



# Strategie für Bau und Sanierung von Heizungsanlagen unter Einbezie- hung erneuerbarer Energien in städtischen Liegenschaften

## Kurzfassung

Auftraggeber: Stadt Nürnberg

Verfasser:

Dr.-Ing. Volker Kienzlen

Dipl.-Ing. Harald Bieber

Dipl.-Ing. Helmut Böhnisch

Stand: Juli 2017

Überarbeitung: Oktober 2017

2. Überarbeitung Januar 2018

## Vorbemerkung

Die Stadt Nürnberg hat sich durch zahlreiche Initiativen der Nachhaltigkeit verpflichtet. Angesichts immer knapper werdender Energieressourcen und steigender Energiepreise gewinnt das Thema rationelle Energieverwendung und der Einsatz erneuerbarer Energien zunehmend an Bedeutung.

Im Bestand der Stadt Nürnberg befinden sich etwa 1.700 Einzelgebäude in rund 700 Liegenschaften. Die Kosten für den Energie- und Wasserverbrauch betragen 2016 rund 38 Mio. Euro. Der Heizenergieverbrauch konnte von 2000 bis 2016 um rund 28 % und der Stromverbrauch um rund 24 % gesenkt werden. Gleichzeitig hat die von der Stadt bewirtschaftete Fläche um ca. 28 % zugenommen.

Die städtischen Klimaschutzziele sehen bis 2050 eine Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 80 % gegenüber 1990 vor. Bei den städtischen Gebäuden wurden bisher rund 45 % erreicht.

In den städtischen Gebäuden werden derzeit rund 56 % des Endenergieeinsatzes für Wärme benötigt, bzgl. Kosten sind es rund 30 %. 2050 soll zumindest 50 % der benötigten Wärme durch erneuerbare Energien bereitgestellt werden. Bei den städtischen Gebäuden in Nürnberg liegt der regenerative Erzeugungsanteil Stand 2016 bei etwa 15 %.

## Aufgabenstellung

Ziel der Bearbeitungen ist die Erarbeitung einer Potenzial- und Realisierungsstudie zum ökologisch und wirtschaftlich sinnvollen und zukunftsfähigen Einsatz erneuerbarer Energie zur Wärmeversorgung der städtischen Gebäude in Nürnberg, die nicht an die Fernwärmeversorgung der N-ERGIE angeschlossen sind bzw. werden.

Eine umfassende, aber dennoch konkrete gebäudetyp- und standortbezogene Entscheidungsgrundlage soll zur Verfügung stehen, deren Variantenvorgaben zur Nutzung der erneuerbaren Energien für den Wärmebedarf in die Planungen sowohl bei Neubauprojekten, als auch bei Bestandsanierungen integriert werden können.

Bei Sanierungen der Anlagentechnik ist die Strategie sehr stark abhängig von den äußeren Rahmenbedingungen (Fernwärme verfügbar, Verbrennungsbeschränkungen, Geologie) aber auch von den technischen Rahmenbedingungen im Gebäude selbst (Bedarf an Trinkwarmwasser, heutiger bzw. mittelfristig erreichbarer energetischer Standard, Auslegungstemperaturen der Heizflächen, etc...).

Für die städtischen Gebäude gelten seit 2007 (2009 aktualisiert) die vom Stadtrat beschlossenen energetischen Standards und Planungsanweisungen, die bei allen städtischen Baumaßnahmen anzuwenden sind.

## Typgebäude

Für die Untersuchung wurden Typgebäude definiert, anhand derer ein repräsentativer Gebäudebestand der Stadt Nürnberg kategorisiert und so eine Entscheidung für ein sinnvolles Heizungskonzept herbeigeführt werden kann.

Die Untersuchungen werden exemplarisch für die Gebäudetypen Schule, Sporthalle und Kindertagesstätte (Kita) durchgeführt. Dabei werden keine konkreten Objekte zugrunde gelegt sondern generische Typgebäude. Bei jedem der drei Typgebäude wurden die drei Varianten Neubau, saniert und unsaniert betrachtet. Für jeden dieser insgesamt neun Fälle wurden dann jeweils (wenigstens) drei geeignete Versorgungsvarianten untersucht und deren wirtschaftliche und ökologische Eigenschaften dargestellt. Tabelle 1 zeigt in der Übersicht die energetischen Kennzahlen der neun Gebäudevarianten, die nachstehende Tabelle 2 die zugeordneten Technikvarianten.

**Tabelle 1 Übersicht der Gebäude und Anlagenvarianten**

Gebäudetyp			Neubau	Saniert	Bestand	TWW
<b>Schule</b>						
	Spez. W.-bedarf	kWh/m <sup>2</sup> a	23	45	150	3
9.000 m <sup>2</sup>	Wärmebedarf	kWh/a	207.000	405.000	1.323.000	27.000
1.400 VBS h/a	Heizlast	kW	148	289	945	
<b>Sporthalle</b>						
	Spez. W.-bedarf	kWh/m <sup>2</sup> a	20	40	140	4
1.600 m <sup>2</sup>	Wärmebedarf	kWh/a	32.000	64.000	224.000	6400
1.200 VBS h/a	Heizlast	kW	27	53	187	
<b>Kita</b>						
	Spez. W.-bedarf	kWh/m <sup>2</sup> a	38	55	160	4
700 m <sup>2</sup>	Wärmebedarf	kWh/a	26.600	38.500	109.200	2.800
1.400 VBS h/a	Heizlast	kW	19	28	78	

**Tabelle 2 Untersuchte Anlagenvarianten – blau unterlegt: Referenzvariante**

	Gas-BW	Pellet	BHKW	Gas-WP	LW-WP	SW-WP	TS
Schule Neubau		■	■	■		■	
Schule saniert	■		■	■			
Schule Bestand	■	■	■				
Sporthalle Neubau			■			■	■
Sporthalle saniert	■			■		■	■
Sporthalle Bestand	■	■	■				
KiTa Neubau		■			■	■	■
KiTa saniert	■					■	■
Kita Bestand	■	■		■			■

Der Gasbrennwertkessel (Gas-BW) mit dem gesetzlich erforderlichen Anteil an Biomethan von 25 % bei der Sanierung wurde bei den Bestandsobjekten als Basisfall gewählt. Beim Neubau einer Schule und der Sporthalle erscheint jeweils das BHKW als die zielführendste Referenzvariante, bei der Kita die Luft-Wasserwärmepumpe. Je nach Anlage werden ein Holz-Pelletsessel, ein Blockheizkraftwerk (BHKW), eine mit Gas betriebene Wärmepumpe (Gas-WP) und eine elektrisch betriebene Wärmepumpe (E-WP) betrachtet. Die Thermische

Solaranlage (TS) wird nur dort geprüft, wo auch im Sommer hohe Wärmeverbräuche zu erwarten sind.

## Methodik

### Simulationen, Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanz

Auf der Grundlage der angenommenen Verbrauchskennwerte für Heizung und Warmwasser wurden für alle bivalenten Versorgungsvarianten Modellrechnungen durchgeführt. Aus Lastgängen der Liegenschaftstypen und den Verbrauchswerten für Heizung und Warmwasser wurde dabei in mehreren Iterationsschritten die optimale Auslegung des Grundlasterzeugers (BHKW, Pelletkessel) sowie ggf. der Beitrag der solarthermischen Anlage ermittelt. Dabei werden Leistungsdaten realer BHKWs verwendet.

Parallel dazu wird auf der Basis der gesetzlichen und energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen sowie Kostenkennwerte für die jeweilige Anlagentechnik die Wirtschaftlichkeit der jeweiligen Versorgungslösung im Vergleich zur Referenzvariante dargestellt.

Basierend auf den Ergebnissen dieser Modellrechnungen wurde für jede der untersuchten Varianten eine Energie- und Emissionsbilanz erstellt. Hierfür wurden die Emissionsfaktoren der aktuellen GEMIS-Datenbank (V 4.95) zugrunde gelegt. In diesen Emissionsfaktoren sind sämtliche vorgelagerten Prozesse (Gewinnung, Aufbereitung, Transport) der Energieträger enthalten. Für die vorliegende Bilanz wurden außer den Emissionen an CO<sub>2</sub> auch weitere Treibhausgase wie Methan (CH<sub>4</sub>) und Lachgas (N<sub>2</sub>O) berücksichtigt und auf die Treibhausgaswirkung von CO<sub>2</sub> normiert. Im Weiteren wird das zusammengefasste Ergebnis als Treibhausgasemissionen (THG) bezeichnet.

Bei den Luftschadstoffen werden Säurebildner (SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>) sowie Partikelemissionen (Feinstaub) betrachtet und gemäß den Gewichtungsfaktoren der TA Luft zu einem Gesamtwert aggregiert. Im Gegensatz zu den global wirksamen, klimaschädlichen Treibhausgasen sind die Luftschadstoffe ein lokales bzw. regionales Problem. Zu beachten ist auch, dass diese bei Verbrennungsprozessen zwar lokal anfallen, die durch die Stromerzeugung bedingten Emissionen jedoch großräumig, was einen direkten Vergleich schwierig macht.

Die Resultate erlauben zum einen ein Ranking der Versorgungsvarianten bezüglich der Treibhausgas- und Luftschadstoff-Emissionen, zum andern die Ermittlung der CO<sub>2</sub>- bzw. THG-Minderungskosten; diese bezeichnet die Kosten (€) pro Tonne vermiedener THG-Emission im Vergleich zu einer Referenzvariante.

### Wirtschaftlichkeitsanalyse: Rechenverfahren und Randbedingungen

Die Kosten- und Wirtschaftlichkeitsrechnung erfolgt mit Hilfe einer Periodenbetrachtung, für die Zahlungsreihen auf der Einnahmen- und Ausgabenseite über einen festgelegten Zeitraum erstellt werden. Am Ende dieser Zeitperiode erfolgt die Berechnung des Kapitalwerts bzw. der internen Verzinsung des Eigenkapitals. So können sich während der Pro-

jektlaufzeit ändernde Parameter, die das Ergebnis der Wirtschaftlichkeitsrechnung beeinflussen, wie z. B. Kostensteigerungen bei Instandhaltung und Wartung, Erdgas sowie Ersatz- und Erweiterungsinvestitionen, in angemessener Weise berücksichtigt werden.

Zu beachten ist, dass bei den Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen keine Preissteigerungen der Energieträgerkosten berücksichtigt wurden. Ebenfalls nicht berücksichtigt wurden die nach städtischen Standards festgelegten CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten von 50 EUR/Tonne CO<sub>2</sub>.

Die Randbedingungen und Grunddaten aller Berechnungen wurden mit dem Auftraggeber abgestimmt.

## Versorgungsvarianten

Als Versorgungsvariante sollte ein Anschluss an das Wärmenetz der N-ERGIE – unter Beachtung der weiter unten beschriebenen grundsätzlichen Empfehlungen – oberste Priorität haben. Folgende grundsätzliche Aussagen gelten für die Wahl des Wärmeerzeugers (sofern kein Anschluss an das Wärmenetz erfolgt):

**Gas-Brennwertkessel** (Gas-BW) sind in keinem der untersuchten Fälle die klimafreundlichste oder die schadstoffärmste Versorgungsvariante. Bei der Variante Gasbrennwert wurde bereits der gesetzlich vorgegebene Anteil Biomethan berücksichtigt. Mit Blick auf die notwendige Dekarbonisierung des Energiesystems bis 2050 ist festzuhalten, dass angesichts einer realen Nutzungsdauer von Heizkesseln von 20 bis 30 Jahren der Einbau neuer fossiler Heizkessel ab etwa 2025 bis spätestens 2030 nicht mehr vertretbar ist. Trotz ihrer wirtschaftlichen Vorteile sollte sich diese Variante auf solche Fälle beschränken, in denen keine der sonstigen Alternativen sinnvoll sind. Anzumerken ist, dass Biomethan nicht in beliebigen Mengen eingesetzt werden kann, da der Biomasseanbau Flächen beansprucht und damit in Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion steht. Zudem sind Schadstoffemissionen der Düngemittelproduktion und des Einsatzes von Landmaschinen zu berücksichtigen.

**BHKW** leisten in größeren Liegenschaften kurz- und mittelfristig einen Beitrag zum Klimaschutz und zur Luftreinhaltung, mittel- bis langfristig sind BHKW daher ein wichtiger Beitrag zur Versorgungssicherheit. Durch die gleichzeitige Erzeugung von Strom und Wärme ermöglichen BHKW eine sehr effiziente Energienutzung. Der elektrische Wirkungsgrad und damit der ökologische Vorteil des BHKWs ist um so höher, je größer das Aggregat wird. Gleichzeitig verbessert sich die Wirtschaftlichkeit mit zunehmender Größe. BHKW sollten dann eingesetzt werden, wenn ein ausreichend hoher Wärmebedarf besteht. Aus wirtschaftlichen Gründen empfiehlt es sich, dass ein möglichst hoher Anteil des erzeugten Stroms im Gebäude selbst genutzt wird (Eigenverbrauch).

**Holzpellets** sind ein erneuerbarer aber endlicher Brennstoff, der außerhalb des Stadtrings bei unsanierten Liegenschaften dann sinnvoll eingesetzt werden kann, wenn qualifiziertes Bedienungspersonal verfügbar ist. Das Treibhausgas (THG)-Minderungspotenzial ist in der Einzelfallbetrachtung hoch. Zu bedenken ist jedoch, dass die bundesweit verfügbaren Biomassepotenziale bei weitem nicht ausreichen, um den Wärmebedarf selbst des energetisch sanierten Gebäudebestandes nachhaltig zu decken. Hinzu kommt mittelfristig die Notwendigkeit, die verfügbare Biomasse auch in anderen Sektoren wie beispielsweise dem

Transportsektor einzusetzen. Zudem gilt auch hier die für Biomethan beschriebene Flächenproblematik.

**Elektrowärmepumpen (E-WP)** werden für neue und grundlegend sanierte Liegenschaften mit Niedertemperaturheizflächen empfohlen. Dabei sollte als Wärmequelle möglichst Erdreich, Grundwasser oder Abwasser genutzt werden (Sole-Wasser-Wärmepumpen). Luft als Wärmequelle stellt eine mögliche, aber ungünstigere Alternative dar (Luft-Wasser-Wärmepumpe). Luft-Wasser-Wärmepumpen sind jedoch aufgrund der niedrigeren Jahresarbeitszahl (JAZ) von 3,0 nur eingeschränkt zu empfehlen. Unter guten Bedingungen können bei Sole-Wasser-Wärmepumpen Jahresarbeitszahlen (JAZ) im Bereich von 4 – 4,5 erreicht werden, d.h. aus einer kWh Stromerzeugung werden 4 bis 4,5 kWh Wärme gewonnen. Wärmepumpen sind heute (nur) dann ökologisch vorteilhaft, wenn eine Jahresarbeitszahl von mehr als 3 erreicht wird. Das setzt neben einer geeigneten Wärmequelle voraus, dass das Gebäude einen guten Wärmeschutz aufweist und, wie oben gesagt, über Niedertemperatur-Heizflächen verfügt. Der ökologische Vorteil der Elektrowärmepumpe nimmt mit steigendem Anteil erneuerbar erzeugten Stroms im Netz zu. Der weitere Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung wird dazu führen, dass die spezifischen THG-Emissionen pro kWh Strom weiter sinken. Dies spricht für einen verstärkten Einsatz von Elektro-Wärmepumpen. Andererseits wird der Zubau von Wärmepumpen zu einem weiteren Anstieg des Stromverbrauchs in Deutschland führen. Zu bedenken ist, dass Kraftwerksleistung für kalte, wind- und sonnenarme Wintertage („kalte Dunkelflaute“) für den Betrieb von Wärmepumpen vorgehalten werden muss.

Mit **Gaswärmepumpen (G-WP)** liegen bisher wenig Erfahrungen vor, sie stellen aber eine bedenkenswerte Versorgungsvariante dar. Gas-Wärmepumpen arbeiten auch bei höheren Vorlauftemperaturen bzw. geringeren Temperaturspreizungen relativ effizient. Sie können monovalent ausgelegt oder in Kombination mit einem Spitzenlastkessel betrieben werden. Die Jahresheizzahl (JHZ), typischerweise im Bereich zwischen 1,2 und 1,6, gibt an, wieviele kWh Wärme im Jahresdurchschnitt aus einer kWh Gas erzeugt werden können.

**Solarthermische Anlagen (ST)** sind als ergänzendes System immer dann sinnvoll, wenn ein relevanter sommerlicher Wärmebedarf vorhanden ist. Solarenergie ist neben Umweltwärme die einzige erneuerbare Energieform, die unmittelbar auf dem jeweiligen Grundstück genutzt werden kann. In den vergangenen Jahren lag der Fokus stark auf Photovoltaik, jedoch hat auch die thermische Nutzung der Solarstrahlung ihre Berechtigung.

Grundsätzlich wird empfohlen, dass die verfügbare Dachfläche jeder Liegenschaft zur Energieerzeugung vor Ort genutzt wird. Dies wird in der Regel eine PV-Anlage sein. Insbesondere, wenn das Dach eine steile Neigung zulässt und Trinkwarmwasserbedarf besteht, bietet sich, ggf. ergänzend, eine thermische Anlage an. Eventuell kann die verfügbare Fläche auch so genutzt werden, dass ein PV-System mit einem Anstellwinkel von 30° (optimiert zur Maximierung des Jahresertrages) errichtet wird und daneben eine thermische Anlage mit steilerem Anstellwinkel, womit ein möglichst gleichmäßiger Ertrag über das Jahr erzielt wird.

## Ergebnisse

Nachfolgend sind die Ergebnisse aller neun Gebäudevarianten mit jeweils mindestens drei Versorgungsvarianten in jeweils einer normierten Grafik (Referenzvariante = 100 %) zusammenfassend dargestellt. Der Wärmepreis ist als blauer Balken, die Treibhausgasemissionen in rot und die Luftschadstoffemissionen sind mit einem gelben Balken dargestellt.

Die Balken der Referenzvariante sind zur Verdeutlichung des Bezugsniveaus mit dargestellt, auch wenn sie inhaltlich entbehrlich sind. Bei allen Bestands-Gebäuden ist zu bedenken, dass für die Variante Gas-Brennwertkessel der nach EEWärmeG erforderliche Anteil an Biomethan bereits bei der Berechnung berücksichtigt wurde. Der in der jeweiligen Variante berücksichtigte Anteil an Biomethan ist als Prozentwert in der Grafik eingetragen. Die verwendeten Abkürzungen sind im vorhergehenden Abschnitt erläutert. Bei den Wärmepumpen ist die für die Simulationsrechnung angegebene Jahresarbeitszahl (JAZ) bzw. für gasbetriebene Wärmepumpen die Jahresheizzahl (JHZ) angegeben. Bei BHKWs ist die elektrische Leistung angegeben, die für das jeweilige Gebäude als passend ermittelt wurde. Die empfohlene Variante ist hervorgehoben, die alternativ denkbare heller dargestellt.

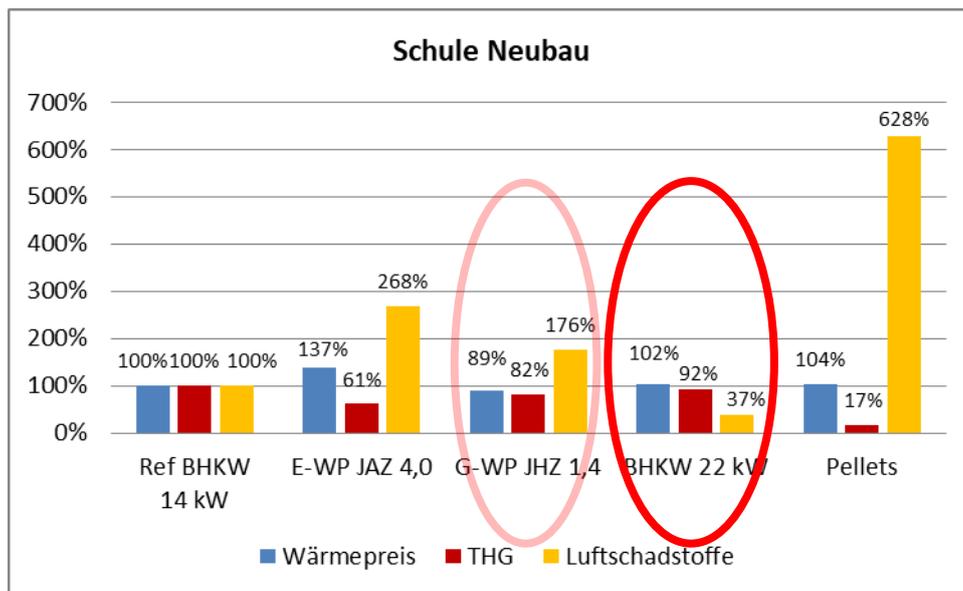


Abbildung 1: Schule Neubau, Zusammenfassung (normiert)

Die Installation von BHKW kann für **neue Schulen, bei Schulsanierungen oder Sporthallen Neubauten**, empfohlen werden. Die Auslegung ist naturgemäß im Einzelfall zu prüfen. Die hier vorgeschlagenen Modulgrößen bieten einen Anhalt für sinnvolle Dimensionierungen. BHKW in Gebäuden mit nennenswertem Stromeigenverbrauch sind auch bei den heutigen niedrigen Energiepreisen wirtschaftlich. Das laut EEWärmeG zulässige kleine BHKW wird eher nicht empfohlen.

Für Schulneubauten stellen auch Gaswärmepumpen eine sinnvolle Alternative dar, die zu deutlichen CO<sub>2</sub>-Minderungen bei gleichzeitig vertretbaren Wärmekosten führt.

Negative Schadstoffemissionen bei BHKW im sanierten Bestand sind so zu deuten, dass beim Betrieb des BHKW insgesamt weniger Emissionen entstehen als beim Betrieb der Kraftwerke zur Stromerzeugung, sodass für die Wärmeerzeugung eine Emissionsgutschrift gewährt werden kann.

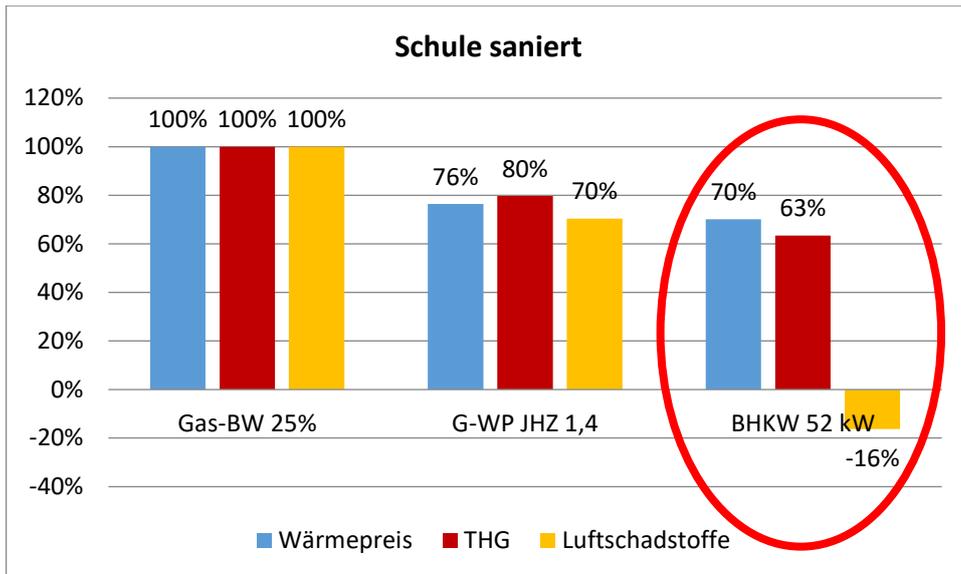


Abbildung 2: Schule saniert, Zusammenfassung (normiert)

Bei **Schulen im Bestand** zeigt die Rechnung nur relativ geringe wirtschaftliche Unterschiede auf, jedoch erhebliche CO<sub>2</sub>-Minderungspotenziale. Für solche Anlagen werden Pelletsysteme empfohlen, sofern es sich nicht um einen besonders problematischen Standort hinsichtlich Luftqualitätsanforderungen handelt. Die BHKW-Variante ist wirtschaftlich gleichermaßen vertretbar und daher empfehlenswert, auch wenn die Treibhausgasminde- rung nicht so hoch ist wie bei der Pellets-Variante.

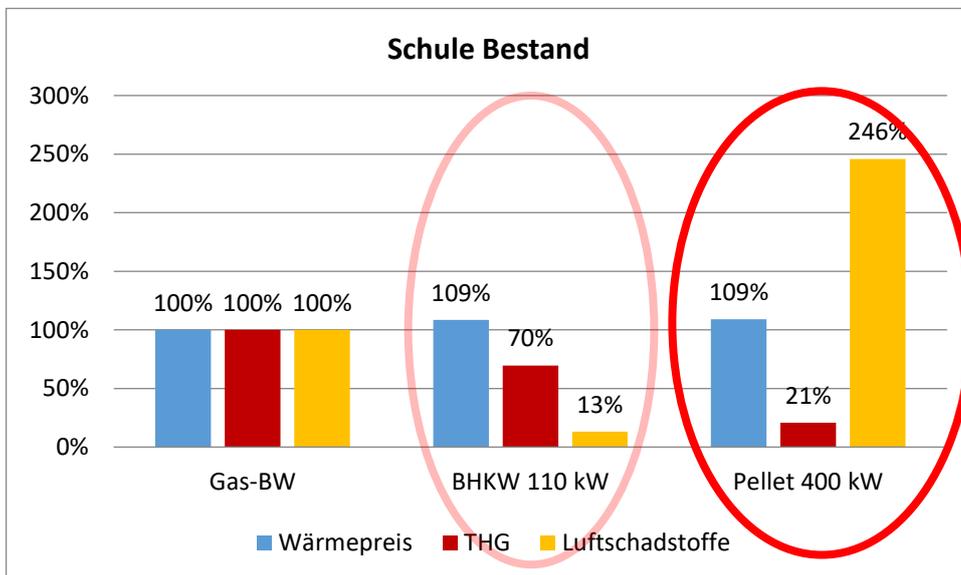


Abbildung 3: Schule Bestand, Zusammenfassung (normiert)

Für den **Sporthallenneubau** führen beide betrachteten Vergleichsvarianten zu relativ hohen Wärmepreisen. Grund für dieses ungünstige wirtschaftliche Ergebnis der Wärmepumpe ist die Tatsache, dass im Marktanzreizprogramm (MAP) für Neubauten kein Zuschuss gewährt wird. Hier ist daher bei heutigen Energiepreisen der Bau eines BHKWs sinnvoll. Da technisch die Elektrowärmepumpe jedoch die langfristig nachhaltigste Lösung darstellt, sollte die Wirtschaftlichkeit der Wärmepumpenlösung im Einzelfall geprüft werden und nach Möglichkeit realisiert werden.

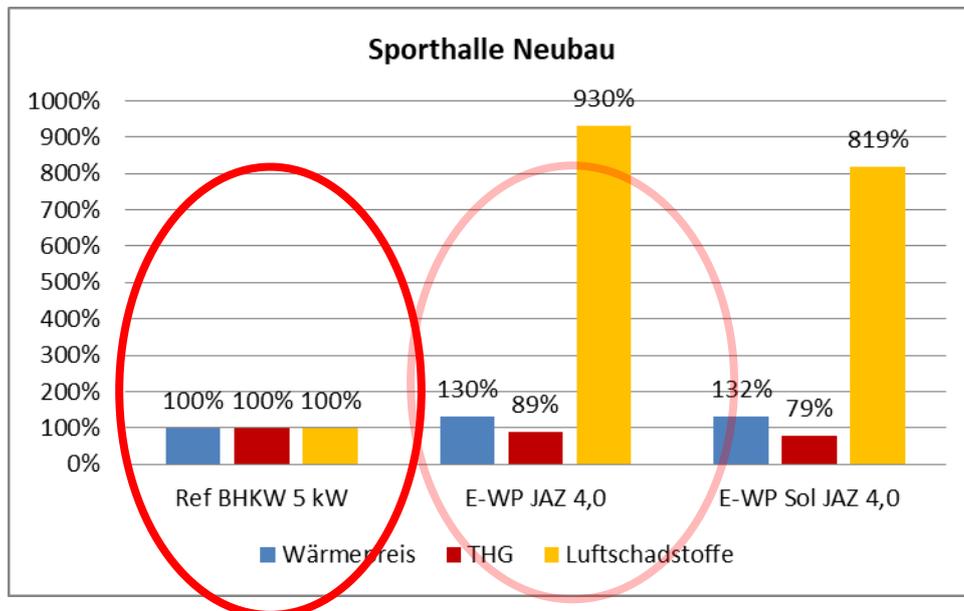


Abbildung 4: Sporthalle Neubau, Zusammenfassung (normiert)

Für die **sanierte Sporthalle** führt die Vergleichsrechnung für die Elektro-Wärmepumpe mit thermischer Solaranlage zu höheren Kosten als für einen Gasbrennwertkessel. Der Einfluss der Solaranlage auf den Wärmepreis ist minimal, sodass die thermische Solaranlage dann sinnvoll ist, wenn eine zentrale Warmwasserbereitung vorhanden ist. Aus Sicht des Gutachters werden die Kosten der Wärmepumpe als vertretbar bewertet. Aus technischer Sicht ist ein hocheffizientes Wärmepumpensystem im Neubau deutlich einfacher realisierbar als im sanierten Bestand. Grundsätzlich ist auch hier der Einsatz eines BHKW denkbar, was jedoch im Rahmen der Untersuchung nicht betrachtet wurde.

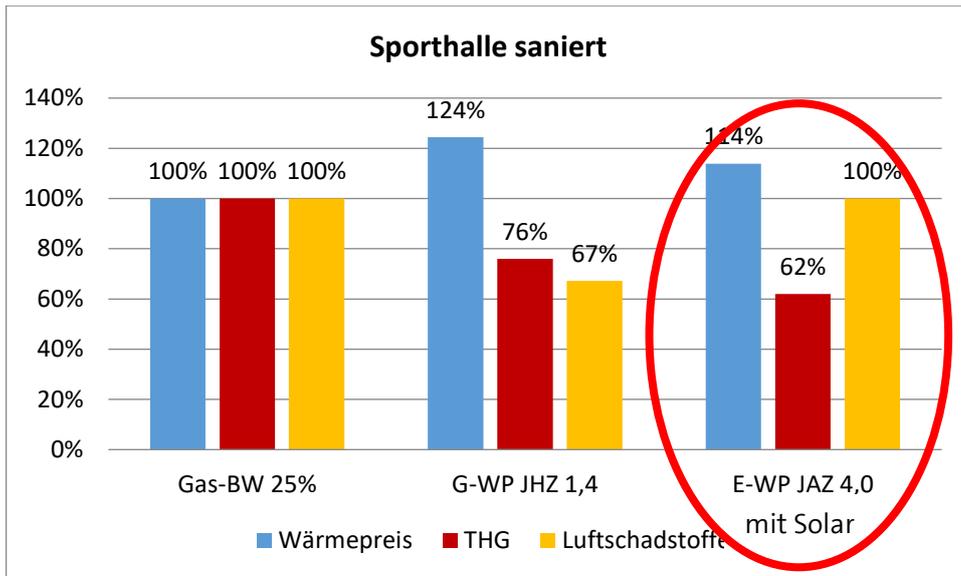


Abbildung 5: Sporthalle saniert, Zusammenfassung (normiert)

Die **Sporthalle im Bestand** kann mit Pellets so versorgt werden, dass die Treibhausgas-Emissionen auf 1/3 sinken. Die Mehrkosten sind moderat, sodass außerhalb des Stadtrings diese Variante empfohlen wird. Im Innenbereich der Stadt ist ein kleines BHKW sinnvoll.

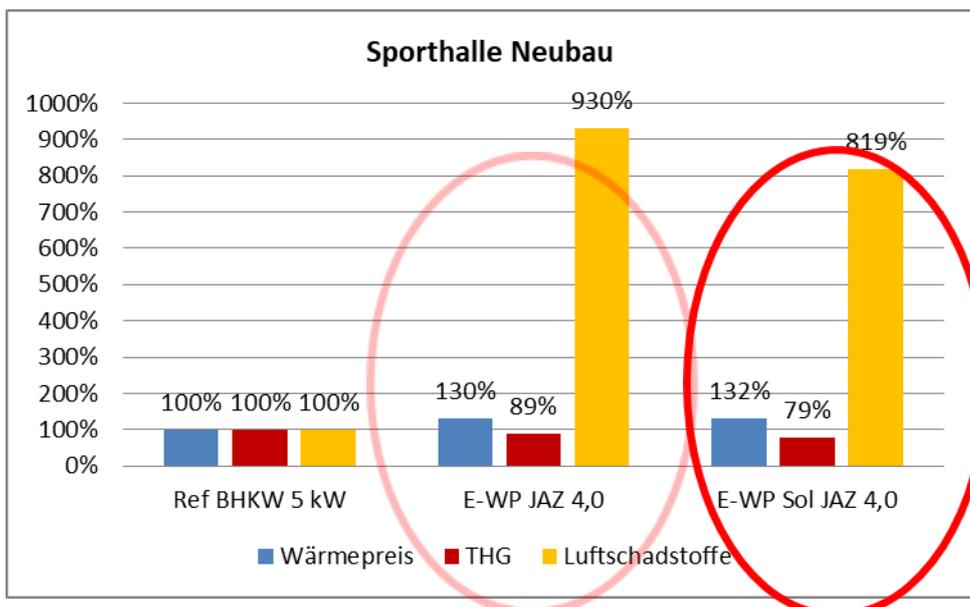


Abbildung 6: Sporthalle Bestand, Zusammenfassung (normiert)

Bei den **Kita-Neubauten** führen die Varianten mit erdgekoppelten Elektro-Wärmepumpen (Sole-Wasser-Wärmepumpe) zu Mehrkosten gegenüber der Referenzvariante der Luft-Wärmepumpe. Der zusätzliche Einbau einer thermischen Solaranlage ändert das wirtschaftliche Ergebnis kaum. Auch hierfür ist die fehlende Förderung im Neubau eine entscheidende Größe. Gerade im Neubau können jedoch die Voraussetzungen für einen effizienten Betrieb einer Wärmepumpe relativ einfach geschaffen werden. Daher sollte im

Einzelfall geprüft werden, ob beispielsweise eine Wärmequelle günstig erschlossen werden kann.

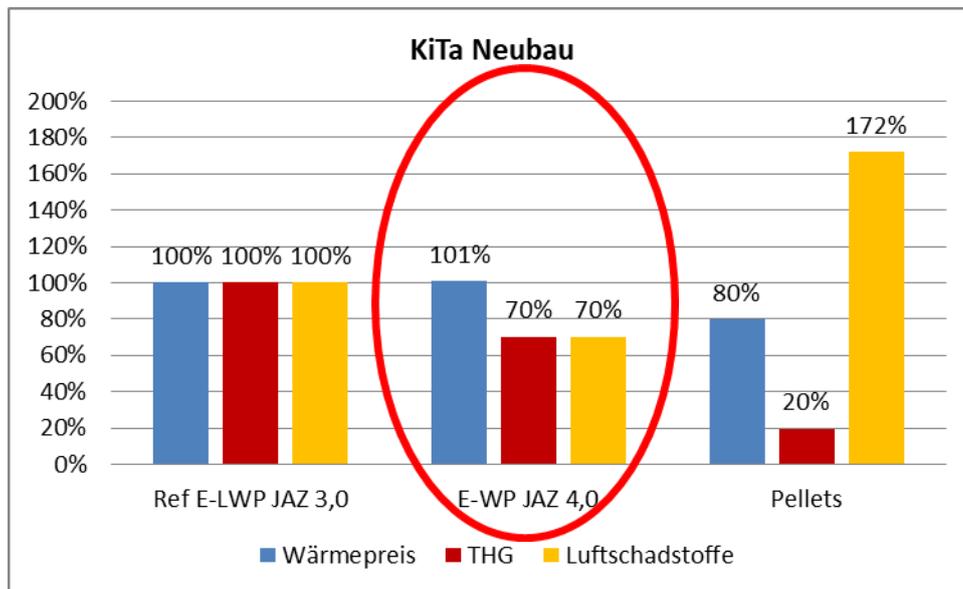


Abbildung 7: KiTa Neubau, Zusammenfassung (normiert)

Bei der **sanierten Kita** unterscheiden sich Dank Förderung im Marktanzreizprogramm die Wärmepreise nur sehr geringfügig. Dafür können mit einer Wärmepumpe die Treibhausgasemissionen bereits heute deutlich gesenkt werden. Da sich die Variante mit thermischer Solaranlage hinsichtlich des Wärmepreises nur marginal von der ohne Solaranlage unterscheidet, wird diese Variante empfohlen, sofern Bedarf und eine zentrale Warmwasserbereitung vorhanden ist.

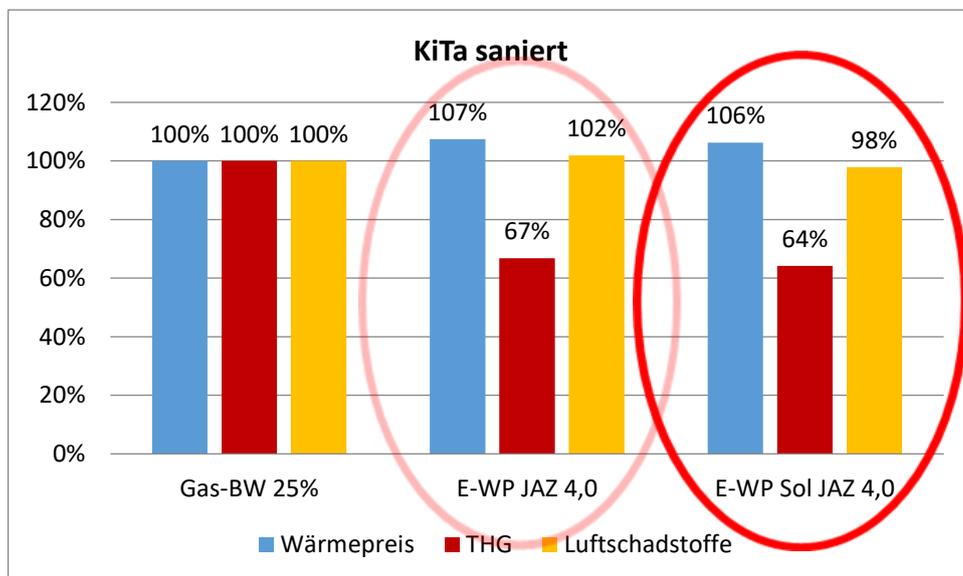


Abbildung 8: KiTa saniert, Zusammenfassung (normiert)

Bei der **unsanierten Kita** wiederum führen alle Vergleichsvarianten zu sehr deutlichen Mehrkosten. Auch das dort in der Regel fehlende Betriebspersonal führt zu der Empfehlung, dort einen Gas-Brennwertkessel einzusetzen.

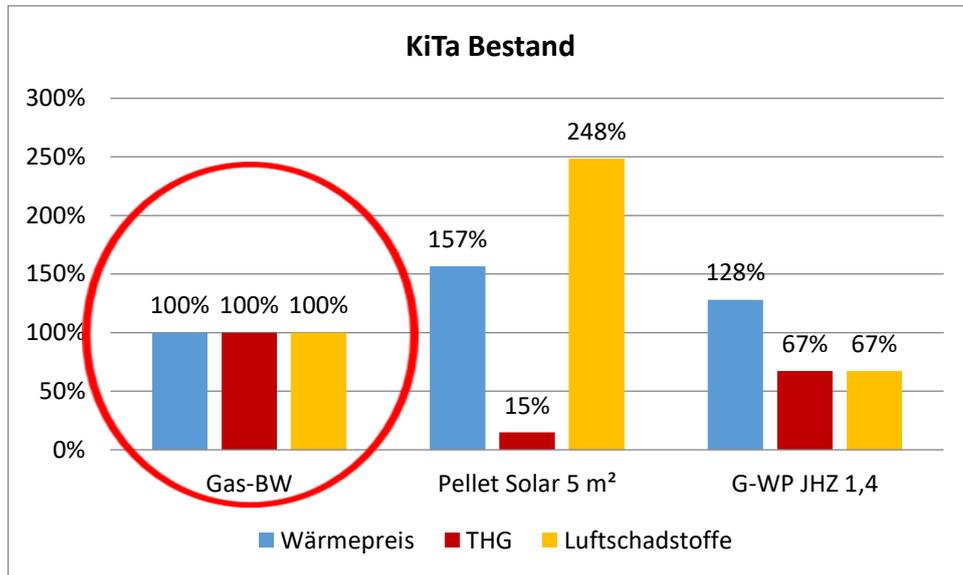


Abbildung 9: KiTa Bestand, Zusammenfassung (normiert)

## Betrachtung mit Ansatz steigender Energiepreise (Sensitivitätsanalyse)

Um eine Einschätzung zu ermöglichen, wie sich künftig steigende Energiepreise auf die Wirtschaftlichkeit der Versorgungsvarianten auswirken, wurden beispielhaft zwei der Typgebäude unter entsprechend veränderten Bedingungen betrachtet. Investitionen wie auch die Emissionen bleiben unverändert, es resultieren jedoch deutlich veränderte Wärmepreise. Betrachtet wurde der fiktive resultierende Wärmepreis in 20 Jahren. Dabei wurden die von der Stadt Nürnberg genannten Energiepreissteigerung (2016) von 5,57 % p.a. für Erdgas und 7,64 % p.a. für Strom angesetzt.

Es ist zu beachten, dass die hier getroffenen Aussagen keine Prognose darstellen, sondern lediglich eine „Was-wäre-wenn“-Betrachtung. Die künftige langfristige Entwicklung der Energiepreise ist nicht seriös vorhersagbar.

Für das Typgebäude **Schule saniert** wurde neben der Referenzvariante (Gas-Brennwert mit 25% Biomethan) die Versorgung mit Gas-Wärmepumpe zum Vergleich herangezogen. Es ergibt sich nach 20 Jahren ein Wärmepreis von 285 €/MWh für den Referenzfall und 173 €/MWh für die Variante Gas-Wärmepumpe, wie in Abbildung 10 dargestellt. Das heißt, der Vorteil der alternativen Versorgung wird in diesem Fall noch ausgeprägter. Dies ist einleuchtend, da ja derselbe Energieträger verwendet wird, aber weniger Brennstoff verbraucht wird als im Referenzfall. In beiden Fällen hat sich der Wärmepreis nach 20 Jahren mehr als verdoppelt. Für den zweiten untersuchten Fall des Neubaus einer Kita ist das Ergebnis ähnlich. Die Reihenfolge der Varianten ändert sich bei den angenommenen Preissteigerungen nicht.

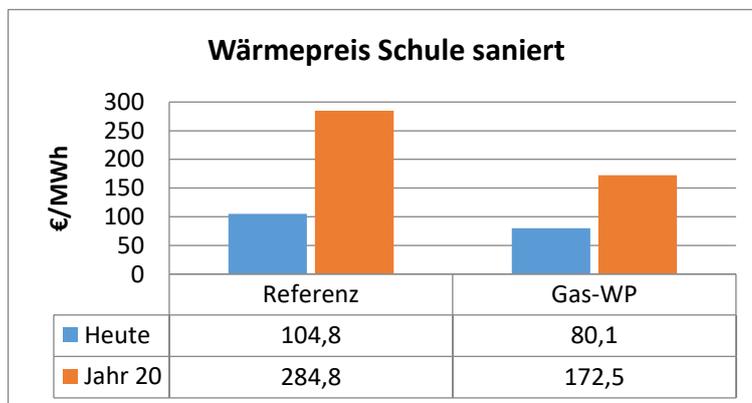


Abbildung 10: Entwicklung der Wärmepreise für den Fall „Schule saniert“ bei jährlicher Energiepreissteigerung von 5,57 %

Durch die angenommenen höheren Energiepreise ändert sich also die Empfehlung für die Heizungsanlage nicht.

Das Ergebnis der Sensitivitätsbetrachtung hängt jedoch stark davon ab, welche Annahmen für die künftige Energiepreisentwicklung getroffen werden. Bei den Preisen für fossile Energieträger sind aus Sicht des Gutachters mittelfristig Steigerungen, beispielsweise durch eine lenkende CO<sub>2</sub>-Abgabe, zu erwarten. Bei Strom ist der heute niedrige Börsenstrompreis auf Überkapazitäten zurückzuführen sowie darauf, dass der klimaschädliche Braunkohlestrom heute sehr billig ist. Mit perspektivisch sinkender EEG-Umlage bei immer

wirtschaftlicher Stromerzeugung aus Wind und Sonne sind eher stagnierende oder sehr moderat steigende Strompreise zu erwarten.

## Entscheidungsmatrix

Eine Teilaufgabe bestand darin, eine Entscheidungsmatrix zu erarbeiten, mit der systematisch abgeprüft werden kann, welche der untersuchten Erzeugungsvarianten für ein konkretes Projekt empfohlen und in der Planungsphase dann näher betrachtet werden kann.

Das hier entwickelte Excel-Werkzeug kann allen Mitarbeitern zur Verfügung gestellt werden, die mit der Auswahl der künftigen Anlagentechnik in städtischen Liegenschaften befasst sind. Änderungen oder das Hinzufügen weiterer Kriterien sind problemlos möglich.

Als erstes ist zu klären, ob zur Beheizung der Liegenschaft Abwärme beispielsweise aus produzierenden Unternehmen in der Nachbarschaft zur Verfügung steht. Je nach Leistung und Wärmebedarf, die zu decken sind, sollte der Suchradius bis zu 1.000 m betragen. Überschreitet das Wärmeangebot der Abwärmequelle den Wärmebedarf der städtischen Liegenschaft deutlich, ist es sinnvoll, die Nürnberger Stadtwerke (N-ERGIE) ins Projekt einzubinden. Da dies grundsätzlich gilt, wird dies im Excel-Tool nicht behandelt.

Der Kältebedarf spielt für die Auswahl innerhalb der untersuchten Versorgungsvarianten keine Rolle. Daher wird dieses Thema im Excel-Tool ebenfalls nicht behandelt.

Auch der Strombedarf der Liegenschaft wird in der Entscheidungsmatrix nicht betrachtet. Er spielt für die Wirtschaftlichkeit von KWK-Lösungen eine Rolle und muss für die individuelle Wirtschaftlichkeitsrechnung des BHKWs angesetzt werden.

Grundsätzlich sollte bei mehreren städtischen Liegenschaften in unmittelbarer Nachbarschaft der Gesamtwärmebedarf des gesamten Areals betrachtet werden und nicht nur der des einzelnen Gebäudes. Auch dies ist als Prämisse zu sehen und wird daher im Tool nicht betrachtet.

Die folgende Abbildung zeigt exemplarisch einen denkbaren Fall.

Entscheidungsmatrix zur Auswahl geeigneter Versorgungsvarianten für kommunale Gebäude							
		Versorgungsvarianten					
		Fernwärme	Pellets	E-WP	Gas-WP	BHKW	Solarthermie
Rahmenbedingungen		Nein	Ja	Nein	Ja	Nein	Nein
1	Fernwärme verfügbar?	<input type="checkbox"/>	0	1	1	1	1
2	Wärmebedarf > 200 MWh/a?	<input type="checkbox"/>	egal	egal	egal	egal	0
3	Lage außerhalb des Innenrings?	<input checked="" type="checkbox"/>	egal	1	egal	egal	egal
4	Pelletlagerung möglich?	<input checked="" type="checkbox"/>	egal	1	egal	egal	egal
5	Bedienpersonal (HM) zugegen?	<input checked="" type="checkbox"/>	egal	1	egal	egal	egal
6	Gebäude unsaniert?	<input type="checkbox"/>	egal	egal	1	egal	egal
7	Ganzjährig Wärmebedarf (TWW)?	<input type="checkbox"/>	egal	egal	egal	egal	0
8	TWW-Bereitung dezentral?	<input type="checkbox"/>	egal	egal	1	egal	egal
9	NT-Heizflächen vorhanden (< 45°)?	<input type="checkbox"/>	egal	1	0	egal	egal
10	EWS möglich, bzw. Grundwasser?	<input type="checkbox"/>	egal	egal	0	egal	egal
11	Gasanschluss vorhanden?	<input checked="" type="checkbox"/>	egal	egal	egal	1	1
12	Strom und Wärme von Ort nutzbar	<input type="checkbox"/>	egal	egal	egal	egal	0
13	Vollbenutzungsstunden > 5.000 h/a	<input type="checkbox"/>	egal	egal	egal	egal	0
14	Bivalente Wärmeversorgung möglich?	<input checked="" type="checkbox"/>	egal	egal	egal	egal	1

Abbildung 11: Schema der Entscheidungsmatrix als Excel-Tool (Beispiel-Screenshot)

Bei dem hier gewählten Beispielfall bleiben als Referenzvarianten Pellets und die Gas-Wärmepumpe übrig, die einer eingehenderen Untersuchung unterzogen werden sollten. Für diese sollte dann zur Entscheidungsvorbereitung ein konkreter Wirtschaftlichkeitsvergleich durchgeführt werden.

## Grundsätzliche Empfehlungen zur Sanierung von Heizungsanlagen

Neben der Wahl des Wärmeerzeugers sind einige grundlegende Empfehlungen zur Heizwärmeverteilung und Regelung von zentraler Bedeutung für die Zukunftsfähigkeit einer Heizungsanlage. Der Einfluss dieser Aspekte ist erheblich und kann in der Summe zu einem größeren Einfluss auf den Heizwärmeverbrauch und damit die Klimabilanz eines Gebäudes führen als die Wahl des Wärmeerzeugers.

- Der hydraulische Abgleich jeder Heizungsanlage ist eine zwingende Voraussetzung für einen effizienten Betrieb. Dabei wird sichergestellt, dass an jedem Heizkörper genau die für die Erwärmung des Raums auf Solltemperatur erforderliche Menge an Heizungswasser ankommt. So werden alle Räume gleichmäßig beheizt, der Pumpstromaufwand wird minimiert und die Rücklauftemperatur ist so niedrig wie möglich.
- Bei jeder sich bietenden Gelegenheit sollten Niedertemperaturheizflächen eingebaut werden, da so das Temperaturniveau des Heizmediums und damit die Verluste bei Erzeugung und Verteilung minimiert werden können. Gleichzeitig sollte die Trägheit möglichst gering sein (wenig Masse).
- Die Vorlauftemperatur von neuen Heizflächen sollte nach Möglichkeit unter 40°C liegen. Damit besteht langfristig größte Flexibilität hinsichtlich der Wärmeversorgung.
- Neue Heizungsanlagen sollten so knapp wie möglich dimensioniert werden, da Überdimensionierungen immer zu Ineffizienzen und unnötigen Kosten für Wärmeerzeuger führen.
- Neben einer angemessenen Raumtemperatur während der Nutzungszeit ist die Raumluftqualität ein weiteres, wichtiges Behaglichkeitskriterium. Die Notwendigkeit und Art der mechanischen Lüftung sollte insbesondere in Verwaltungsgebäuden kritisch hinterfragt werden. In Gebäuden mit hoher Belegungsdichte haben sich Lüftungsanlagen zur Sicherstellung angemessener Raumluftqualität bewährt. Lüftungsanlagen müssen bedarfsgerecht betrieben werden.
- Die Heizungsregelung soll sicherstellen, dass in jedem Raum während der erforderlichen Zeit die geforderte Raumtemperatur erreicht wird. Dazu ist neben den Thermostatventilen eine zentrale, gruppenweise Regelung einzusetzen, die die Vorlauftemperatur abhängig von der Außentemperatur und der Zeit verändert. Neben der Wochenregelung ist eine Jahresregelung vorzusehen.

- In zahlreichen kommunalen Liegenschaften kann auf eine Trinkwassererwärmung (TWW) vollständig verzichtet werden. Einzelne Warmwasser-Zapfstellen können mit dezentralen TWW-Systemen bedient werden. Eine zentrale oder semizentrale TWW-Erwärmung ist nur bei größerem Warmwasserbedarf beispielsweise in Sporthallen und für Küchen sinnvoll. Thermische Solaranlagen zur Trinkwarmwasserbereitung sind nur in Verbindung mit zentraler/semizentraler Trinkwarmwasserbereitung sinnvoll. Zudem sollte ein möglichst ganzjährig hoher Trinkwarmwasserbedarf vorhanden sein.

## Zusammenfassung und Empfehlungen

Die folgenden drei Tabellen zeigen die zusammengefassten Ergebnisse aller Gebäudety-  
pen hinsichtlich Wirtschaftlichkeit, Treibhausgasemissionen und Schadstoffemissionen.  
Die markierten Felder zeigen die für den jeweiligen Aspekt günstigste Variante, also in Ta-  
belle 3 die wirtschaftlichste, in Tabelle 4 die klimafreundlichste und in Tabelle 5 die schad-  
stoffärmste Variante. In Tabelle 6 wird die aus den obigen drei Einzelergebnissen abgelei-  
tete Empfehlung dargestellt.

Die Untersuchung von Wirtschaftlichkeit und Emissionen der neun Varianten zeigt ein  
grundsätzliches Dilemma auf, vor dem die Kommune bei der Entscheidung für ein neues  
Heizungssystem steht: in fünf der neun untersuchten Fälle ist die Referenzvariante Gas-  
brennwertkessel, wenn auch mit Biomethan, die wirtschaftlichste Variante, in keinem der  
Fälle ist dies jedoch die klimafreundlichste Lösung. Die Schadstoffemissionen aller Vari-  
anten sind jedoch sehr niedrig, sodass diese ein geringeres Gewicht bei der Entscheidung für  
eine Versorgungsvariante erhalten sollten.

Angesichts der klimapolitischen Selbstverpflichtung der Stadt Nürnberg verbietet sich eine  
rein betriebswirtschaftliche Optimierung. Will die Stadt die Bevölkerung und Unterneh-  
men zu Investitionen in klimafreundliche Wärmeversorgung animieren, ist es nicht glaub-  
würdig, wenn in städtischen Liegenschaften lediglich Standard-Anlagentechnik installiert  
wird.

**Tabelle 3: Betriebswirtschaftlich günstigste Varianten**

	Gas-BW	Pellet	BHKW	Gas- WP	L-WP	E-WP	TS
Schule Neubau		■	■	■		■	
Schule saniert	■		■	■			
Schule Bestand	■	■	■				
Halle Neubau			■			■	■
Halle saniert	■			■		■	■
Halle Bestand	■	■	■				
KiTa Neubau		■			■	■	
KiTa saniert	■					■	■
Kita Bestand	■	■		■			■

**Tabelle 4: Günstigste Varianten hinsichtlich Treibhausgas-Emissionen**

	Gas-BW	Pellet	BHKW	Gas-WP	L-WP	E-WP	TS
Schule Neubau		■	■	■		■	
Schule saniert	■		■	■			
Schule Bestand	■	■	■				
Halle Neubau			■			■	■
Halle saniert	■			■		■	■
Halle Bestand	■	■	■				
KiTa Neubau		■			■	■	
KiTa saniert	■					■	■
Kita Bestand	■	■		■			■

**Tabelle 5: Günstigste Varianten hinsichtlich Luftschadstoff-Emissionen**

	Gas-BW	Pellet	BHKW	Gas-WP	L-WP	E-WP	TS
Schule Neubau		■	■	■		■	
Schule saniert	■		■	■			
Schule Bestand	■	■	■				
Sporthalle Neubau			■			■	■
Sporthalle saniert	■			■		■	■
Sporthalle Bestand	■	■	■				
KiTa Neubau		■			■	■	
KiTa saniert	■					■	■
Kita Bestand	■	■		■			■

**Tabelle 6: In der Gesamtbetrachtung empfohlene Varianten**

	Gas-BW	Pellet	BHKW	Gas-WP	L-WP	E-WP	TS
Schule Neubau		■	■	■		■	
Schule saniert	■		■	■			
Schule Bestand	■	■	■				
Sporthalle Neubau			■			■	■
Sporthalle saniert	■			■		■	■
Sporthalle Bestand	■	■	■				
KiTa Neubau		■			■	■	■
KiTa saniert	■					■	■
Kita Bestand	■	■		■			■

Das BHKW ist bei Gebäuden mit ganzjährig hohem Wärmebedarf wie beispielsweise Schulen sinnvoll und empfehlenswert. Auch bei der neuen Sporthalle oder der Halle im Bestand ist das BHKW eine sinnvolle Option.

Elektro-Wärmepumpen erfordern niedrige Vorlauftemperaturen und sind daher bei etwas kleinerem Wärmebedarf bei sanierten Sporthallen und bei sanierten und neuen Kita's zu empfehlen, unterstützt durch eine thermische Solaranlage, sofern eine zentrale Warmwasserbereitung vorhanden ist. Je nach Förderbedingungen ist diese technische Empfehlung bei Neubauten jedoch nur schwer wirtschaftlich darstellbar. Bei der neuen Sporthalle ist die Elektrowärmepumpe nur wegen der fehlenden Förderung zweite Wahl. Hier sind projektbezogene Einzelfallbetrachtungen erforderlich.

Pelletssysteme sind für etwas größere, unsanierte Gebäude (also Schule und Turnhalle) zu empfehlen, da einfach hohe Vorlauftemperaturen erreicht werden können. Je nach Rahmenbedingungen im Gebäude ist alternativ die BHKW-Lösung zu empfehlen.

Der reine Gas-Brennwertkessel, auch mit Biomethanbeimischung, ist lediglich für die unsanierte Kita die sinnvollste Option.