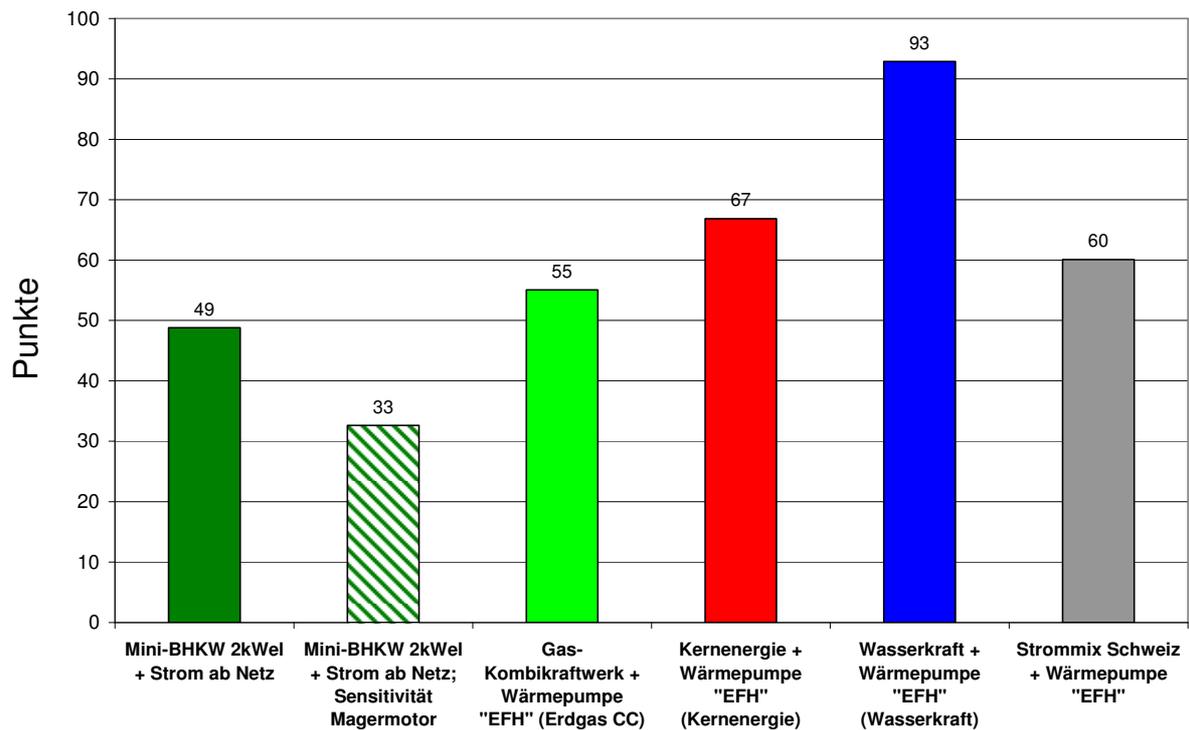


Abbildung 6.7 MCDA-Resultat für den Bereich „Einfamilienhaus“, Gewichtung mit Fokus „Soziale Aspekte“.

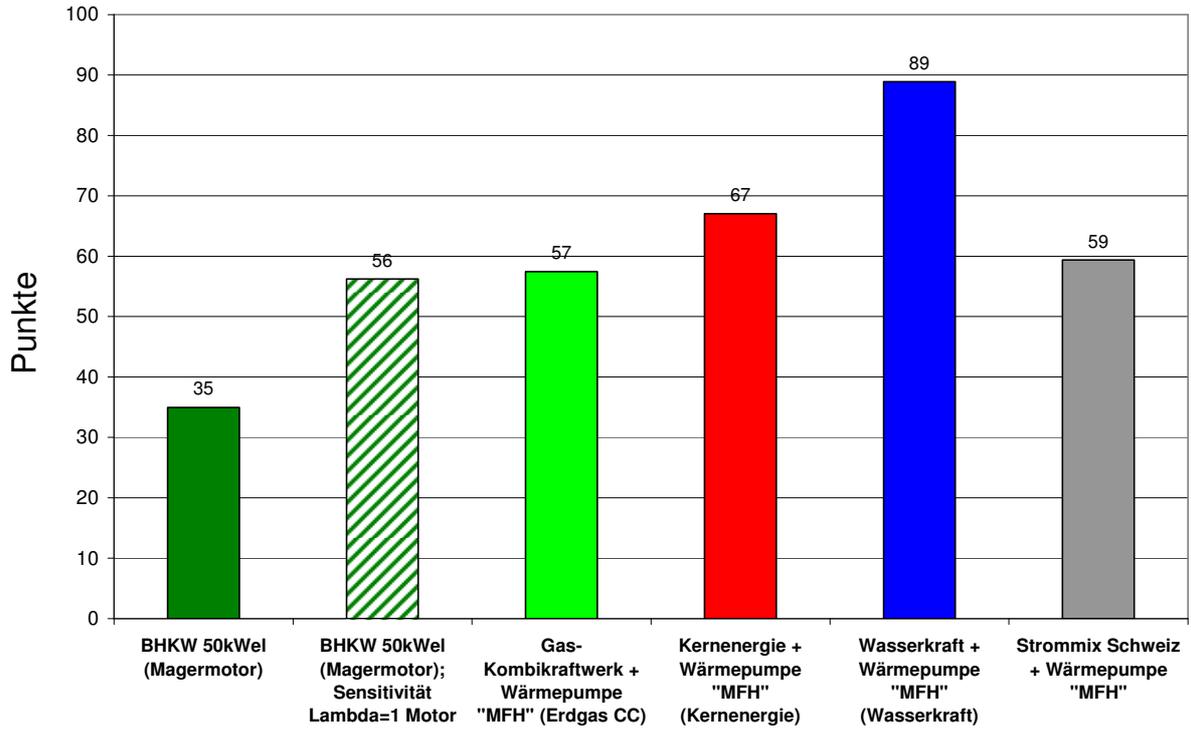


Abbildung 6.8 MCDA-Resultat für den Bereich „Mehrfamilienhaus“, Gewichtung mit Fokus „Soziale Aspekte“.

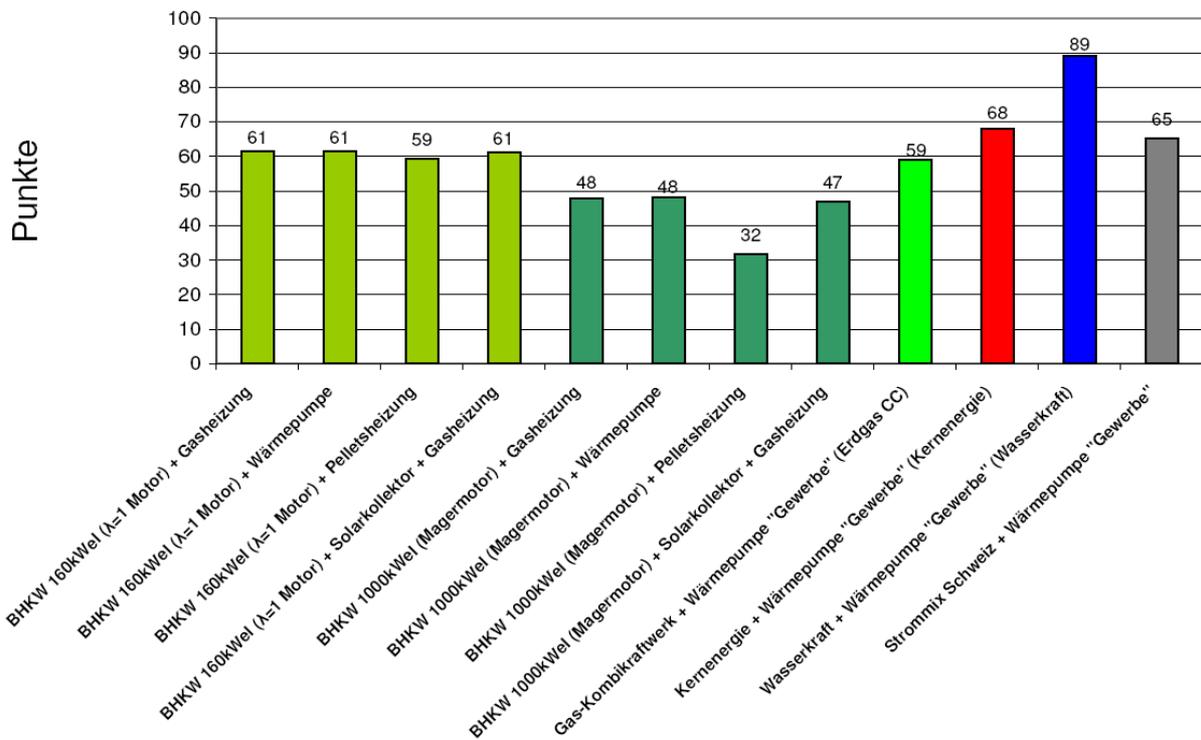


Abbildung 6.9 MCDA-Resultat für den Bereich „Gewerbe/Industrie“, Gewichtung mit Fokus „Soziale Aspekte“.

### 6.2.2.3 Schwerpunkt „Wirtschaft“

Abbildung 6.10 bis Abbildung 6.12 zeigen die MCDA-Resultate mit dem Fokus der Gewichtung im Bereich „Wirtschaft“.

Der Schwerpunkt auf dem Bereich „Wirtschaft“ bringt gegenüber der Standardgewichtung mit Ausnahme des EFH-BHKW 2kW<sub>el</sub> Vorteile für die BHKW gegenüber den Optionen „Wasserkraftwerk + WP“ und „GuD-Kraftwerk + WP“. „Kernenergie + WP“ gewinnt an Konkurrenzfähigkeit. Im Bereich EFH bleibt „Wasserkraft + WP“ das beste System, auch wenn der Vorsprung schrumpft. In den Bereichen MFH sowie Gewerbe/Industrie erreicht die unter den zentralen Optionen kostengünstigste Option „Kernenergie + WP“ das beste Ergebnis. Am deutlichsten verschlechtert sich das Ergebnis bei der vergleichsweise teuren Option „Wasserkraft + WP“, die nur mehr im Mittelfeld der Systeme zu finden ist. Die Sensitivitätsanalysen bzgl. BHKW-Emissionen verlieren an Differenzierung, da das Gewicht der Gesundheitsschäden sinkt.

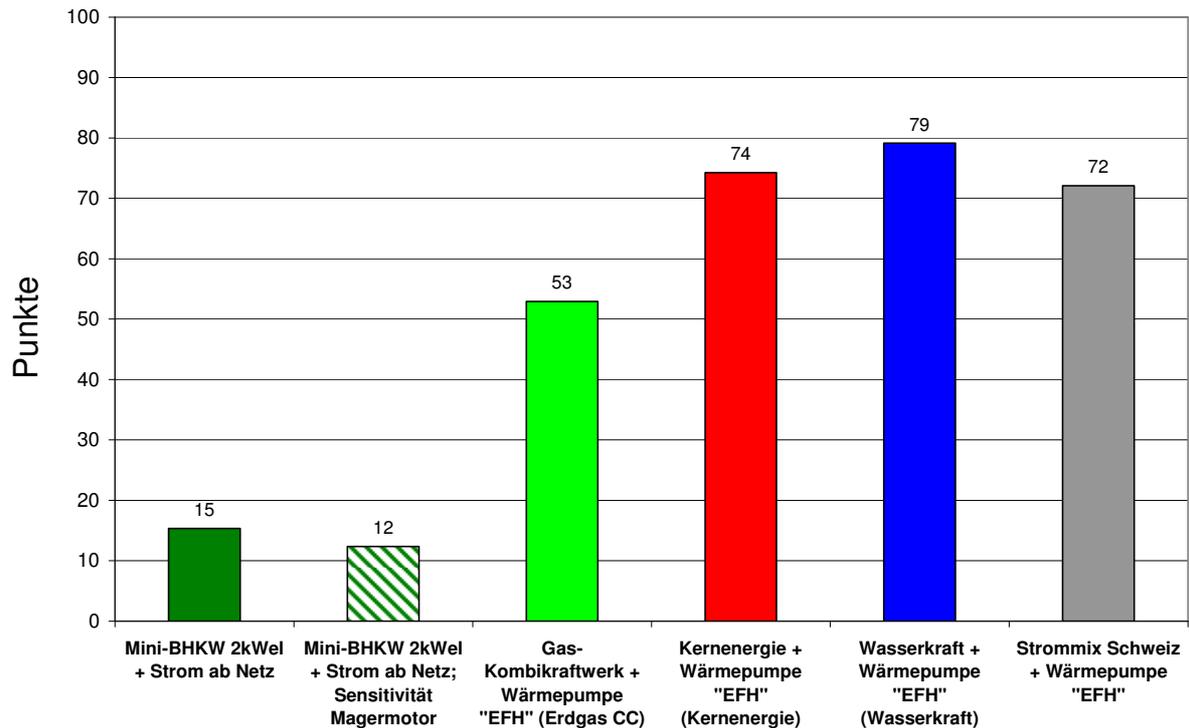


Abbildung 6.10 MCDA-Resultat für den Bereich „Einfamilienhaus“, Gewichtung mit Fokus „Wirtschaft“.

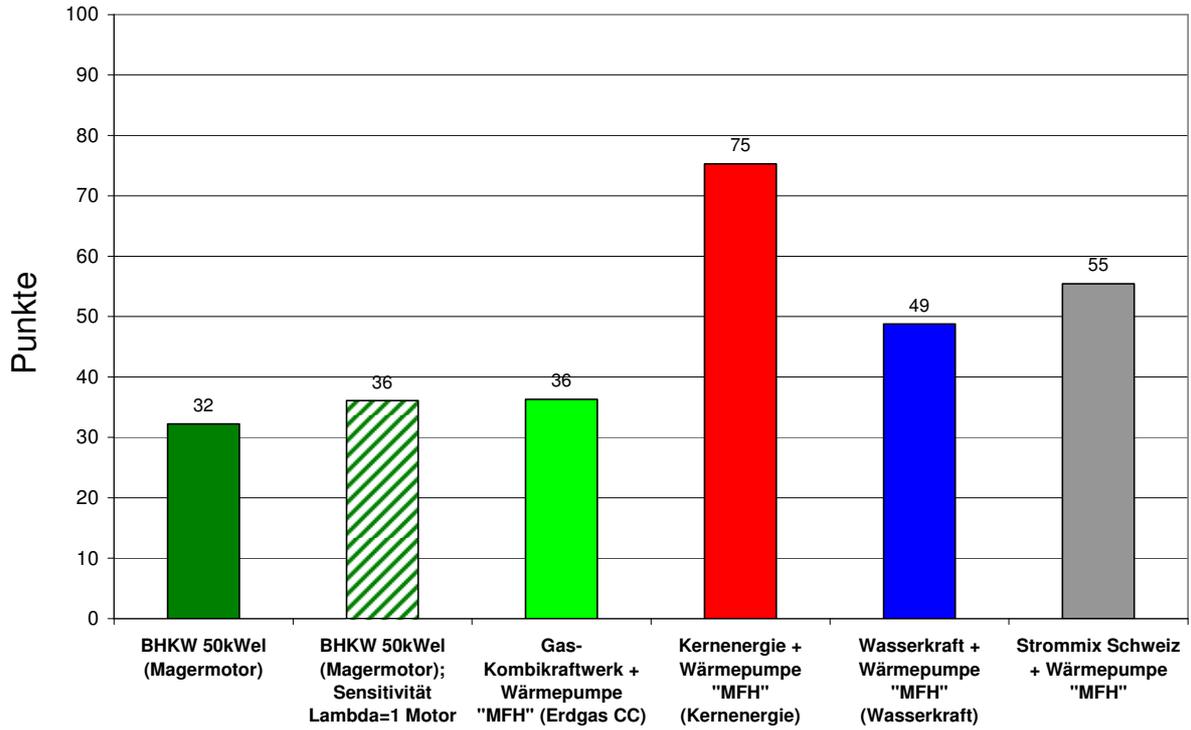


Abbildung 6.11 MCDA-Resultat für den Bereich „Mehrfamilienhaus“, Gewichtung mit Fokus „Wirtschaft“.

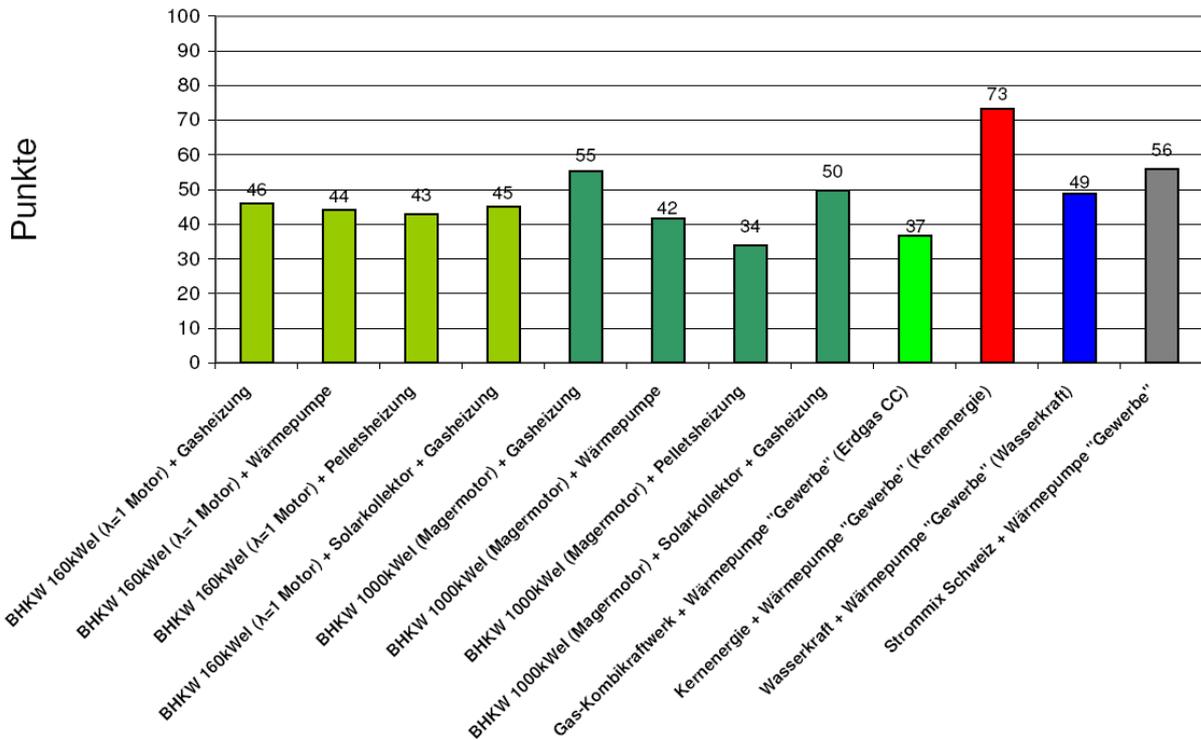


Abbildung 6.12 MCDA-Resultat für den Bereich „Gewerbe/Industrie“, Gewichtung mit Fokus „Wirtschaft“.

### 6.2.3 Fokus auf objektiven, direkten Schadenswirkung auf den Menschen

Unter „objektiven, direkten Schadenswirkung“ auf den Menschen sollen hier Faktoren verstanden werden, die objektiv gesicherten und relativ unmittelbaren Einfluss auf die Lebensqualität des Menschen haben. Die entsprechend hier verwendeten Gewichtungsfaktoren sind in Tabelle 6.2 dargestellt.

Tabelle 6.2 Gewichtungsprofil mit Schwerpunkt auf objektiven, direkten „Schadenswirkung“ auf den Menschen.

		Ebene1	Ebene2	Ebene3
	<b>Indikator</b>			
<b>1</b>	<b>Umwelt</b>	<b>33.33</b>		
1.1	Ressourcen		10	
1.1.1	Fossile Primärenergie			60
1.1.2	Uran			10
1.1.3	Erze			30
1.2	Klimawandel		80	
1.2.1	Treibhausgasemissionen			100
1.3	Ökosystem		10	
1.3.1	Schäden an Flora und Fauna			100
1.4	Abfälle		0	
1.4.1	Nicht radioaktive Abfälle			0
1.4.2	Radioaktive Abfälle			0
<b>2</b>	<b>Soziale Aspekte</b>	<b>33.33</b>		
2.1	Menschliche Gesundheit		90	
2.1.1	Normalbetrieb			90
2.1.2	Schwere Unfälle			10
2.2	Risiken		0	
2.2.1	Risikoaversion (bei Unfällen)			0
2.2.2	Einschlusszeit für "kritische" Abfälle			0
2.3	Landschafts- & Siedlungsqualität		10	
2.3.1	Visuelle Beeinträchtigung der Landschaftsqualität			0
2.3.2	Verkehrsaufkommen (Gütertransport)			100
<b>3</b>	<b>Wirtschaft</b>	<b>33.33</b>		
3.1	Leistungen der Branche		20	
3.1.1	Beschäftigung			100
3.2	Wirkung auf die Kunden		70	
3.2.1	Energieproduktionskosten			100
3.3	Versorgungssicherheit & Flexibilität		10	
3.3.1	Beitrag zur Autonomie der Energieversorgung			25
3.3.2	Brennstoffpreisvolatilität			25
3.3.3	Flexibilität aufgrund d. Grenzkosten (Verbraucherperspektive)			25
3.3.4	Flexibilität d. Produktion: Nutzen für das Gesamtenergiesystem			25

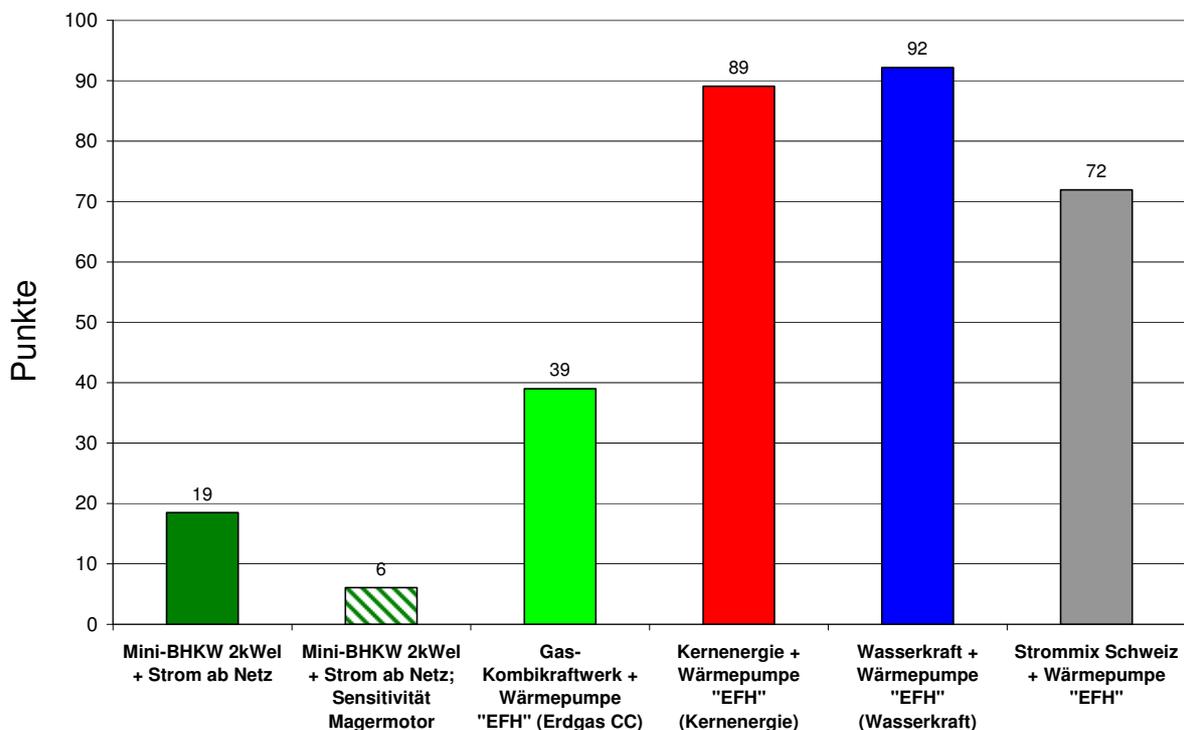
Im Bereich Umwelt bekommt unter diesem Blickwinkel der Klimawandel das dominierende Gewicht: Es gilt heute als gesichert, dass die globale Erwärmung vornehmlich vom Menschen durch die Emission von Treibhausgasen verursacht wird und dass global steigende Temperaturen einen erheblichen Einfluss auf die Gesellschaft weltweit haben werden (IPCC 2007a, b, c). Auch wenn die Auswirkungen erst in Jahrzehnten deutlich sichtbar werden – die aktuellen Treibhausgasemissionen sind für die zukünftigen Folgen mit ausschlaggebend. Als deutlich weniger wichtig werden Ressourcen und Ökosysteme angesehen. Aus dieser „egoistisch menschlichen“ Sicht haben Schäden am Ökosystem allenfalls indirekte Wirkung auf den Menschen und dies nicht unmittelbar. Die Verknappung der Ressourcen wirkt sich indirekt über steigende Preise aus, dabei bleibt aber die Möglichkeit nach Alternativen zu suchen. Die Abfallindikatoren reflektieren keine tatsächlich auftretenden Schäden – ihnen wird deshalb kein Gewicht beigemessen.

Unter den sozialen Aspekten erhalten die Gesundheitsschäden als Folge von Schadstoffemissionen das höchste Gewicht, da sie den Menschen tagtäglich betreffen. Dazu wird das Verkehrsaufkommen in geringerem Ausmass berücksichtigt: Auswirkungen wie etwa Lärm betreffen eine Vielzahl von Menschen und führen in unterschiedlichem Mass zu Gesundheitsschäden. Die Risikoindikatoren reflektieren keine tatsächlich auftretenden Schäden – ihnen wird mit diesem Fokus kein Gewicht beigemessen.

Im Bereich Wirtschaft werden die Energieproduktionskosten am höchsten gewichtet, da davon alle Menschen unmittelbar betroffen sind. Die anderen Indikatoren besitzen eher längerfristige bzw. weniger direkte Auswirkungen, die Gewichte sind entsprechend geringer.

Abbildung 6.13 bis Abbildung 6.15 zeigen die MCDA-Resultate für das Gewichtungsprofil mit Schwerpunkt auf objektiven, direkten „Schadenswirkung“ auf den Menschen.

Mit diesem Gewichtungsprofil liegt im Bereich EFH die Option „Wasserkraft + WP“, in den Bereichen MFH und Gewerbe/Industrie „Kernenergie + WP“ an der Spitze der Vergleiche. Wasserkraft schneidet zwar in den Bereichen „Umwelt“ und „Soziale Aspekte“ etwas besser ab, Kernenergie im Bereich „Wirtschaft“ jedoch deutlich besser. Bei EFH liegen die BHKW mit Abstand am unteren Ende des Vergleichs. Bei MFH sowie Gewerbe/Industrie sind die Ergebnisse der „sauberen“ BHKW und der Kombination „GuD-Kraftwerk“ ähnlich.



**Abbildung 6.13** MCDA-Resultat für den Bereich „Einfamilienhaus“ bei Gewichtungsprofil mit Schwerpunkt auf objektiven, direkten „Schadenswirkung“ auf den Menschen.

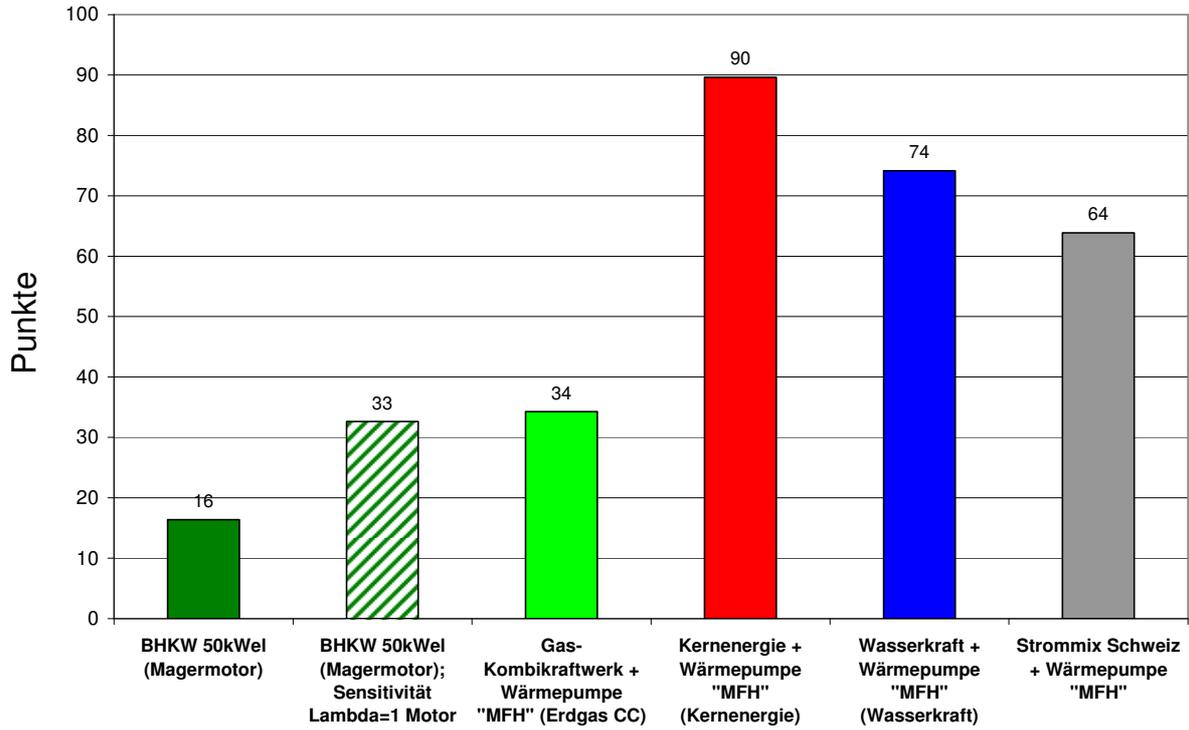


Abbildung 6.14 MCDA-Resultat für den Bereich „Mehrfamilienhaus“ bei Gewichtungprofil mit Schwerpunkt auf objektiven, direkten „Schadenswirkung“ auf den Menschen.

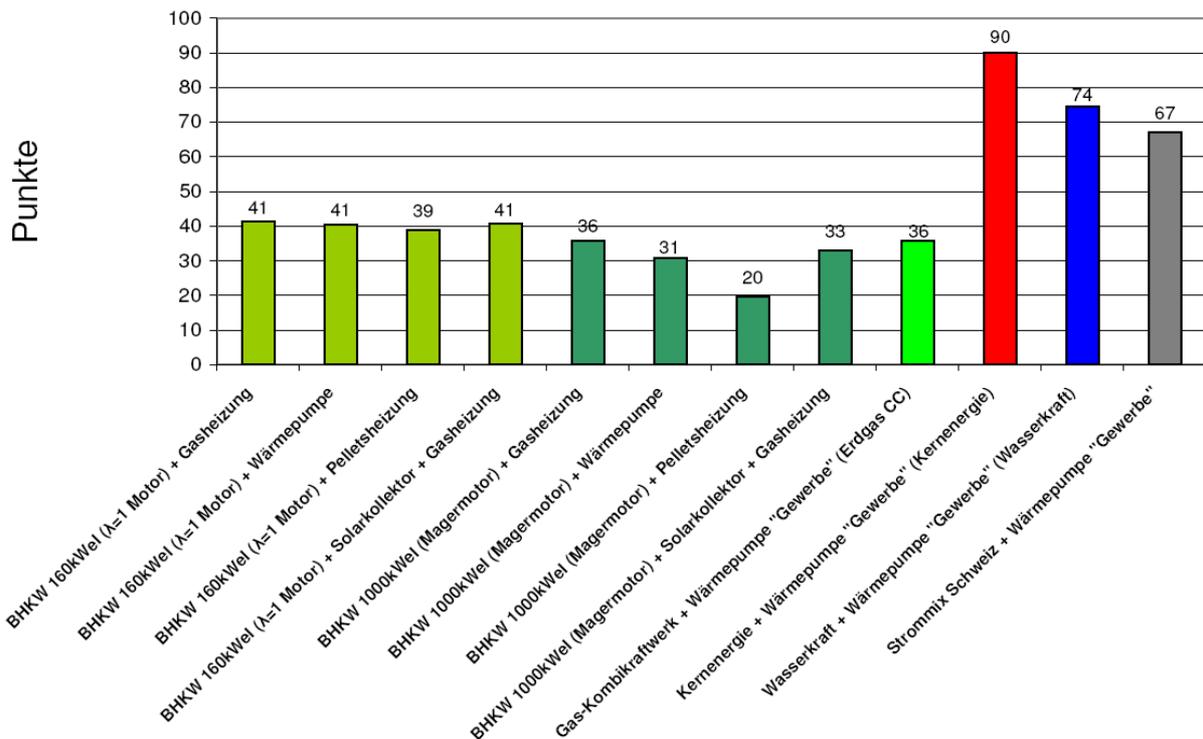


Abbildung 6.15 MCDA-Resultat für den Bereich „Gewerbe/Industrie“ bei Gewichtungprofil mit Schwerpunkt auf objektiven, direkten „Schadenswirkung“ auf den Menschen.

## 7 Schlussfolgerungen, Empfehlungen und Ausblick

Die vorliegende Studie erlaubt trotz der verschiedenen Einschränkungen vor allem hinsichtlich Technologieauswahl und des betrachteten Zeitrahmens einige klare Schlussfolgerungen:

- Bei den hier vorgegebenen Rahmenbedingungen bietet vor allem aus ökologischer und gesellschaftlicher Sicht eine Energieversorgung mit einer Kopplung von Strom aus Wasserkraftwerken und Nutzwärme aus Wärmepumpen die optimale Lösung. Dabei müssen heute wegen vergleichsweise höheren Stromproduktionskosten geringfügige wirtschaftliche Nachteile in Kauf genommen werden.
- Strom aus Kernkraftwerken ist bekanntermassen wie Wasserkraft weitgehend frei an CO<sub>2</sub> und Luftschadstoffemissionen, was zusammen mit Wärme aus Wärmepumpen eine Energieversorgung mit sehr geringem Schaden an der menschlichen Gesundheit und Ökosystemen verspricht. Zudem ist Kernenergie auch aus ökonomischer Sicht vorteilhaft, die Stromproduktionskosten sind vergleichsweise gering. Die Vorbehalte gegen Kernenergie vor allem hinsichtlich potenzieller Unfallfolgen und radioaktiver Abfälle bleiben auch im Rahmen dieser Studie bestehen.
- Falls Erdgas als Energieträger genutzt werden soll und damit im Vergleich zu Wasserkraft und Kernenergie merklich höhere Treibhausgasemissionen in Kauf genommen werden, so ist aus Sicht der Verbraucher der wichtigste Unterschied zwischen dezentralen BHKW und der Kombination Erdgaskraftwerk plus Wärmepumpe die heutige Kostenstruktur der Stromversorgung mit ihrer Bevorzugung der dezentralen Stromproduktion. Die Eigenerzeugung mit WKK-Anlagen profitiert von einer Quersubvention, da Systemdienstleistungen für die Stromnetze zwar benötigt, aber nicht bezahlt werden. Diese Bevorzugung, die heute dazu führt, dass die Energiekosten bei BHKW ab einer Grösse im Bereich Mehrfamilienhaus ähnlich hoch oder gar geringer sind als bei vergleichbaren Kombinationen zentraler Grosskraftwerke plus Wärmepumpe, wird bei einer deutlichen Expansion der dezentralen Systeme kaum aufrecht erhalten werden können.
- Der Vergleich von dezentralen Erdgas-BHKW und der Kombination zentrales Gas-Kombikraftwerk plus Wärmepumpe bringt kein eindeutig „besseres“ System: Hinsichtlich CO<sub>2</sub>- und Luftschadstoffemissionen (deren Auswirkungen hier unter „Soziale Aspekte“ kategorisiert sind) schneidet die zentrale Variante meist besser ab, dezentrale Anlage sind hingegen wahrscheinlich gesellschaftlich besser akzeptiert.
- Unter den WKK-Anlagen existieren verschiedene Technologien, die sich hinsichtlich Luftschadstoffemissionen teilweise deutlich unterscheiden. Hier ist auf die Wahl möglichst schadstoffarmer Systeme zu achten, um die Schäden an der menschlichen Gesundheit und Ökosystemen gering zu halten.
- BHKW für Einfamilienhäuser sind gegenwärtig zu teuer, um im Vergleich zu den Optionen „zentrale Stromerzeugung plus Wärmepumpe“ vorteilhaft abzuschneiden, sofern kein sehr einseitiges Gewichtungprofil gewählt wird. Die Konkurrenzfähigkeit von BHKW steigt im Allgemeinen mit zunehmender Anlagengrösse.

Um zu aussagekräftigeren Schlüssen in Bezug auf eine mögliche zukünftige Rolle von dezentralen Systemen im Rahmen einer nachhaltigen Energieversorgung im Allgemeinen zu kommen, müsste der vorliegende Ansatz um einige wichtige Aspekte erweitert werden:

- Zukünftige Technologien müssen in der Betrachtung enthalten sein, um die zu erwartenden Fortschritte in der technologischen Entwicklung angemessen berücksichtigen zu können.
- Nicht nur mit Erdgas als Brennstoff betriebene dezentrale Anlagen, sondern auch erneuerbare Technologien wie Windkraft, Photovoltaik oder verschiedene Arten der Biomassennutzung sollten Eingang in die Bewertung finden.
- Werden zukünftige Anlagen untersucht, so muss für zentrale Erdgaskraftwerke die Abscheidung und geologische Speicherung von CO<sub>2</sub> als Option (Carbon Capture and Storage - CCS) berücksichtigt werden.

- Für eine breitere Anwendung des MCDA-Modells sollten weitere, für verschiedene Entscheidungsträger- und Bevölkerungsgruppen repräsentative Gewichtungsprofile ermittelt und in der Bewertung eingesetzt werden.
- Für eine umfassende Analyse zukünftiger, dezentraler Stromerzeugung sollte das gesamte Energiesystem in Form verschiedener Szenarien inkl. einer vertieften, quantitativen Analyse der Elektrizitätsnetzwerke modelliert werden.

---

**Literatur**

- Alpiq 2009 Dialogplattform zur Energiezukunft der Schweiz; Datenquelle Alpiq. Online: <http://www.immergenugstrom.ch/contents/strompreise>
- ASUE 2005 Arbeitsgemeinschaft für Umweltfreundlichen Energieverbrauch E.V., BHKW-Kenndaten 2005, <http://www.bhkw-infozentrum.de/service/download.html>, [http://www.bhkw-infozentrum.de/download/ASUE\\_BHKW-Kenndaten\\_2005.pdf](http://www.bhkw-infozentrum.de/download/ASUE_BHKW-Kenndaten_2005.pdf)
- Axpo 2009 Auskunft von Stefan Roth, Axpo Holding AG.
- Bauer 2007 Bauer, C. (2007) Holzenergie. In: Dones, R. (Ed.) et al., Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz. Final report ecoinvent No. 6-IX, Paul Scherrer Institut Villigen, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, Schweiz.
- Bauer et al. 2007 Bauer, C., Bolliger, R., Tuchschnid, M., Faist-Emmenegger, M. (2007) Wasserkraft. In: Dones, R. (Ed.) et al., Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz. Final report ecoinvent No. 6-VIII, Paul Scherrer Institut Villigen, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, Schweiz.
- BFE 2003 Eicher H., Ott W., Rigassi R. (2003) Technologie-Monitoring. Bundesamt für Energie, Bern, Schweiz.
- BFE 2008 Bundesamt für Energie (2008) Schweizerische Elektrizitätsstatistik 2007. BFE, Bern.
- BP 2008 Beyond Petroleum (2008) BP Statistical Review of World Energy June 2008. BP, London. Online: <http://www.bp.com/sectiongenericarticle.do?categoryId=9023799&contentId=7044111>
- Burgherr & Hirschberg 2008 Burgherr P. & Hirschberg S. (2008) A comparative analysis of accident risks in fossil, hydro and nuclear energy chains. Human and Ecological Risk Assessment, 14(5), 947 - 973.
- Burgherr et al. 2004 Burgherr P., Hirschberg S., Hunt A., Ortiz R.A. (2004) External costs from major accidents in non-nuclear fuel chains. Work Package 5 Report prepared for European Commission within Project NewExt on New Elements for the Assessment of External Costs from Energy Technologies. Paul Scherrer Institut, Villigen, Schweiz.
- CEC 2009 California Energy Commission – Consumer Energy Center (2009). Online: [http://www.consumerenergycenter.org/home/heating\\_cooling/geothermal.html](http://www.consumerenergycenter.org/home/heating_cooling/geothermal.html)
- Dones 2007 Dones, R. (2007) Kernenergie. In: Dones, R. (Ed.) et al., Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz. Final report ecoinvent No. 6-VII, Paul Scherrer Institut Villigen, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, Schweiz.
- ecoinvent data v2.0 Ökobilanz Datenbank ecoinvent, Datenbestand v2.0. Online: [www.ecoinvent.org](http://www.ecoinvent.org)
- E-Control 2005 Dezentrale Erzeugung in Österreich, E-Control GmbH, 2005.
- Erdgas Zürich 2009 Erdgas Zürich AG (2009). Persönliche Auskunft Martin Stadelmann. Online: <http://www.erdgaszuerich.ch/de.html>

- EWB 2009 Energie Wasser Bern (2009) Online: [http://www.ewb.ch/ww/de/pub/produkte/erdgas/aktuelle\\_preise.cfm](http://www.ewb.ch/ww/de/pub/produkte/erdgas/aktuelle_preise.cfm)
- Faist Emmenegger et al. 2007 Faist Emmenegger M., Heck T., Jungbluth N., Tuchschnid M. (2007) Erdgas. In: Dones, R. (Ed.) et al., Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz. Final report ecoinvent No. 6-V, Paul Scherrer Institut Villigen, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, Schweiz.
- Frischknecht et al. 2007a Frischknecht R., Jungbluth N., Althaus H.-J., Bauer C., Doka G., Dones R., Hischer R., Hellweg S., Humbert S., Köllner T., Loerincik Y., Margni M. and Nemecek T. (2007a) Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods. ecoinvent report No. 3, v2.0. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, 2007. Online: [www.ecoinvent.ch](http://www.ecoinvent.ch).
- Frischknecht et al. 2007b Frischknecht R. Tuchschnid M., Faist Emmenegger M., Bauer C., Dones R. (2007b) Strommix und Stromnetz. In: Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz (ed. Dones R.). ecoinvent report No. 6, v2.0. Paul Scherrer Institut Villigen, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, Schweiz.
- Ganter et al. 2001 Ganter U., Jakob M., Hirschberg S. (2001) Perspektiven der zukünftigen Strom- & Wärmeversorgung für die Schweiz Ökologische und ökonomische Betrachtungen. Projekt GaBE: Ganzheitliche Betrachtung von Energiesystemen. PSI-Bericht Nr. 01-12, Paul Scherrer Institut, Villigen, Schweiz.
- Goedkoop & Spriensma 2000 Goedkoop M., Spriensma R. (2000) „The Eco-indicator 99: A damage oriented method for life cycle impact assessment.” PRé Consultants, Amersfoort, Niederlande.
- Guinée et al. 2001a Guinée J. B., (final editor), Gorrae M., Heijungs R., Huppes G., Kleijn R., de Koning A., van Oers L., Wegener Sleeswijk A., Suh S., Udo de Haes H. A., de Bruijn H., van Duin R., Huijbregts M. A. J., Lindeijer E., Roorda A. A. H. and Weidema B. P. (2001a) Life cycle assessment; An operational guide to the ISO standards; Parts 1 and 2. Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment (VROM) and Centre of Environmental Science (CML), Den Haag and Leiden, The Netherlands, retrieved from: <http://www.leidenuniv.nl/cml/ssp/projects/lca2/lca2.html>
- Guinée et al. 2001b Guinée J. B., (final editor), Gorrae M., Heijungs R., Huppes G., Kleijn R., de Koning A., van Oers L., Wegener Sleeswijk A., Suh S., Udo de Haes H. A., de Bruijn H., van Duin R., Huijbregts M. A. J., Lindeijer E., Roorda A. A. H. and Weidema B. P. (2001b) Life cycle assessment; An operational guide to the ISO standards; Part 3: Scientific Background. Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment (VROM) and Centre of Environmental Science (CML), Den Haag and Leiden, The Netherlands, retrieved from: <http://www.leidenuniv.nl/cml/ssp/projects/lca2/lca2.html>
- Heck & Bauer 2005 Heck T., Bauer C. (2005) Ausgewählte Indikatoren zu Wärmekraftkopplungsanlagen. Im Auftrag der Aare-Tessin AG / Grundlagenbeitrag zu VSE Vorschau 05. Ganzheitliche Betrachtung von Energiesystemen, Paul Scherrer Institut, Villigen, Schweiz.
- Heck 2007a Heck T. (2007a) Wärme-Kraft-Kopplung. In: Dones, R. (Ed.) et al., Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz. Final report ecoinvent No. 6-XIV, Paul Scherrer Institut Villigen, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, Schweiz.

- 
- Heck 2007b Heck T. (2007) Wärmepumpen. In: Dones, R. (Ed.) et al., Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz. Final report ecoinvent No. 6-X, Paul Scherrer Institut Villigen, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, Schweiz.
- Hirschberg et al 2004 Hirschberg S., Dones R., Heck T., Burgherr P., Schenler W., Bauer C. (2004) Sustainability of electricity supply technologies under German conditions: A comparative evaluation. Comprehensive Assessment of Energy Systems (Gabe), Paul Scherrer Institut, Villigen, Schweiz.
- Hirschberg et al. 2007 Hirschberg S., Bauer C., Burgherr P., Dones R., Schenler W., Bachmann T., Gallego Carrera D. (2007) Environmental, economic and social criteria and indicators for sustainability assessment of energy technologies. Deliverable n° D3.1 – RS 2b, NEEDS project (New Energy Externalities Developments for Sustainability), Paul Scherrer Institut, Schweiz. Online: [http://www.needs-project.org/docs/results/RS2b/RS2b\\_D3.1.pdf](http://www.needs-project.org/docs/results/RS2b/RS2b_D3.1.pdf)
- Holzenergie Schweiz 2008 Holzenergie Schweiz (2008) Richtpreise für Energieholz 2008. Online: <http://www.holzenergie.ch/>
- IEA 2009 Internationale Energieagentur (2009), Fallstudien Wärmepumpeninstallationen, <http://www.heatpumpcentre.org>
- IPCC 2007a IPCC (2007a) Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp. Online: <http://www.ipcc.ch/ipccreports/assessments-reports.htm>
- IPCC 2007b IPCC (2007b) Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 976pp. Online: <http://www.ipcc.ch/ipccreports/assessments-reports.htm>
- IPCC 2007c IPCC (2007c) Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA., XXX pp. Online: <http://www.ipcc.ch/ipccreports/assessments-reports.htm>
- Jungbluth 2007 Jungbluth, N. (2007) Sonnenkollektor-Anlagen. In Dones, R. (Ed.) et al., Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz. ecoinvent report No. 6-XI, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, Schweiz.
- KlimaInnovativ 2009 Verein Klima Innovativ e.V. (2009), <http://www.klima-innovativ.de/pages/kostenrechner.html>
- LRV 2000 Luftreinhalte-Verordnung vom 16. Dezember 1985 (LRV). (Stand am 28. März 2000.) Schweizerischer Bundesrat. Bern.
- MiniBHKW 2009 Datenbank mit aktuellen Informationen und Daten von BHKW, <http://www.minibhkw.de/minibhkw-plan/update.html>
-

- Mutale & Stbrac 2001 Mutale J., Stbrac G. (2001) DISPOWER: Distributed Generation with High Penetration of Renewable Energy Sources, Final Public Report, ENK-CT-2001-00522.
- OECD 2008 Uranium 2007. Resources, Production and Demand. OECD, International Atomic Energy Agency, Paris.
- Roth et al. 2008 Roth S., Hirschberg S., Bauer C., Burgherr P., Dones R., Heck T., Schenler W. (2008) Sustainability of electricity supply technology portfolio. Im Tagungsband der PHYSOR 08, International Conference on the Physics of Reactors "Nuclear Power: A Sustainable Resource", Interlaken, Schweiz.
- Vaillant 2009 Persönliche Auskunft durch Hr. Martin Rauen (Verantwortlicher für EcoPower BHKW in der Schweiz), Vaillant Schweiz, [www.vaillant.ch](http://www.vaillant.ch)
- VSG 2008 Verband der Schweizerischen Gasindustrie (2008) Konsumentenpreise Erdgas und Heizöl EL, 2008. Online: [http://www.erdgasobersee.ch/fileadmin/media/dl/preise/konsumentenpreise\\_11.08.pdf](http://www.erdgasobersee.ch/fileadmin/media/dl/preise/konsumentenpreise_11.08.pdf)
- VSG 2009 Verband der Schweizerischen Gasindustrie (2009) Kostenvergleich verschiedener Heizsysteme. Online: [http://www.erdgas.ch/fileadmin/authors/anwendungen/kostenvergleich/kostenvergleich\\_d.pdf](http://www.erdgas.ch/fileadmin/authors/anwendungen/kostenvergleich/kostenvergleich_d.pdf)
- Werner et al. 2007 Werner F., Althaus H.-J., Künniger T., Richter K. and Jungbluth N. (2007) Life Cycle Inventories of Wood as Fuel and Construction Material. Final report ecoinvent 2000 No. 9. EMPA Dübendorf, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, Schweiz.

## 8 Anhang

### 8.1 Daten zu Kosten und Arbeitsintensität

Tabelle 8.1 Kostendaten und Schlüsselparameter für BHKW und Zusatzheizungen.

System		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Typ		EFH	MFH	Gewerbe	Gewerbe	Gewerbe	Gewerbe	Gewerbe	Gewerbe	Gewerbe	Gewerbe
WKK		BHKW	BHKW	BHKW	BHKW	BHKW	BHKW	BHKW	BHKW	BHKW	BHKW
Zusatzstrom		Netz									
Zusatzwärme				Erdgas	WP	Pellets	Sonnenkollektor +Gas	Erdgas	WP	Pellets	Sonnenkollektor +Gas
<b>BHKW</b>											
Leistung elektrisch	kWel	2.0	50	160	160	160	160	1'000	1'000	1'000	1'000
Leistung thermisch	kWth	5.2	90	275	275	275	275	1'158	1'158	1'158	1'158
Jahresnutzungsgrad elektrisch	%	25%	30%	32%	32%	32%	32%	38%	38%	38%	38%
Jahresnutzungsgrad thermisch	%	65%	54%	55%	55%	55%	55%	44%	44%	44%	44%
Investition Turn-Key-System	CHF/kWel	14'000	2'400	1'650	1'650	1'650	1'650	900	900	900	900
O&M (gesamt für BHKW und Zusatzwärme)	CHF/a	970	5'289	13'459	15'886	14'717	15'661	75'649	159'323	119'035	151'575
Jahresbetriebsdauer	h/a	2'000	4'000	4'000	4'000	4'000	4'000	4'000	4'000	4'000	4'000
Lebensdauer	Jahre	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Hausverteilung	CHF/kWth	832	626	557	557	557	557	464	464	464	464
<b>CH-Strommix</b>											
Strompreis Endverbraucher	Rp/kWthel	15.5									
<b>Zusätzliches Wärmeerzeugungssystem</b>											
Leistung elektrisch	kWel				212.0				891.0		
Leistung thermisch	kWth			825	825	825	825	3'474	3'474	3'474	3'474
Investition Turn-Key-System	CHF/kWth			756	2'701	1'764	2'521	528	1'885	1'232	1'760
Investition Gebäude, Land, Erschliessung, ...	CHF/kWth			0	0	0	0	0	0	0	0
Jahresbetriebsdauer	h/a			1'250	1'250	1'250	1'250	1'250	1'250	1'250	1'250
Lebensdauer	Jahre			20	20	25	15	20	20	25	15

Tabelle 8.2 Kostendaten und Schlüsselparameter für zentrale Stromerzeugung und Wärmepumpen.

System		11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Typ		EFH	EFH	EFH	EFH	MFH	MFH	MFH	MFH	Gewerbe	Gewerbe	Gewerbe	Gewerbe
Strom		CCGT	KKW	Hydro	CH-Mix	CCGT	KKW	Hydro	CH-Mix	CCGT	KKW	Hydro	CH-Mix
Wärme		WP	WP	WP	WP	WP	WP	WP	WP	WP	WP	WP	WP
O&M (gesamt)	CHF/a	270	270	270	270	2569	2569	2569	2569	7226	7226	7226	7226
<b>Zentrale Stromerzeugung</b>													
Stromgestehungskosten	Rp/kWthel	8.5	5.0	10.2	8.0	8.5	5.0	10.2	8.0	8.5	5.0	10.2	8.0
Netz & SDL	Rp/kWthel	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5
<b>Wärmeerzeugungssystem</b>													
Leistung elektrisch	kWel	1.3	1.3	1.3	1.3	23.1	23.1	23.1	23.1	70.5	70.5	70.5	70.5
Leistung thermisch	kWth	5.0	5.0	5.0	5.0	90.0	90.0	90.0	90.0	275.0	275.0	275.0	275.0
Investition Turn-Key-System	CHF/kWth	4'500	4'500	4'500	4'500	2'180	2'180	2'180	2'180	2'025	2'025	2'025	2'025
Jahresbetriebsdauer	h/a	2'100	2'100	2'100	2'100	4'000	4'000	4'000	4'000	4'000	4'000	4'000	4'000
Lebensdauer	Jahre	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Hausverteilung	CHF/kWth	900	900	900	900	674	674	674	674	603	603	603	603

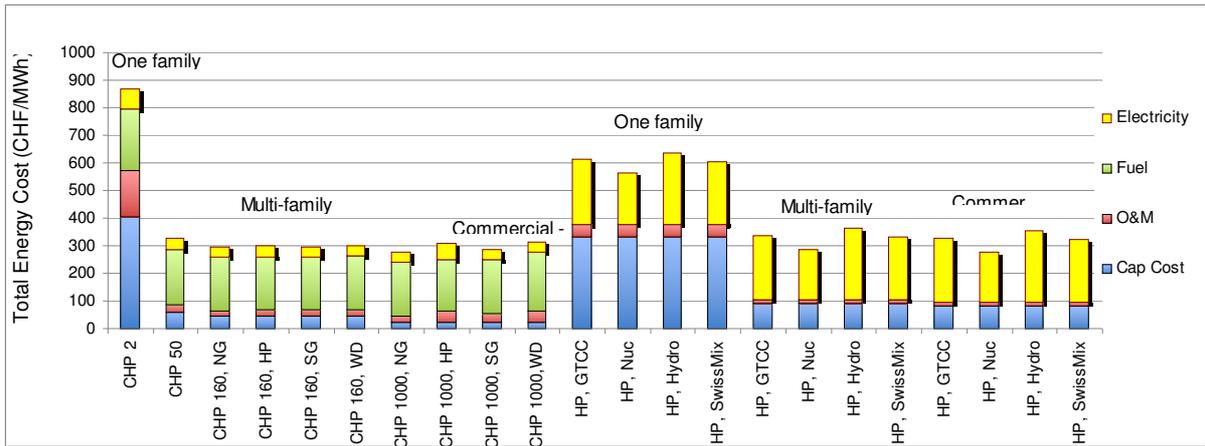


Abbildung 8.1 Kostenaufschlüsselung für die Gesamtenergiekosten.

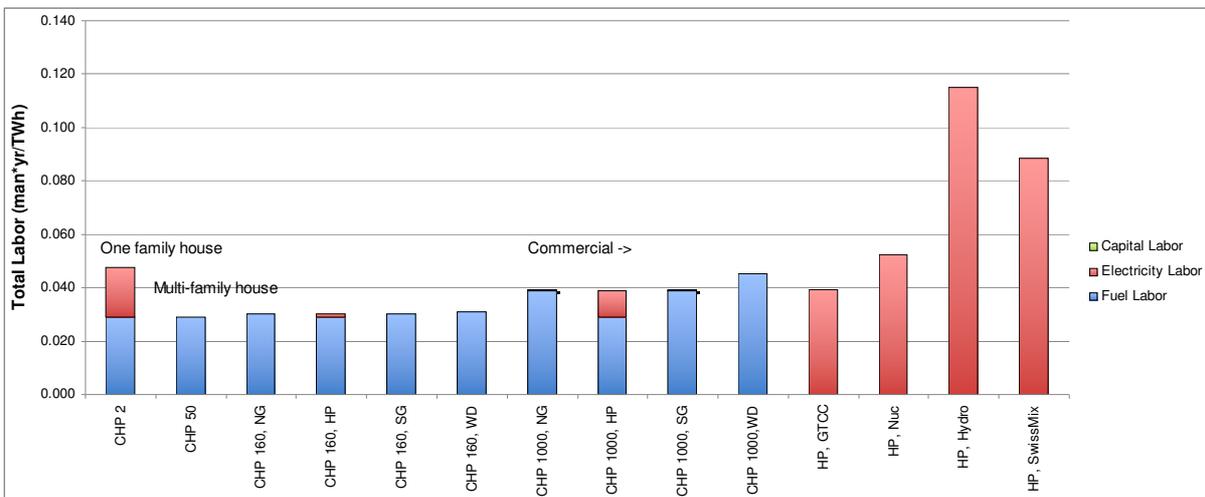


Abbildung 8.2 Einzelbeiträge zur Arbeitsintensität gesamt.

## 8.2 Definition der Netzebenen (NE)

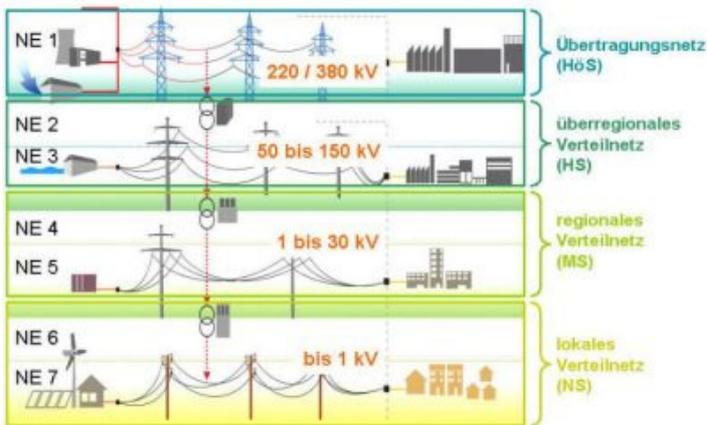


Abbildung A.8.3 Definition der Netzebenen (NE).

### **8.2.1 Definition "Smart Grid" (Wikipedia)**

Der Ausdruck intelligentes Stromnetz oder englisch Smart Grid bezeichnet [Stromnetze](#), die neben dem herkömmlichen Stromtransport auch [bidirektionale Datenkommunikation](#) erlauben und den Anforderungen für einen hochkomplexen Netzbetrieb genügen.

### **8.2.2 Definition "Smart Meter" (Wikipedia)**

Ein intelligenter Zähler (auch Smart Meter genannt) ist ein mit Zusatzfunktionen ausgestatteter, elektronischer Zähler, welcher üblicherweise [Energie](#) in Form eines Zählerstandes erfasst. Es gibt Zähler für die Messung von Fernwärme, Gas oder Wasser, viele Unternehmen entwickeln derzeit intelligente Zähler für Strom. Im Gegensatz zu den alten, schwarzen Drehstromzählern, den Ferraris-Zählern, machen digitale Stromzähler die jährliche Ablesung überflüssig, da die Zählerdaten elektronisch an den Anbieter übermittelt werden - beispielsweise über das Internet. Ausserdem kann die Höhe der Strombedarfe, z. B. Lastspitzen erkannt, gespeichert, und zu Rechnungszwecken ausgewertet werden.