

PAUL SCHERRER INSTITUT



**Dr. Tom Kober, Mashaël Yazdanie, Dr. Martin Densing**  
**Gruppe Energieökonomie, Labor für Energiesystemanalysen**

# Energiedrehscheibe Basel: Langfristuntersuchungen der zukünftigen Basler Energielandschaft basierend auf einem ökonomischen Optimierungsmodell

**novatlantis Bauforum, 21. Juni 2017, Basel**

Über 50% der Weltbevölkerung wohnt in Stadtgebieten, mit einem Beitrag von **70% der weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem Energiesektor**

Ca. 70% der Weltbevölkerung in 2050 wird in Städten wohnen

- Städten kommt eine besondere Bedeutung bei der Emissions- und Energieverbrauchsminderung zu
- Lokale Energiesystemplanung und lokale energiepolitische Maßnahmen können dies unterstützen

- Basel ist eine der führenden Städte der Schweiz im Bereich nachhaltiger Stadtplanung
  - Einziges Mitglied in *C40 Cities Climate Leadership Group*
  - Mitglied des *Compact of Mayors* der Vereinten Nationen und des *ICLEI Local Governments for Sustainability*
  - Ambitionierte Ziele zur langfristigen CO<sub>2</sub>-Emissionsminderung



- Drittgrößte Stadt der Schweiz mit 195 000 Einwohnern
- Zweitgrößter Energiekonsument (bzgl. Wärme- und Stromverbrauch)
- Stadtzone mit größter Warenausfuhr
- Großer Chemie- und Pharmaindustriesektor
- Gasverteilsnetz und Fernwärme
- 6 Gas-, Holz- und Abfallverbrennungskraftwerke für Fernwärme (WKK, Heizkessel und ARA)



Untersuchung langfristiger, kostenoptimaler Energiebereitstellungspfade für die Stadt Basel unter Berücksichtigung mehrerer Energiepolitik-Szenarien des Bundes, mit Schwerpunkt auf dezentrale Erzeugungs- und Speichertechnologien (DGST) zur Deckung der Wärme- und Stromnachfrage der Haushalte sowie der Dienstleistungs- und Industriesektoren.

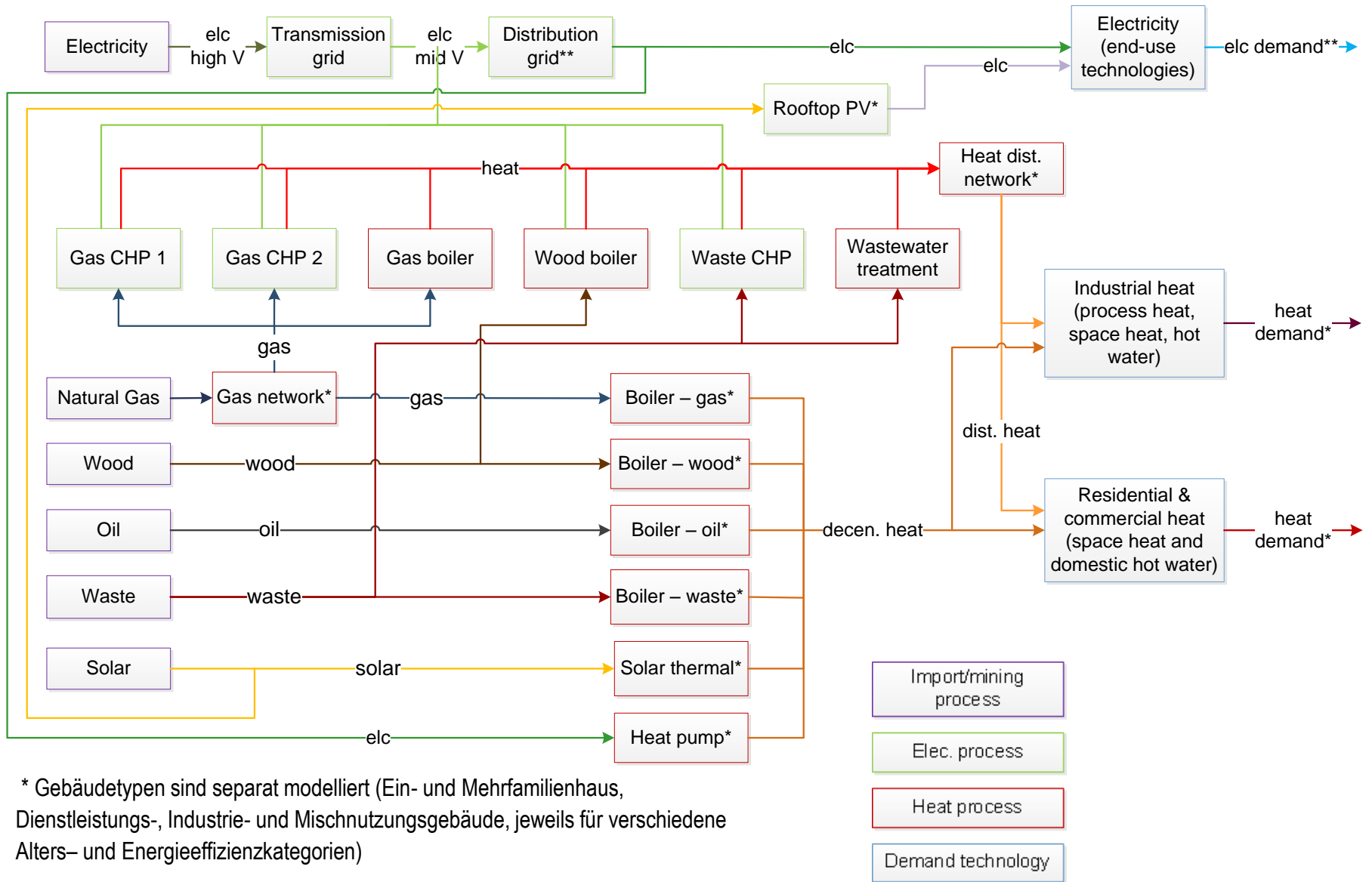


## TIMES Energiemodell (Loulou et al., 2005)

- Tool zur Modellierung kostenoptimaler Versorgungsstrukturen, ermöglicht Optimierung sowohl von Kapazitätsplanung als auch der Einsatzfahrpläne der einzelnen Technologien
- Detailliertes (“bottom-up”) techno-ökonomisches Energiesystem-Modell
- Auswahlmöglichkeit verschiedener Energieumwandlungs- und Speichertechnologien, Abbildung verschiedener Verbrauchssektoren
- Möglichkeit zur Szenario-Analyse unter Berücksichtigung von Unsicherheiten im Energiesystem (z.B. zukünftige Kosten)
- Zeithorizont im Modell: 2010-2050
- Zeitliche Auflösung: Stundenprofile eines gemittelten Werktages und eines Wochenendtages, separat für vier Jahreszeiten

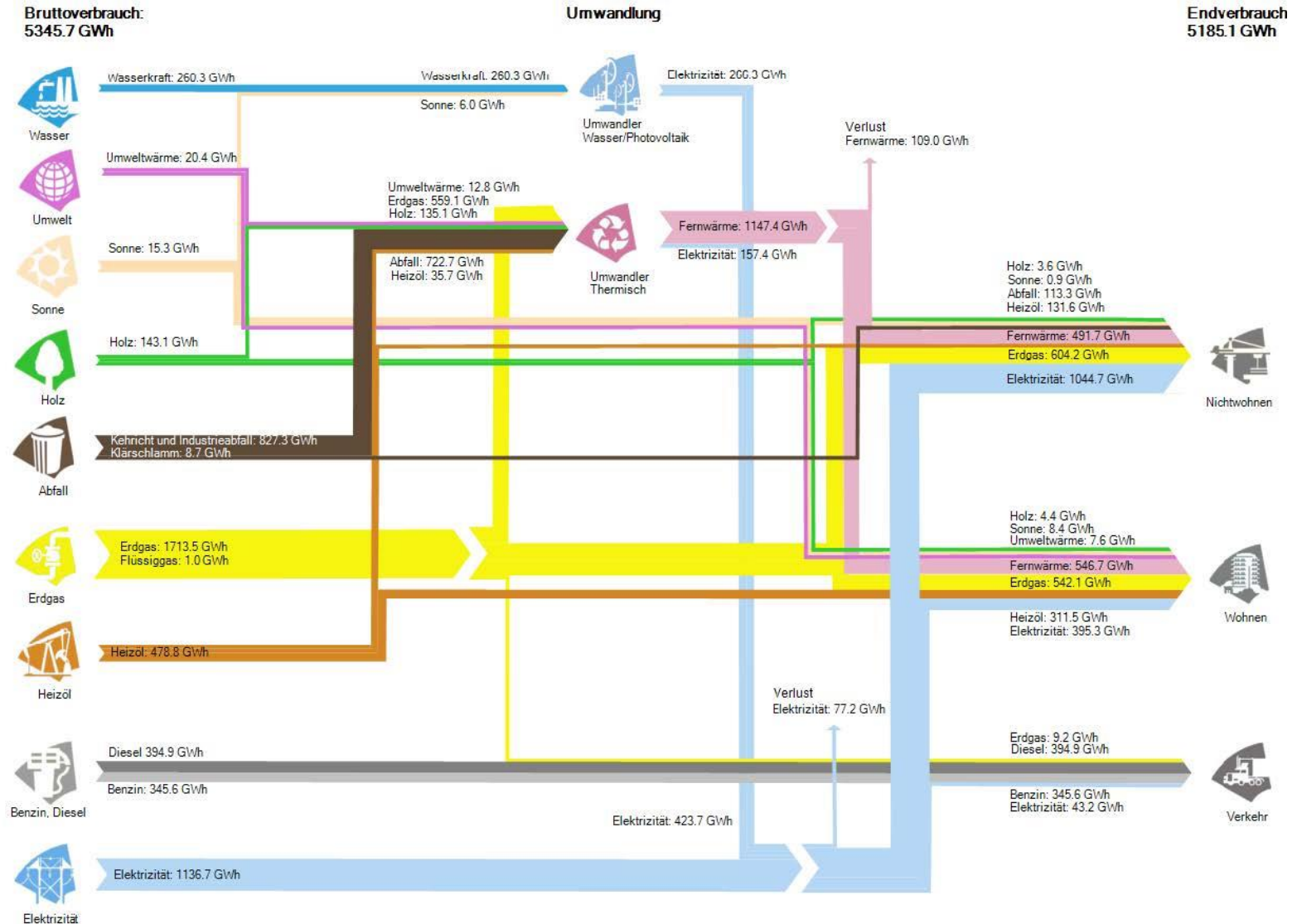
	Erzeugung	Speicher	Technologieparameter (Modellinput)
<b>Strom</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Übertragungsnetz</li> <li>• Dach-Solarzellen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Batterien</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kosten (Investition, feste und variable Betriebs- &amp; Wartungskosten, Rückbau)</li> <li>• Wirkungsgrade</li> <li>• Kapazitätsfaktoren</li> <li>• Installierte Kapazitäten (bereits getätigte Investitionen, und heutiger Bestand)</li> <li>• Lebensdauer, Bauzeit</li> </ul>
<b>Wärme/ WKK</b>	<p>Gebäudebereich:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kesselheizung (befeuert mit Gas, Öl, (Bio-)Abfall oder Holz)</li> <li>• Wärmepumpen</li> <li>• Sonnenkollektoren</li> <li>• Gebäude-WKK-Anlagen (Gas, Holz, H<sub>2</sub> Brennstoffzelle)</li> </ul> <p>Fernwärme:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• WKK (Gas, Öl, (Bio-)Abfall oder Holz)</li> <li>• Kesselheizung (Gas, Öl, (Bio-)Abfall oder Holz)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Saisonaler Wärmespeicher (Fernwärme)</li> <li>• Tag/Nacht-Wärmespeicher</li> <li>• H<sub>2</sub> Speicher</li> </ul>	

# Energiesystem-Modell für Basel (im Basisjahr)





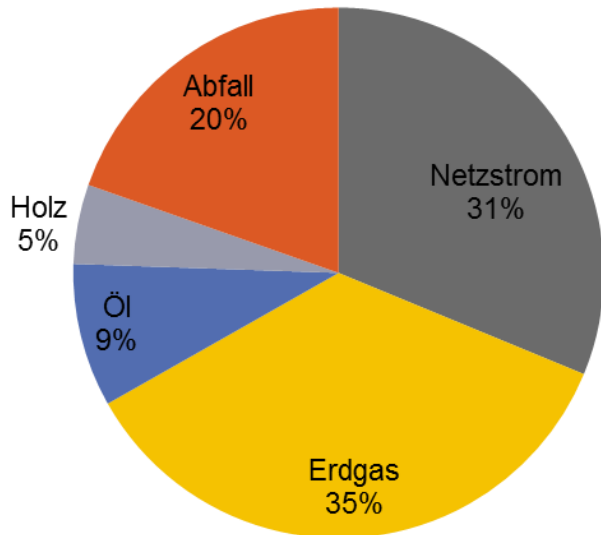
## Energieflussdiagramm des Kantons Basel-Stadt 2012



Quelle: Statistisches Amt der Stadt Basel (2012)

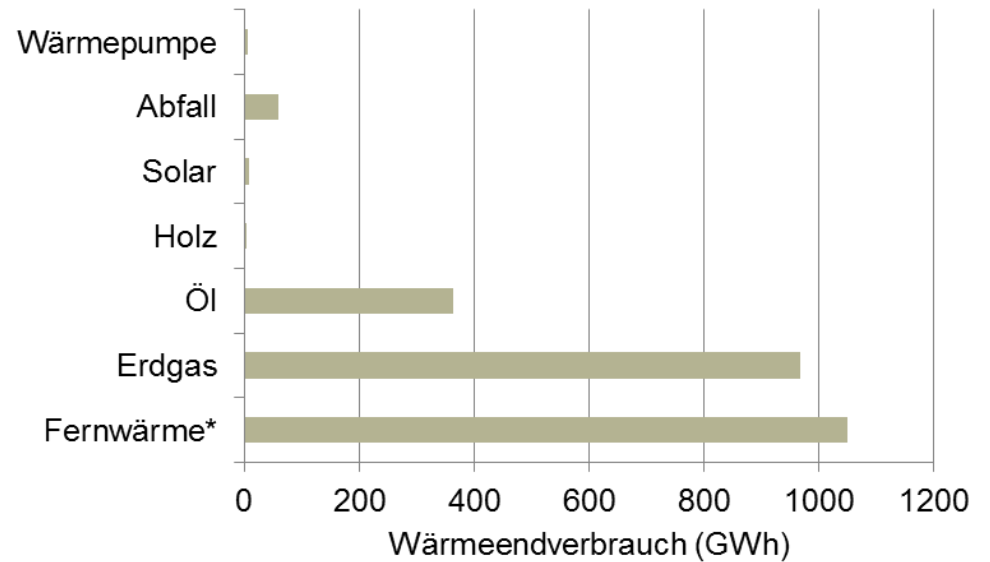
# Energieverbrauch (im Basisjahr)

**Energieverbrauch für Wärme und Strom nach Energieträger  
(im Wohnungs-, Dienstleistungs- und Industriesektor)**



Gesamt: 5.2 TWh

**Wärmeverbrauch nach Technologie/Energieträger:**



\*Gas, waste and wood-fueled heat and CHP plants

Datenquelle: Industrielle Werke Basel (2013), Bundesamt für Statistik (2015), Statistisches Amt der Stadt Basel (2012), Berger et al. (2011), Aksoezen et al. (2014)

# Szenarien des Bundes

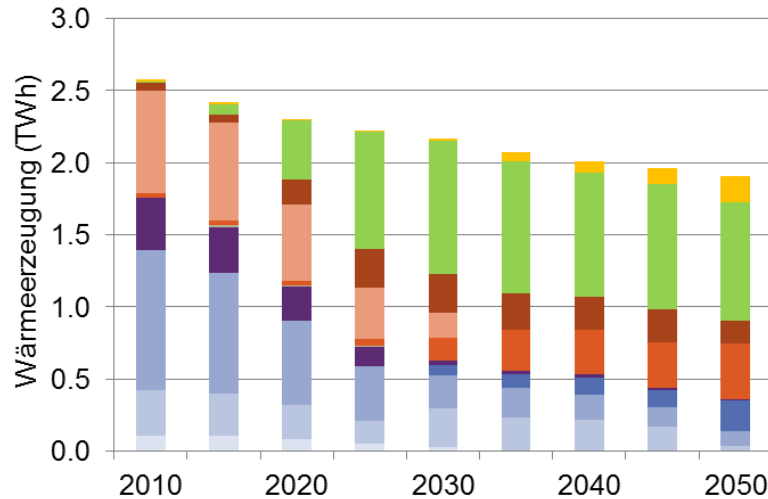
- Untersuchung verschiedener Szenarien der Energiepolitik des Bundes gemäß den *Energieperspektiven für die Schweiz bis 2050*:
  - Referenzszenario: Weiter-Wie-Bisher (REF)
  - PolitikszENARIO: Neue Energiepolitik (NEP)
- Exogene Hauptparameter des Modells, die durch die Politikmaßnahmen des Bundes bestimmt werden:

	Referenzszenario (REF)	Neue Energiepolitik (NEP)
<b>CO<sub>2</sub>-Preis (vereinfacht für alle fossilen Energieträger)</b>	• Tief (60 CHF/t-CO <sub>2</sub> in 2050)	• Hoch (140 CHF/t-CO <sub>2</sub> in 2050)
<b>Gebäuderenovierung</b>	• Tiefes Potential	• Hohes Potential
<b>Geräteverbrauch (z.B. Licht, Waschmaschine/Trockner, etc.)</b>	• Geringe Steigerung des Wirkungsgrads bis 2050	• Große Steigerung des Wirkungsgrads bis 2050
<b>Kosten für externen Netzstrom</b>	• Tiefe Gesamtkosten (Erzeugung + T&D)	• Hohe Gesamtkosten (Erzeugung + T&D) <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Gesamtstromkosten sind abhängig von Szenarioannahmen; in den vorgestellten Szenarien werden die relativ hohen Übertragungsnetzkosten des NEP Szenarios des Bundes verwendet.



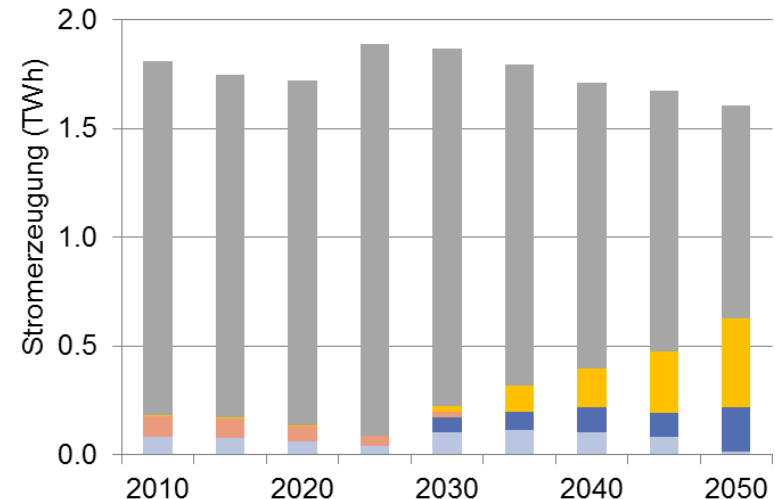
## Wärmeerzeugung



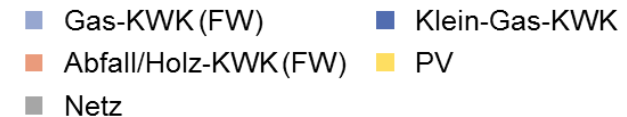
### Wärmeerzeugungstechnologien



## Stromerzeugung

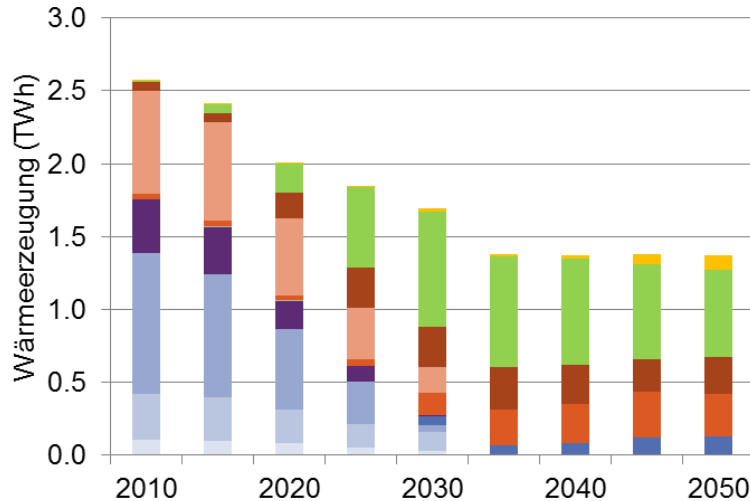


### Elektrizitätserzeugungstechnologien

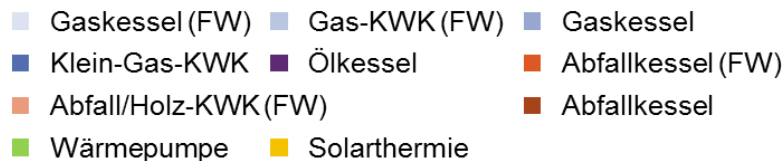


- Wärmeerzeugung hauptsächlich durch Wärmepumpen und die Verbrennung von Abfall und Gas
- Solaranlagen tragen in 2050 ca. 25% zur Stromerzeugung bei
- Strombezug von anderen Regionen in 2050 um 40% ggü. 2010 vermindert
- Ausnutzung des erlaubten Renovationspotentials und des Gebrauchs energieeffizienter Endgeräte

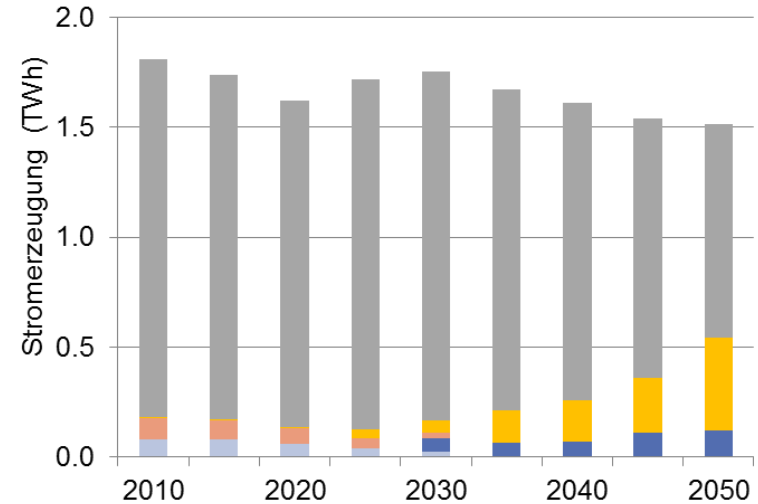
## Wärmeerzeugung



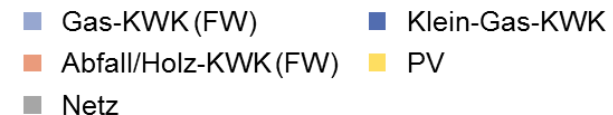
Wärmeerzeugungstechnologien



## Stromerzeugung

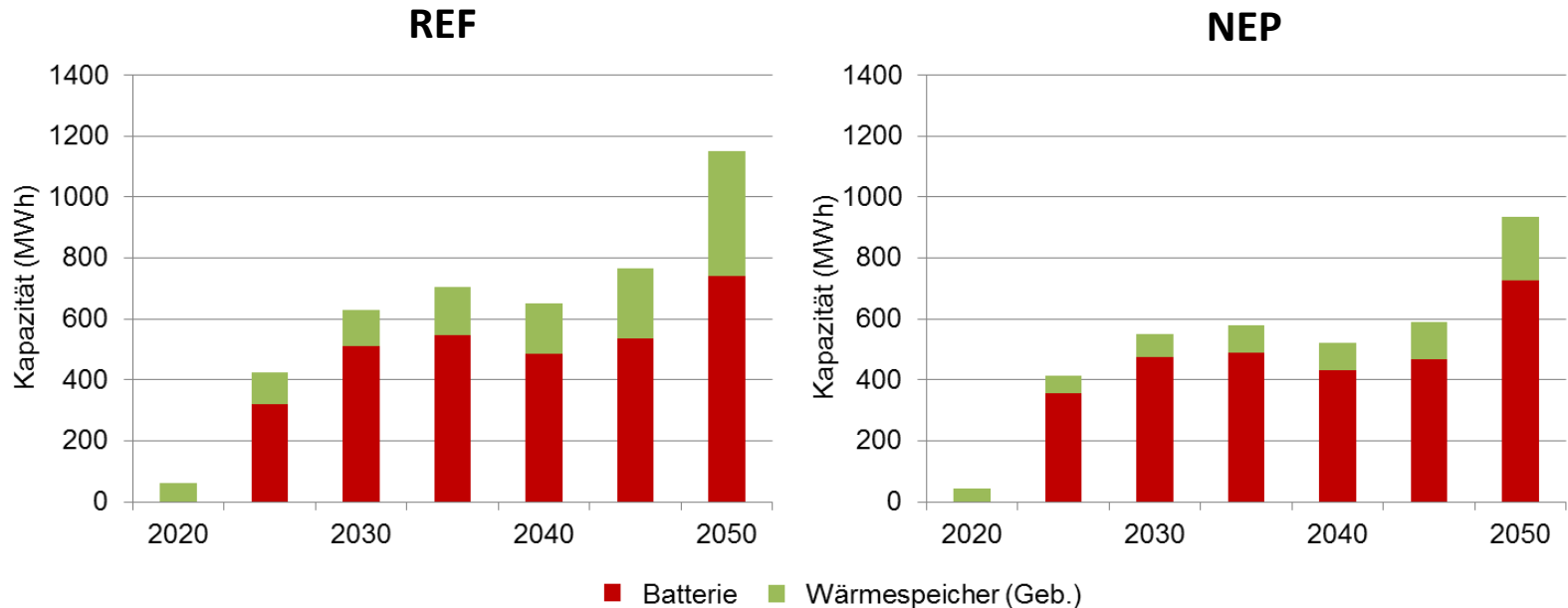


Elektrizitätserzeugungstechnologien



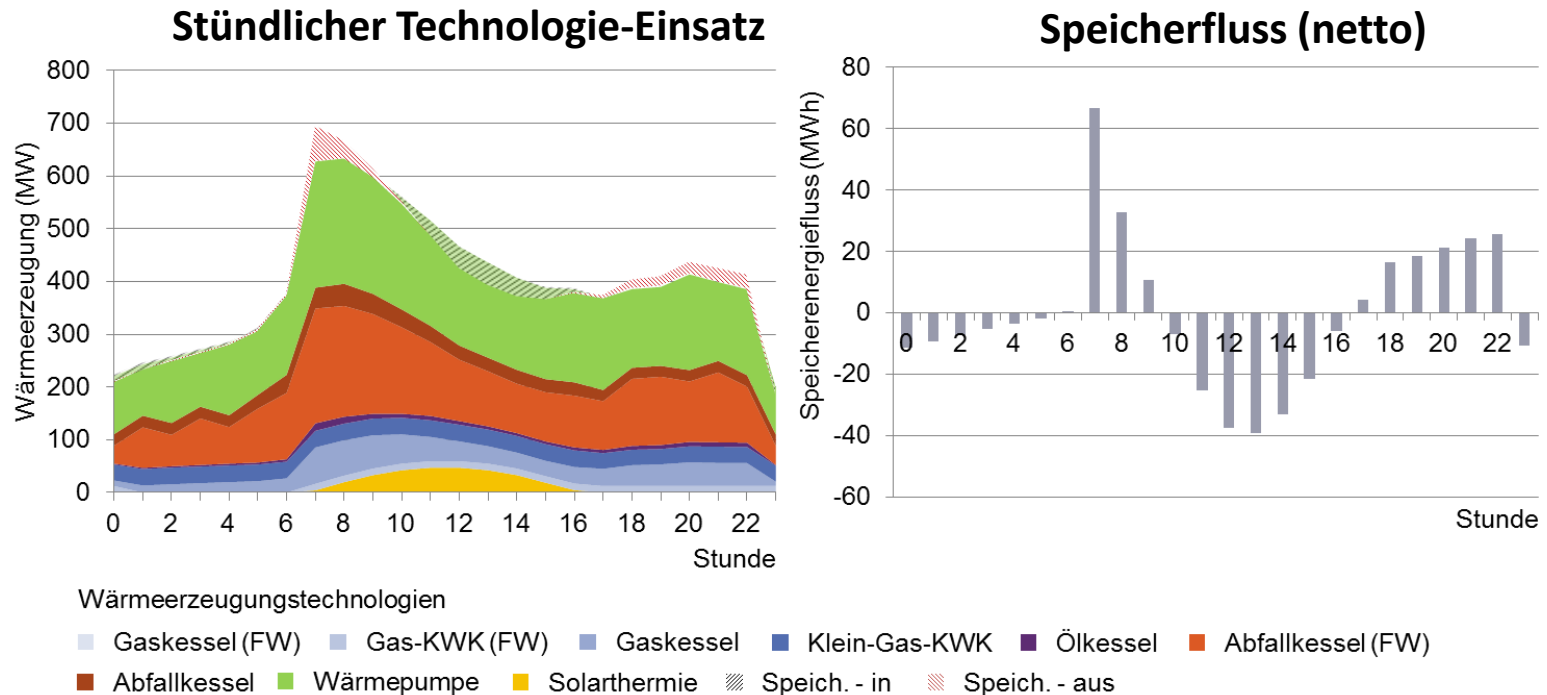
- Ausgenutzte Renovationspotentiale höher als im REF Szenario
- Wärmebedarf in 2035 wird fast vollständig durch Wärmepumpen und Abfallverbrennung gedeckt
- Solaranlagen tragen in 2050 ca. 30% zur Stromerzeugung bei
- Stromimporte in 2050 sind um 40% vermindert relativ zum Jahr 2010

# Investitionen in Speicher



- Großteil der Investitionen in Speicher erfolgt in Batterien im Gebäudebereich
  - 40% in Industriebauten, ca. 20% in Wohnungs-, Dienstleistungs-, und Mischnutzungsgebäuden
- Batteriekapazität im Jahr 2050 entspricht  $\sim 15\%$  des Strombedarfs eines Werktages im Winter
- Kapazität der Wärmespeicher im Jahr 2050 entspricht  $\sim 5\%$  des Wärmebedarfs eines Werktages im Winter

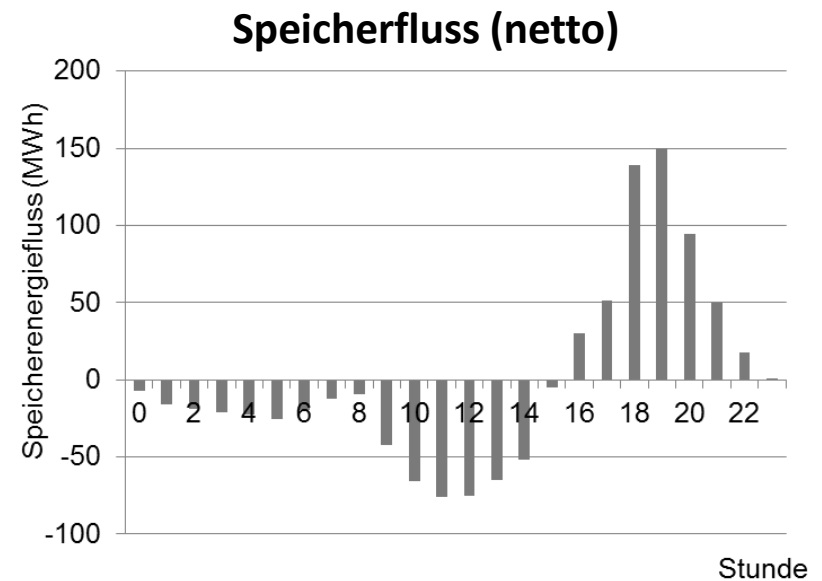
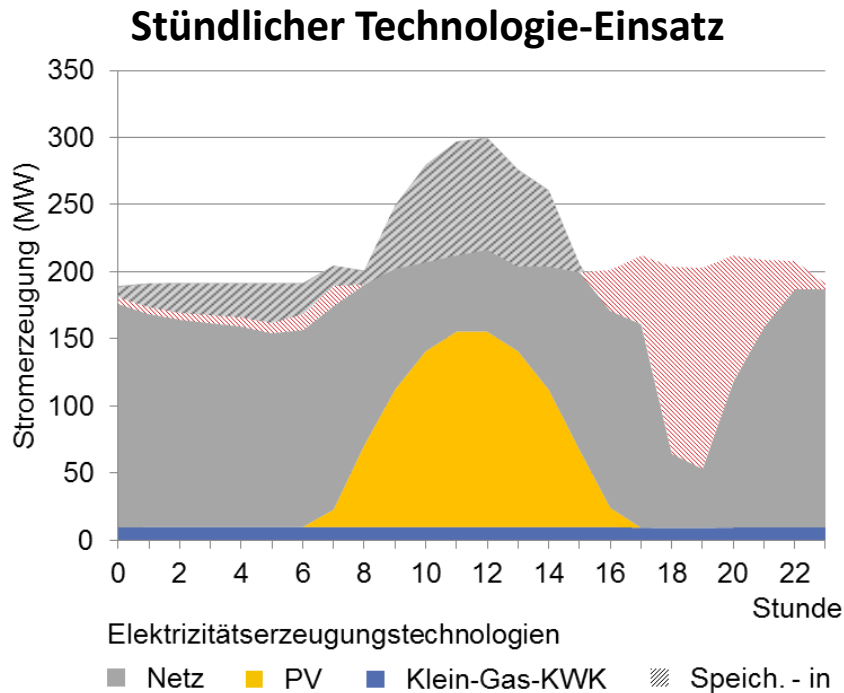
# Wärmeeinsatz-Stundenplan - Winterwerktag 2050 (REF Szenario)



- Wärmespeicherung ermöglicht:
  - Minderung von Lastspitzen
  - Erhöhter Einsatz von Sonnenkollektoren
- Speicherung der Wärme am Tag (u.a. von Sonnenkollektoren), Wärmerückgabe morgens und abends bei Lastspitzen

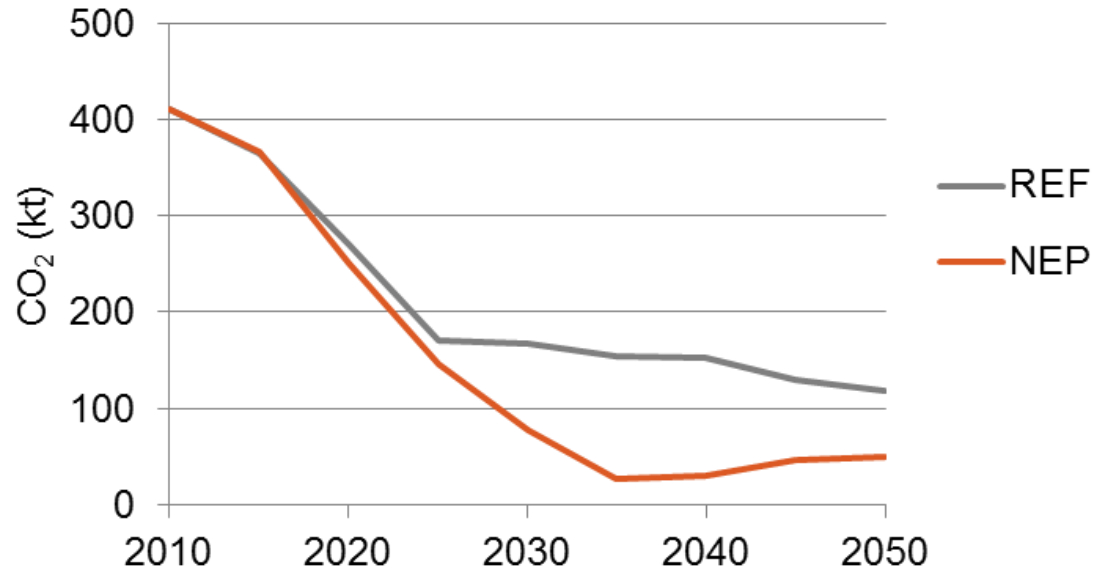


# Stromeinsatz-Stundenplan - Winterwerktag 2050 (Szenario NEP)



- Speicherung des Stroms (u.a. aus Solaranlagen) tagsüber, und nachts während tiefer Strompreise aus dem externen Netz
- Abends Rückgabe des Stroms während Spitzenlaststunden

# Lokale CO<sub>2</sub>-Emissionen in den Szenarien



- Def. CO<sub>2</sub>-Emissionen: Lokale fossile Energieträger (Gas und Heizöl), nur Verbrennungsemissionen
- Basel hat ambitionierte Langfristminderungsziele für Treibhausgase (*compact of mayors*)
- Emissionen im NEP-Szenario um ca. 90% vermindert in 2050 relativ zu 2010; zum Vergleich, Emissionen in REF sind um 70% vermindert
- Emissionsminderung ist sensitiv ggü. CO<sub>2</sub>-Preisen und ggü. den verfügbaren Renovierungspotentialen

# Hauptergebnisse

- Dezentrale Erzeugungs- und Speichertechnologien und lokale Ressourcen können wesentlich zu einem kostenoptimalen zukünftigen Energiesystem in Basel beitragen, dies unter allen betrachteten Energiepolitikmassnahmen des Bundes
  - Solaranlagen können in 2050 bis zu 30% des jährlichen Strombedarfs der Stadt decken
  - Der Wärmebedarf der Stadt in 2050 kann hauptsächlich mit Wärmepumpen und durch Abfallverbrennungsanlagen gedeckt werden
  - Zwei Faktoren sind entscheidend für eine wesentliche Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen und des Energieverbrauchs im Wärme- und Stromsektor:
    - Der Einsatz effizienter Endverbrauchsgeräte und Nutzung des Renovationspotentials (Gebäudeeffizienz)
    - CO<sub>2</sub>-Preis
- Die Ergebnisse sind hauptsächlich sensitiv auf Netzstrom- und Gaspreisfluktuationen (vor allem im REF-Szenario)
- Investitionen in Solaranlagen sind hauptsächlich sensitiv auf zukünftige Batterie- und Solarzellenkosten
- Batteriespeicher und dezentrale Erzeugung bieten Absicherung gegen volatile Strompreise

# Vielen Dank fürs Zuhören!

Besonderer Dank an:

- Novatlantis
- Industrielle Werke Basel
- Statistisches Amt Kanton Basel-Stadt
- Finanzierung: CCEM IDEAS4cities Projekt

Kontakt:

- [mashael.yazdanie@psi.ch](mailto:mashael.yazdanie@psi.ch)



Aksoezen, M., Daniel, M., Hassler, U., & Kohler, N. (2015). Building age as an indicator for energy consumption. *Energy & Buildings*, 87, 74–86. doi:10.1016/j.enbuild.2014.10.074

Basel Statistics Office. (2012). *City of Basel Energy Demand Statistics*. Basel

Berger, T., Genske, D., Hüsler, L., Jödecke, T., Menn, A., & Ruff, A. (2011). *Energetische Optimierung des Kantons Basel-Stadt*. Basel.

Brandes, D., Brändle, N., Maurer, C., Sydow, N., Vautier, C., 2009. Swiss Issues Sectors, Swiss Foreign Trade Facts and Trends. Zurich.

Bundesamt für Statistik. (2015). *Gebäude- und Wohnungsregister*. Bern

C40 Cities, 2017a. C40 Cities Climate Leadership Group [WWW Document]. URL <http://www.c40.org/> (accessed 12.14.16).

Cho, W. (2012). Marina Bay Singapore photo. Retrieved from <https://www.flickr.com/photos/adforce1/8193074594>

Compact of Mayors, 2016. Compact of Mayors [WWW Document]. URL <https://www.compactofmayors.org> (accessed 12.16.16).

Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Minx, J. C., Farahani, E., Kadner, S., & Seyboth, K. (2015). Climate Change 2014 Mitigation of Climate Change Summary for Policymakers and Technical Summary. Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415416>

ICLEI, 2017. ICLEI - Local Governments for Sustainability [WWW Document]. URL <http://www.iclei.org/> (accessed 12.16.16).

Industrielle Werke Basel. (2013). *Basel Supply Data Set*. Basel.

Kirchner, A., Bredow, D., Dining, F., Grebel, T., Hofer, P., Kemmler, A., Ley, A., Piegsa, A., Schütz, N., Strasbourg, S., Struwe, J., Keller, M., 2012. Die Energieperspektiven für die Schweiz bis 2050 [WWW Document]. URL [www.bfe.admin.ch/php/modules/publikationen/stream.php?extlang=de&name=de\\_564869151.pdf](http://www.bfe.admin.ch/php/modules/publikationen/stream.php?extlang=de&name=de_564869151.pdf) (accessed 4.22.16).

Loulou, R., Remme, U., Kanudia, A., Lehtila, A., Goldstein, G., 2016. Documentation for the TIMES Model [WWW Document]. URL [http://www.iea-etsap.org/docs/Documentation\\_for\\_the\\_TIMES\\_Model-Part-I\\_July-2016.pdf](http://www.iea-etsap.org/docs/Documentation_for_the_TIMES_Model-Part-I_July-2016.pdf) (accessed 12.16.16).

Panos, E., & Kannan, R. (2016). The role of domestic biomass in electricity, heat and grid balancing markets in Switzerland. *Energy*, 112, 1120–1138. <http://doi.org/10.1016/j.energy.2016.06.107>

Ramachandran, K., Turton, H., 2011. Documentation on the Development of the Swiss TIMES Electricity Model (STEM-E) [WWW Document]. URL [http://www.psi.ch/eem/PublicationsTabelle/2011\\_Kannan\\_STEME.pdf](http://www.psi.ch/eem/PublicationsTabelle/2011_Kannan_STEME.pdf) (accessed 4.22.16).