

Wärmepumpenheizsysteme für Niedrigenergie-Häuser Komfort, Umweltbelastung und Wirtschaftlichkeit

Thomas Afjei
Informationsstelle für Elektrizitätsanwendung
CH-8021 Zürich

Zusammenfassung

Zukünftige Niedrigenergiehäuser erfordern neue Konzepte der Wärmeerzeugung. Zur Beurteilung der verschiedenen Varianten müssen Gebäude und Wärmeerzeugung als integrale Einheit aufgefasst werden, mit der die Zielgrössen Komfort, Ökologie und Ökonomie optimal zu erfüllen sind.

TRNSYS-Simulationen ergaben, dass beim passiv-solar optimierten Niedrigenergiehaus durch den Übergang von der Leicht- zur Massivbauweise eine 13%ige Reduktion des Heizenergiebedarfs erreicht werden kann. Bei einer Erdsondenwärmepumpe können Einsparungen im Stromverbrauch der Sondenpumpe die Nachteile einer laminaren Strömung in der Sonde kompensieren. Eine zweistufige Wärmepumpe erreicht zwar eine 18% höhere Jahresarbeitszahl, rechnet sich aber wegen der geringen Einsparung bei den Verbrauchskosten nicht. Als vorteilhaft erwies sich die Kombination einer Luft/Wasser-Wärmepumpe zum Heizen mit einer Abluft-Wärmepumpe zur Wassererwärmung. Durch die mechanische Wohnungslüftung kann der Komfort gesteigert werden.

Bei dem durch Bau und Betrieb der Heizungsanlage verursachten Treibhauseffekt schneiden Wärmepumpenheizungen besser ab, als Öl-, Gas- oder Elektrodirektheizungen. Würde in Zukunft der Wärmepumpenbetriebstrom ausschliesslich mit BHKW oder Kombikraftwerken (GuD) gedeckt werden, hätte dies gegenüber der Deckung aus dem schweizerischen Stromnetz eine Erhöhung des Treibhauseffekts zur Folge.

Resumé

Les maisons du futur à basse consommation d'énergie nécessitent de nouveaux concepts pour la production de chaleur. Pour juger les différentes variantes, il faut considérer le bâtiment et la production de la chaleur comme un tout avec pour but d'atteindre d'une façon optimale le confort, l'écologie et l'économie.

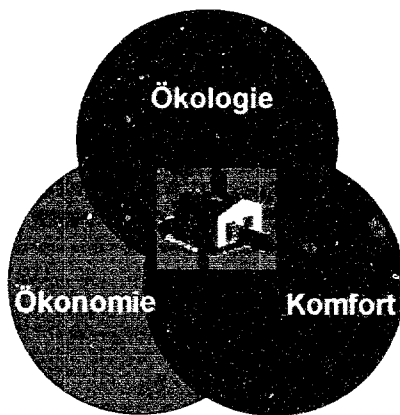
Les simulations TRNSYS ont montré qu'en optimisant une maison à basse consommation d'énergie de type solaire passif, une réduction de 13 % du besoin d'énergie de chauffage peut être obtenue en passant de la construction légère à la construction massive. Pour une pompe à chaleur couplée au sol, les économies de courant de la pompe de source de chaleur peuvent compenser les inconvénients d'un débit laminaire dans la sonde. Il est vrai qu'une pompe à chaleur à deux étages peut augmenter le chiffre de performance annuel de 18 %, mais n'est pas économique à cause des économies marginales. La combinaison d'une pompe à chaleur air/eau pour chauffer le bâtiment avec une pompe à chaleur à air évacué pour chauffer l'eau sanitaire s'est avérée avantageuse. La ventilation mécanique de l'appartement peut augmenter le confort.

En ce qui concerne l'effet de serre causé par la construction et l'exploitation de l'installation de chauffage, les pompes à chaleur sont avantagées par rapport aux chauffages à mazout, au gaz ou au courant électrique direct. Si, à l'avenir le courant pour les pompes à chaleur était couvert par des unités de cogénération ou des centrales électriques combinées (turbine à gaz et à vapeur) au lieu du réseau de courant suisse, une augmentation de l'effet de serre en serait la conséquence.

1 Ziel Projektes

Zukünftige Niedrigenergiehäuser mit einem Endenergieverbrauch¹ von weniger als 160 MJ/m²a stellen neue Anforderungen an die Wärmeerzeugung. Zum einen verringert sich die installierte Heizleistung auf weniger als die Hälfte, zum anderen steigt der Anteil für die Warmwasserbereitung auf 30-40%. Die europäischen Wärmeschutzverordnungen, wie der MINERGIE-Standard in der Schweiz [MINERGIE 98] oder die kommende Energiesparverordnung in Deutschland [ESV 2000] werden in wenigen Jahren diese Grenzwerte erreichen. Es ist daher wichtig, dass Architekten, Hersteller und Installateure auf diesen neuen Markt und dessen Erfordernisse vorbereitet sind.

In der Phase 2 des BFE-Projekts "Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe" werden in enger Zusammenarbeit mit der Industrie Funktionsmuster entwickelt und gemessen. Dabei kommen Anlagenkonzepte zum Einsatz, die sich während der Phase 1 am erfolgsversprechendsten erwiesen. Die Wärmepumpe wird ohne Pufferspeicher und Mischventile direkt am Wärmeverteilsystem, - einer Fussbodenheizung -, angeschlossen. Sie verfügt über eine Regelung, welche herstellereitig in die Wärmepumpe integriert ist und Störgrössen berücksichtigt, wie z.B. innere und äussere Wärmequellen oder EW-Sperrzeiten. Ein wichtiges Ziel ist, auch mit kleinen Aggregaten hohe Jahresarbeitszahlen zu erreichen.



Da im MINERGIE-Standard nur für die Endenergie konkrete Kennzahlen definiert sind, ist die Frage, wie die erforderliche Wärme am sinnvollsten erzeugt wird, noch nicht beantwortet. Hier setzt dieses Projekt an. Das Gebäude und die Wärmeerzeugung bilden eine integrale Einheit, um die Zielgrössen Komfort, Ökologie und Ökonomie optimal zu erfüllen (s. Abb. 1). Anders ausgedrückt, die Zielgrösse Komfort (oder Behaglichkeit) soll so umweltgerecht und kostengünstig wie möglich erreicht werden. Dabei sind die Kriterien Funktionalität, Umweltverträglichkeit, einfache und fehlertolerante Systeme, Energieeffizienz, Wirtschaftlichkeit und Fragen der Energiebereitstellung zu berücksichtigen.

Abb. 1: Gesamtheitliche Betrachtung von Gebäude und Wärmeerzeugung

Das Projekt soll aufzeigen, dass Heizanlagen, welche bezüglich Energieverbrauch und Umweltschutz höchste Anforderungen erfüllen, auch wirtschaftlich sind und kein Luxusgut darstellen.

2 Vorgehen

2.1 Projektorganisation (im Auftrag des Bundesamts für Energie)

Das Projekt gliedert sich in **4 Phasen**:

- I. **1/96-12/96**
Machbarkeitsanalyse, Problemanalyse und Vorbereitung zum Bau eines Funktionsmusters
- II. **4/97-3/98**
Ökologischer und ökonomischer Vergleich, Systemoptimierung, intelligente Regelung und Versuche mit Testanlagen
- III. **5/98-3/00**
Messungen von drei Pilotanlagen², Ausarbeitung der Anforderungen für MINERGIE-Wärmepumpen, Basisgrundlagen für ein Planungshandbuch
- IV. **9/98-6/00 (in Vorbereitung)**
Planungshandbuch für Niedrigenergie- und Passivhäuser
Marketinghandbuch in Zusammenarbeit mit Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz

¹ Endenergieverbrauch für Heizen und Warmwasser; Elektrizität wird doppelt gewichtet [MINERGIE 98]

² Mit Unterstützung der Schweizer Elektrizitätswirtschaft

Projektteam

- **INFEL, Informationstelle für Elektrizitätsanwendung**
Th. Afjei (Projektleitung), D. Wittwer (Wirtschaftlichkeit, Marktpotential)
- **Basler + Hofmann AG / E2000 Ökobau**
W. Hässig (Gebäudewahl)
- **Bircher + Keller AG**
R. Bircher, Hr. Tumsek (Bodenheizung)
- **Büro Doka**
G. Doka (Umweltbelastung)
- **ETH-Zürich / Institut für Mess- und Regeltechnik**
E. Shafai, S. Ginsburg (Intelligentes Regelmodul)
- **HTA Fachhochschule Zentralschweiz** (TRNSYS-Simulation, Messung d. Pilotanlagen 1+2)
G. Zweifel, W. Betschart, M. Wetter³, T. Giger, P. Keller
- **Huber Energietechnik**
A. Huber, O. Schuler⁴ (Erdsondenmodell)
- **Ingenieurschule Wallis EIV**
M. Bonvin (Messung d. Pilotanlage 3)

Das Projektteam wird von einer Begleitgruppe unterstützt.

3 Resultate

An der HTA Fachhochschule Zentralschweiz (ehemals Zentralschweizerisches Technikum Luzern) wurden mithilfe verschiedener Simulationen [TRNSYS 96] eine Systemoptimierung durchgeführt und folgende Varianten verglichen:

- **Gebäude** Grenzwert, Niedrigenergie (≡NOAH) und solar optimiert (≡MINERGIE)
- **Erdsonde** mit Wasser/Glykolgemisch und reinem Wasser
- **Wärmepumpe** ein- und zweistufig

Für die Systemoptimierung gelten die Hauptanforderungen *möglichst einfache Technik, kostengünstiges Bauen und Umweltverträglichkeit*. Abb. 2 gibt eine Übersicht der Optimierungsschritte.

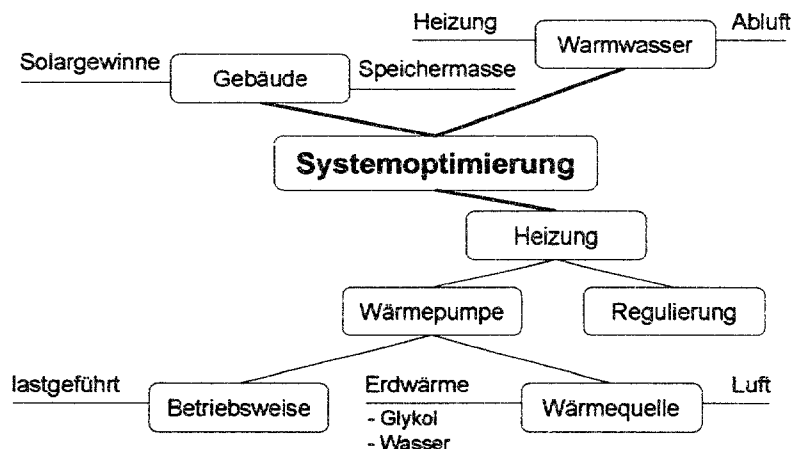


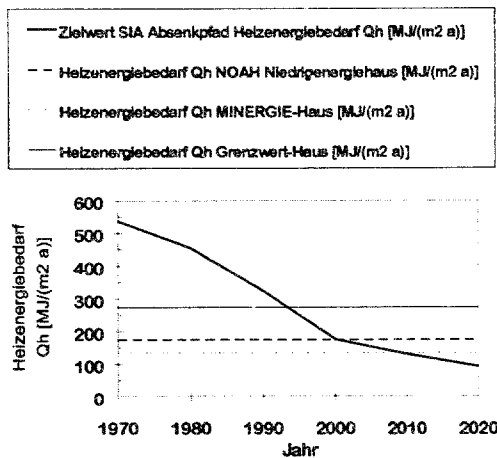
Abb. 2 : Systemoptimierung

³ seit 1.11.97 am Lawrence Berkeley National Laboratory, Simulation Research Group, Berkeley (CA), USA

⁴ seit 1.2.97 bei ABB, Corporate Research, Air Pollution Control, Baden-Dätwil, CH

3.1 Gebäude

Das NOAH-Gebäude der ersten Phase wurde zur Verbesserung der passiven Solarnutzung optimiert. Für die beiden Varianten *Leicht- und Massivbau mit vergrösserten Fensterflächen und Beschattungseinrichtung* (s. Abb. 3) wurden mit TRNSYS Simulationssrechnungen durchgeführt (s. Abb. 4 ff.)



MINERGIE-HAUS

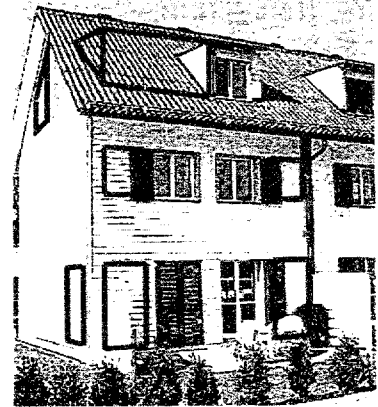


Abb. 3: Untersuchte Gebäude

Beim passiv-solar optimierten NOAH-Haus, hier bezeichnet mit "MINERGIE-Haus", wurde alleine mit der Massivbauweise eine 13%ige Reduktion des Heizenergiebedarfs erreicht (s. Abb. 4, links). Beim Leichtbau, und auch beim Massivbau mit stark vergrösserten Fensterflächen, muss zur Vermeidung von Überhitzung der Sonnenschutz so oft betätigt werden, dass keine Reduktion des Heizenergieverbrauchs erzielt wird. Die eingeschränkten passiven Sonnengewinne werden durch die erhöhten Wärmeverluste der grösseren Fenster kompensiert.

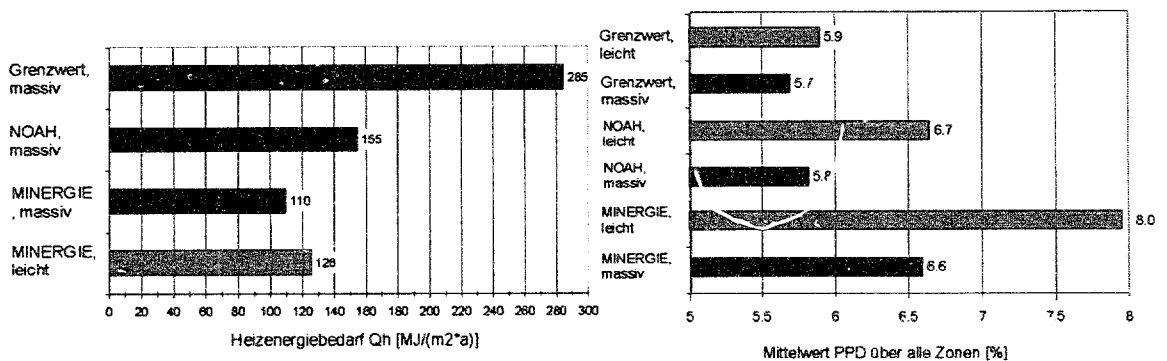


Abb. 4: Heizenergiebedarf für verschiedene Gebäudetypen (links) und Vergleich der mittleren PPD-Werte verschiedener Gebäude (rechts; Auswertung über ganze Heizperiode jeweils von 7.00-23.00 Uhr)

Ein ähnliches Verhalten zeigt sich auch beim Komfort, welcher nach der Methode von Olé Fanger [Fanger 1970] mit PPD-Werten (= percentage of persons dissatisfied) berechnet wurde (s. Abb. 4, rechts). Dabei wurde die operative Temperatur (kombinierte Strahlungs-Lufttemperatur) viertelstündlich berechnet und während der Nutzungszeiten in der Heizperiode ausgewertet.

3.2 Erdsonde

Für die Erdsonde wurde das im BFE-Forschungsprojekt "Berechnungsmodul für Erdwärmesonden" entwickelte Modell verwendet, welches die Fourier'sche Wärmeleitgleichung implizit mit Differenzengleichungen nach der Methode von Crank-Nicholson löst [Huber, Schuler 1997]. Abb. 5 zeigt einen Vergleich zwischen Simulation und Messung.

Bei der Optimierung des Sondenmassenstroms ergab sich, dass ein laminare Strömung in der Sonde nicht unbedingt von Nachteil ist, wie zum Teil postuliert wird. Zwar ist die mittlere Sondenaustrittstemperatur wegen des schlechteren Wärmeübergangs um ca. 1.5 K niedriger, aber die damit verbundene Verschlechterung des Wärmepumpen-COP wird durch die geringere Pumpenleistung kompensiert, welche mit der 3. Potenz der Geschwindigkeit abnimmt. Abb. 6 zeigt, dass unter den gegebenen Randbedingungen eine Temperaturdifferenz zwischen 3 und 5 K optimal ist, wenn man bei der Jahresarbeitszahl alle Hilfsenergien berücksichtigt.

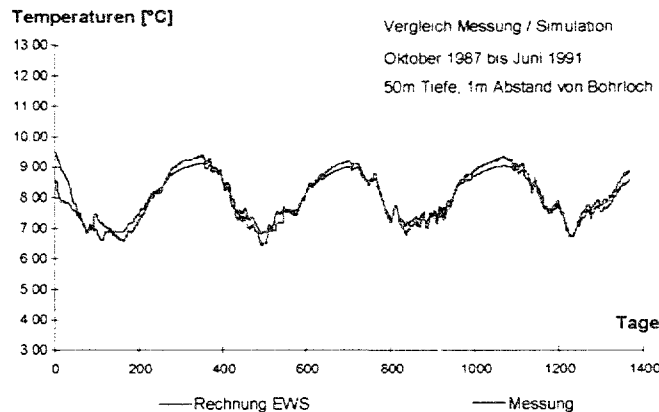


Abb. 5: Soleaustrittstemperatur, Vergleich zwischen Messung und Berechnung

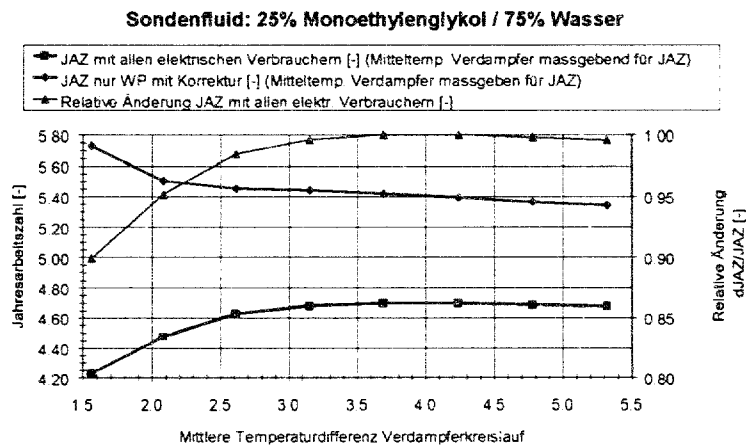
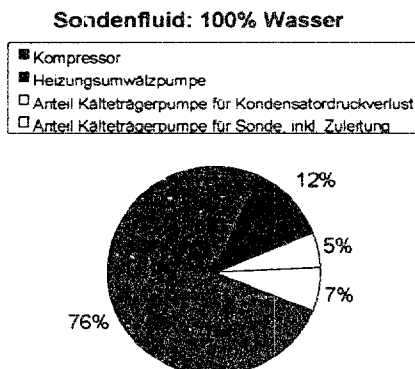


Abb. 6: Einfluss der Temperaturdifferenz des Verdampferkreislauf auf die Jahresarbeitszahl des Heizsystems im MINERGIE-Haus (Sondenlänge: 63 m, spez. Sondenbelastung 47 W/m, spez. Kälteenergie: 208 MJ/m)



Bei einem Sondenbetrieb mit reinem Wasser muss mit einem höheren Massenstrom gefahren werden, weil die minimale Verdampferaustrittstemperatur (= Sondereintrittstemperatur) nicht unter 2°C liegen sollte, da sich sonst an schlecht umströmten Stellen im Verdampfer Eis bilden kann. Bei einer Sondenlänge von 100 m (spez. Sondenbelastung: 36.5 W/m), einer Wärmeleitfähigkeit des Erdreiches von 3.0 W/(m·K) und einer mittleren Temperaturdifferenz über den Verdampfer von 1.9 K teilt sich der Elektrizitätsverbrauch für die Raumheizung wie folgt auf (s. Abb. 7).

Abb. 7: Aufteilung des Stromverbrauchs bei einer Wasser/Wasser-Wärmepumpe im MINERGIE-Haus

3.3 Zweistufige Wärmepumpe

Eine zweistufige Wärmepumpe mit einem Regelbereich 1 zu 1.7 (29 / 50 Hz) erzielt eine 18% höhere Jahresarbeitszahl (4.0 statt 3.4, ohne Umwälzpumpe). Hauptursache ist die höhere Leitungsziffer (COP) im Arbeitsbereich der 1. Stufe, weil dort die Temperaturdifferenzen in den Wärmetauschern geringer sind, als in der einstufigen Wärmepumpe. Die knapp 10% tiefere Schalthäufigkeit (390 statt 425) trägt auch zur Erhöhung der Jahresarbeitszahl bei. Nachteilig ist die kurze Umschaltung der Wärmepumpe auf die 2. Stufe nach Ende der EW-Sperrzeit (s. Abb. 8). Hier wären noch Verbesserungen in der Regelung möglich.

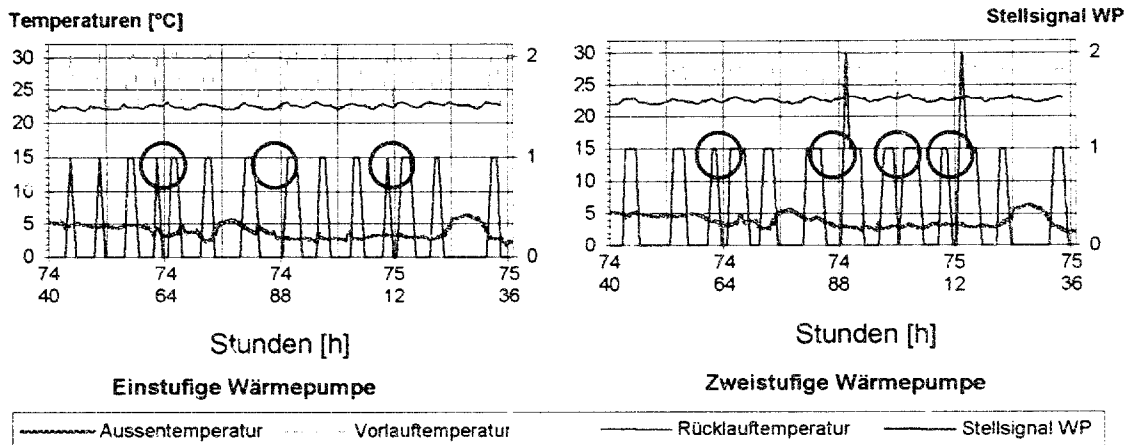
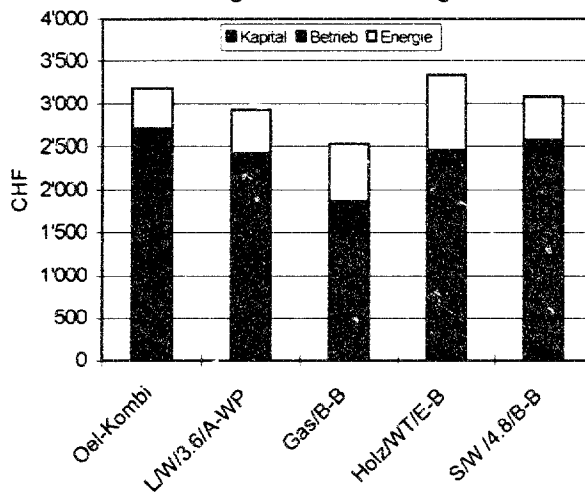


Abb. 8: Verlauf der Aussen-, Vorlauf- und Rücklaftemperatur sowie des Stellsignals der Wärmepumpe während einer charakteristischen Periode

Rein wirtschaftlich betrachtet ist die Zusatzinvestition für eine zweistufige Wärmepumpe bei Einsparungen von ca. CHF 30.- p.a. nicht rechtfertigt.

3.4 Wirtschaftlichkeit

Beim Wirtschaftlichkeitsvergleich hat die Ölheizung im Niedrigenergiehaus-Neubau keine Kostenvorteile mehr, da deren Kapital- und Betriebskosten nicht proportional zum Wärmebedarf sinken (s. Abb. 9). Günstige Kostenstrukturen weist die Gasheizung auf, vorausgesetzt, dass vom Gaslieferanten keine Anschlussgebühren verlangt werden. Beide Wärmepumpen-Varianten wiesen im Vergleich zur Ölheizung konkurrenzfähige Kosten auf. Die Luft/Wasser-Variante mit Abluft-Wärmepumpe zur Wassererwärmung bietet bei ähnlichen Jahreskosten allerdings mehr Wohnkomfort, da die mechanische Lüftung enthalten ist. Die zentrale Holzheizung mit Zu-/Abluft-System ergibt ca. 10% höhere Jahreskosten als die Wärmepumpen-Varianten, resp. 30 % höhere Kosten als die Gasheizung. Dieser Vergleich ist jedoch nicht ganz korrekt, da bei der Gasheizung die Wohnungslüftung mit Wärmerückgewinnung fehlt. Andererseits dürfte das Fehlen einer Wärmeverteilung bei der Holzheizung zu Nachteilen beim Wohnkomfort führen.



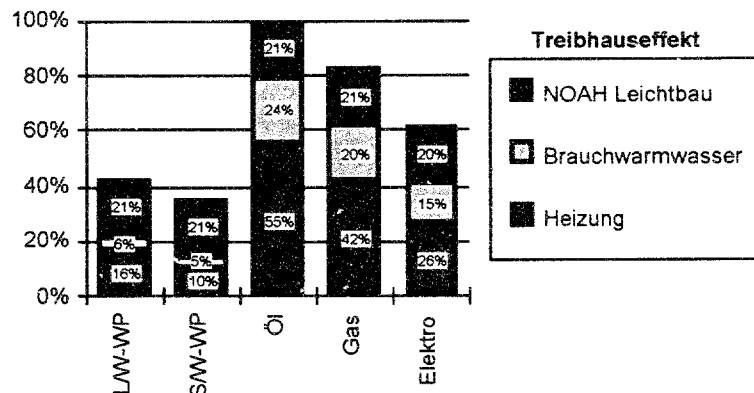
Die Luft/Wasser-Variante mit Abluft-Wärmepumpe zur Wassererwärmung bietet bei ähnlichen Jahreskosten allerdings mehr Wohnkomfort, da die mechanische Lüftung enthalten ist. Die zentrale Holzheizung mit Zu-/Abluft-System ergibt ca. 10% höhere Jahreskosten als die Wärmepumpen-Varianten, resp. 30 % höhere Kosten als die Gasheizung. Dieser Vergleich ist jedoch nicht ganz korrekt, da bei der Gasheizung die Wohnungslüftung mit Wärmerückgewinnung fehlt. Andererseits dürfte das Fehlen einer Wärmeverteilung bei der Holzheizung zu Nachteilen beim Wohnkomfort führen.

Abb. 9: Jahreskosten verschiedener Heizsysteme im Niedrigenergie-Neubau

Insgesamt hat in der Schweiz und auch in den anderen europäischen Staaten der Einfamilienhaus-Neubau das grösste Marktpotential für die Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe. Die Gasheizung ist in Gebieten mit Gasanschluss eine sehr gute Alternative.

3.5 Umweltbelastung

In der der Ökobilanzierung wurden neun Wirkkategorien berechnet (Treibhauseffekt, Ozonzerstörung, Sommersmog, Versauerung, Überdüngung, Schwermetalle, Karzinogene, Wintersmog, Radioaktivität). Als Exempel wird im folgenden der Treibhauseffekt für den NOAH-Leichtbau mit verschiedenen Heizsystemen präsentiert. Darin ist die jährlichen Belastung für die gesamte Wärmebereitstellung (Raumwärme und Brauchwarmwasser) und die Gebäudeinfrastruktur enthalten.



Legende

- LW-WP** Luft/Wasser-WP mit separater WW-WP^{*}
- SW-WP** Sole/Wasser-WP mit BWW-Beistellboiler^{*}
- Öl** Ölheizung mit BWW ab Kessel/elektrisch
- Gas** Gasheizung mit BWW ab Durchlauferhitzer
- Elektro** Elektroheizung mit BWW ab Elektroboiler^{*}

^{*} Stromerzeugung mit Ø CH Import

Abb. 10: NOAH Leichtbau: Treibhauseffekt durch Heizung, Brauchwarmwasser und Gebäude für den NOAH Leichtbau mit verschiedenen Wärmeerzeugungs-Varianten (Aussagegenauigkeit ca. $\pm 35\%$)

Folgende Systeme werden für die Stromerzeugung verglichen:

Ø CH: Durchschnittl. Strommix für die Schweiz. Reine Inlandproduktion mit der Annahme, dass alle Importe aus dem Ausland Transitgeschäfte sind, die nicht in der Schweiz benötigt werden.

Ø CH Import: Durchschnittl. Strommix für die Schweiz. Inlandproduktion plus Gesamtheit der Importe aus dem Ausland. Der Anteil der Transitgeschäfte an den Importen beträgt also 0%. Die Bilanzen in dieser Studie wurden mit diesem Strommix berechnet.

Da der genaue Anteil Transitgeschäfte an den Importen nicht genau bekannt ist, kann lediglich ausgesagt werden, dass für eine Betrachtung des gegenwärtigen Strommixes für die Schweiz die Realität zwischen den Varianten "Ø CH" und "Ø CH Import" liegt.

Die anderen zwei Stromvarianten entsprechen einer Marginalbetrachtung. Als Stromlieferanten werden einige der Wachstumstechnologien bilanziert, die bei einem Ausbau der Kraftwerksleistung heute eingesetzt werden.

Δ GuD: Der Strom für die WP stammt aus einer gasbetriebenen Gas- und Dampfturbine.

Δ BHKW: Der Strom für die WP stammt aus einem gasbetriebenen Blockheizkraftwerk. Die Wärme aus dem BHKW wird anstelle eines Teils der Wärmepumpenwärme bilanziert. Die Variante entspricht daher nicht einer reinen Stromsensitivität, sondern einem unterschiedlichen Heizsystem welches Wärme aus dem BHKW und der Wärmepumpe entspricht (BHKW-WP-Kombination).

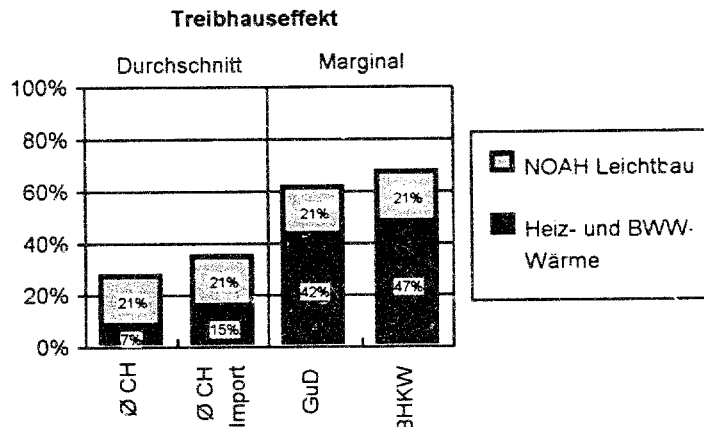


Abb. 11: Stromsensitivität: Treibhauseffekt durch SW-WP, Beistellboiler und NOAH Leichtbau mit verschiedenen Strombereitstellungs-Varianten (Aussagegenauigkeit ca. $\pm 35\%$)

Die Bilanzen mit den beiden marginalen Stromvarianten weisen ein ähnliches Ökopprofil auf, da bei beiden Erdgas die Hauptenergiequelle ist. Die GuD-Variante schneidet nur beim Treibhauseffekt leicht besser als die BHKW-Variante ab. Beide "Gas-Varianten" sind in den Effekten Radioaktivität und Karzinogene besser als die durchschnittliche "Standard"-Variante "Ø CH Import". Bei den Kategorien Treibhauseffekt, Überdüngung und Sommersmog sind sie schlechter.

4. Literaturverzeichnis

- | | |
|-----------------------|---|
| [ESU 1995] | T. Weibel, A. Stritz, "Ökoinventare und Wirkungsbilanzen von Baumaterialien", Gruppe Energie-Stoffe-Umwelt (ESU), ETH Zürich, 9/95, CH. |
| ENET-Nr. unbekannt | |
| [ESV 2000] | Die Grundlagen zur Energiesparverordnung, CCI 8/1997, D. |
| [Fanger 1970] | P.O. Fanger; Thermal Comfort, Analysis and Applications in Environmental Engineering; Technical University of Denmark, Copenhagen; 1970; Lyngby |
| [Huber, Schuler 1997] | Huber Arthur, Schuler Othmar; Berechnungsmodul für Erdwärmesonden; Forschungsprogramm Umgebungs- und Abwärme, Wärme-Kraft-Kopplung (UAW); Bundesamt für Energiewirtschaft; Bern, CH. |
| ENET-Nr. 9658807 | |
| [MINERGIE 98] | Broschüre, AWEL, Weinbergstrasse 15/17, 8090 Zürich, 1998, CH. |
| [NTH1_SB 96] | Th. Afjei, W. Betschart, R. Bircher, H.P. Geering, S. Ginsburg, W. Hässig, M. Wetter, D. Wittwer, G. Zweifel: Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe, Phase 1, Schlussbericht, BFE, 1996, CH. |
| ENET-Nr. 9655701 | |
| [NTH2_JB 97] | Th. Afjei: Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe, Phase 2, Jahresbericht, Bundesamt für Energie, 1997, CH. |
| ENET-Nr. unbekannt | |
| [TRNSYS 96] | TRNSYS 14.2; University of Wisconsin, Madison WI, Solar Energy Laboratory; 1996, USA. |

Bezugsquelle für Berichte mit ENET-Nummer

ENET, Administration und Versand, Postfach 130, CH-3000 Bern 16, Schweiz
Tel +41-(0)31-350-0005 Fax +41-(0)31-352-7756.

Internetadressen

- MINERGIE-Standard: <http://www.minergie.ch>
- NTH-Projekt: http://www.infel.ch/html/innova/in_nth1.htm

