

# Indikatoren für Klimaneutrale Quartierslösungen

Patrik Schönfeldt  
(Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, DLR)



Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Forschung, Technologie  
und Raumfahrt

Diese Arbeit wurde vom Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt als Teil des Projekts "Wärmewende NordWest" (Förderkennzeichen 03SF0624) finanziert.

Version	Datum	Änderungen
1.0	13.01.2022	
1.1	07.12.2022	a) Emissionen bis zur Klimaneutralität als zusätzlicher Indikator b) Beschreibung zum Thema Resilienz ergänzt
1.2	31.07.2025	a) Verbesserung der Formulierungen zwecks Verständlichkeit b) Vereinfachung der Indikatoren zur besseren Anwendbarkeit
1.3	01.12.2025	Änderung der Formatierung für eine Veröffentlichung

Der vorliegende Text samt der zur Illustration verwendeten Grafiken steht unter der Lizenz “CC BY 4.0”. Zum Einsehen der Bestimmungen besuchen Sie bitte: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Das Copyright verwendeter Logos und Markennamen ist hiervon nicht berührt und verbleibt bei den ursprünglichen Rechteinhabenden.

## Einleitung

In numerischen Optimierungsprozessen muss definiert werden, welche Größen zu minimieren oder maximieren sind. Diese Größen müssen zwei Anforderungen genügen:

1. Sie müssen berechenbar sein.
2. Sie müssen einen hierarchischen Vergleich (besser/schlechter) zulassen.

Indikatoren werden in der Regel genutzt, um Projekterfolg messbar zu machen. Sie lassen sich jedoch vielfach auch in Modellen berechnen. Insofern eine Ordnung besteht, eignen sie sich auch für numerische Optimierung. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, weitere Indikatoren festzulegen, die ausschließlich der Information dienen. Diese müssen natürlich auch berechenbar sein, brauchen jedoch keine Hierarchie aufweisen.

Der vorliegende Text fußt auf Ergebnissen eines Workshops zur Definition von Leit- und Leistungsindikatoren vom 4. Oktober 2021, der im Rahmen des Projekts „Wärmewende NordWest“ im Forschungsfeld „Klimaneutrale Wärme im Quartier“ durchgeführt wurde. Der genannte Autor ist Verfasser dieser Zusammenfassung und bedankt sich recht herzlich bei allen Teilnehmenden des Workshops und bei allen Projektbeteiligten, die auch die weiteren Verbesserungen stets begleitet haben.

In einem ersten Schritt wurden hierzu relevante Themenfelder identifiziert. Zu diesen haben Arbeitsgruppen jeweils Indikatorvorschläge erarbeitet. Aus diesem hat ein Plenum der am Forschungsfeld beteiligten eine Auswahl getroffen.

# Inhaltsverzeichnis

Übertragbarkeit.....	3
Indikator Skalierbarkeit.....	3
Weiterführende Gedanken .....	4
Umwelt- und Klimaeinflüsse .....	4
Indikatoren Treibhausgasemissionen .....	4
Indikator Ressourceneffizienz .....	5
Weiterführende Gedanken .....	5
Umsetzbarkeit und Akzeptanz .....	5
Zukunftsfähigkeit.....	5
Indikator Autarkie .....	5
Indikator Netzdienlichkeit.....	6
Weiterführende Gedanken .....	6
Resilienz.....	6
Indikator Performance in Szenarien .....	7
Indikator Stresstest .....	7
Zentrale oder dezentrale Versorgung .....	7
Kosten.....	8
Indikator Annuität (CapEx).....	8
Indikator Investitionskosten .....	8
Indikator Betriebskosten.....	8

## Übertragbarkeit

Allgemein sollte für Übertragbarkeit darauf geachtet werden, dass alle Indikatoren so formuliert sind, dass ihre Ordnung auch an anderen Orten gilt. Die Relevanz kann aber je nach Ort unterscheiden. Beispiel: Weniger Platzbedarf ist immer besser, in urbanen Räumen aber wichtiger als im ländlichen Raum.

## Indikator Skalierbarkeit

*Welchen Anteil der Wärmeproduktion nach vorgeschlagenem Konzept verkraftet die höher liegende Energiesystemebene?*

Dieser Indikator setzt sich zusammen aus

- der maximalen elektrischen Residuallast im Verhältnis zur Verfügung stehenden Leitungskapazität,
- dem Anteil der maximalen Wärmelast an der Kapazität eines Wärmenetzes und
- allen weiteren Energiebezügen von außen in Relation zur jeweiligen Verfügbarkeit.

Dabei ist der maximale Wert relevant. Da für die Optimierung eine Ordinalskala ausreicht, können Effekte durch zeitliche Verschiebung (Gleichzeitigkeitsfaktor) vernachlässigt werden. Alternativ bietet es sich an, statt der Spitzenlast mit der Energie in einem festzulegenden Quantil der maximalen Last zu rechnen. Sind die Kapazitäten der höherliegenden Energiesystemebene nicht bekannt, kann der Indikator in separate Indikatoren zerlegt werden, die jeweils nicht in Relation zur (in der Berechnung ohnehin konstant angenommenen) Kapazität stehen.

## Weiterführende Gedanken

Eine Möglichkeit wäre die direkte Untersuchung der Übertragbarkeit durch Simulation der Performance des Energiesystems in ein anderes Umfeld. Im Idealfall wäre Übertragbarkeit auch bei dem Erfordernis kleiner Änderungen gegeben. Wenn kleine Abweichungen keine Totalversagen auslösen können, reicht Abweichung von KPI an anderem Ort als Indikator. Damit sich genau ein Indikator „Übertragbarkeit“ und keine Multiplikation der Indikatoren mit Orten ergibt, wäre eine Gewichtung nötig.

## Umwelt- und Klimaeinflüsse

Auch wenn Klimaneutralität langfristig (hoffentlich) als gegeben angenommen werden kann, bleibt es im Rahmen der Wärmewende in jedem Fall relevant.

## Indikatoren Treibhausgasemissionen

*Welche Emissionen werden durch den Betrieb in der Gegenwart verursacht oder verhindert?*

Hierbei sind zeitlich veränderliche Emissionen für Import und Export von Energie (-trägern) anzusetzen. Da eine Durchleitung keine Emissionen verhindert oder erzeugt, sind hierbei beide Richtungen gleich zu bewerten.

In der Kommunikation ist zu beachten, dass die Berücksichtigung verhinderter Emissionen potenziell zu einem Offset führt, sodass ein Wert entsprechend „null Emissionen“ nicht unbedingt Klimaneutralität bedeuten: Wird beispielsweise durch die Verbrennung von Erdgas Strom erzeugt und ins Netz eingespeist, können Emissionen gutgeschrieben werden, obwohl offensichtlich kein klimaneutrales Versorgungssystem besteht.

*Welche Emissionen werden durch den Betrieb bis zur Klimaneutralität verursacht?*

Diesem Problem wird dadurch begegnet, dass neben den Emissionen für den Betrieb zum jetzigen Zeitpunkt auch diejenigen für den Betrieb bis zur Klimaneutralität berechnet werden. Für das klimaneutrale Umfeld wird dabei angenommen, dass keine Biomasse für Energiegewinnung angebaut wird. Diese zwei Leitindikatoren stehen nebeneinander und werden nicht gewichtet.

## Indikator Ressourceneffizienz

In einem klimaneutralen Umfeld ist davon auszugehen, dass jegliche Energie zunächst einmal Strom war. Endliche Rohstoffe werden verbraucht und müssen in Zukunft synthetisiert werden. Statt der Energieeffizienz, bewerten wir daher die Ressourceneffizienz.

*Importierter Strom + Stromäquivalent anderer importierter Energie*

Kleine Werte sind als besser anzusehen.

## Weiterführende Gedanken

- Eine Lebenszyklusanalyse wäre interessant, ist aber im Projekt vom Umfang nicht zu verfolgen. Insbesondere ist nicht abzuschätzen, wie sich der Aufwand für den Bau von Anlagen über die Zeit verändert. Als Annäherung könnte der Ausnutzungsgrad von erbauten Potentialen berechnet und als Indikator herangezogen werden. Auf diese Weise würden Emissionen für wenig genutzte Anlagen eingespart.
- Global gesehen ist die Konkurrenz zu anderer Nutzung ein wichtiges Thema. Dies trifft beispielsweise bei Wasserstoff zu. Die Nutzung von Wasserstoff im Wärmesektor darf die Defossilisierung der Industrie nicht behindern.
- Ein interessanter Aspekt bei Berücksichtigung nachwachsender Rohstoffe (Biomasse zur Energiegewinnung) wäre die Betrachtung von Zeitkonstanten: Wie lange dauert es zur erneuten Speicherung? Die relevante Größe hat insgesamt die Dimension „Tonnen“, weil Emissionen pro Zeiteinheit betrachtet werden. Beispiel: Pro Jahr werden 4 t Holz eines Baumes verbrannt, der über 50 Jahre gewachsen ist (lineare Massezunahme). Die Emissionen wären somit  $4 \text{ t/a} \times \frac{1}{2} \times 50 \text{ a} = 100 \text{ t}$ . (Der Faktor 1/2 bildet das lineare Wachstum ab.)

## Umsetzbarkeit und Akzeptanz

Indikatoren im Bereich Umsetzbarkeit und Akzeptanz setzen auf Experteneinschätzung bzw. sind erst post hoc für implementierte Fälle objektiv zu ermitteln. Abschätzung für Optimierung sehr schwer, als Ansatz ggf. "fuzzy Optimierung", die "fast optimale" Lösungen nicht verwirft.

- Nachvollziehbarkeit des Konzepts (Punkteskala)
- Zeitaufwand für Überzeugungsarbeit (Arbeitsstunden)
- Begleitungsbedarf (Arbeitsstunden)

## Zukunftsfähigkeit

### Indikator Autarkie

*1 - Energieimport/Energiebedarf des betrachteten Gebiets*

Dieser Indikator zeigt Unabhängigkeit von externen Veränderungen an. Das trifft insbesondere auf volatile Kosten auf externen Märkten zu.

## Indikator Netzdienlichkeit

*Einspeisung bzw. Bezug im Verhältnis zur übergeordneten Residuallast*

Zur Berechnung wird in jedem Zeitschritt die Nettotransmission von Strom in das oder aus dem Gebiet (Einspeisung  $< 0$ , Netzbezug  $> 0$ ) berechnet. Diese wird durch die Residuallast im übergeordneten Gebiet geteilt, die als erneuerbare Erzeugung minus Strombedarf definiert ist. Das Ergebnis ist eine dimensionslose Zahl. Große Werte sind als besser anzusehen. Alternativ<sup>1</sup>

*Für das Gebiet notwendige (oder eingesparte) Speicherkapazität auf der höheren Systemebene*

Das Ergebnis ist eine vorzeichenbehaftete Energiemenge. Kleinere Werte sind als besser anzusehen.

## Weiterführende Gedanken

- Skalierbarkeit (Indikator bei Übertragbarkeit) ist auch Teil der Zukunftsfähigkeit.
- Untersuchung auf mögliche Lock-In-Effekte bezüglich externer Transformationspfade, z.B. Temperaturniveaus oder Bestehen von Gasnetzen ist relevant, lässt sich jedoch kaum als ordinaler Indikator abbilden.
- Bedeutend ist auch die "softe Zukunftsfähigkeit". Der Betrieb sollte nicht nur möglich, sondern auch langfristig konkurrenzfähig sein. Durch den Indikator „Autarkie“ wird dies ein Stück weit abgebildet. Da Energiepreise jedoch zum großen Teil politisch geprägt werden, erscheint eine Betrachtung zukünftiger Kosten kaum machbar. Siehe hierzu auch Thema „Kosten“.
- Spätere Brennstoffsubstitution kann nur garantiert werden, wenn zeitgleich Erzeugungskapazität (Elektrolyse) aufgebaut wird. Hieraus ließe sich ein Kostenindikator ableiten.
- Das Energiesystem von jetzt muss nicht das der Zukunft sein. Ein Indikator „Umbaubarkeit“ erscheint jedoch technisch schwer zu realisieren. Es kann stattdessen nach einander nach ähnlichen Lösungen gesucht werden, die heute bzw. in Zukunft gut sind. Der Transformationspfad muss dann im Nachgang bestimmt werden.

## Resilienz

Je nach Zeithorizont kann Resilienz Versorgungssicherheit oder Zukunftssicherheit bedeuten. Grundsätzlich ist zudem zwischen allgemeiner Resilienz und technischer Resilienz zu unterscheiden.

Technische Resilienz bezeichnet, dass als Reaktion auf eine Störung ein (neuer) Betriebszustand hergestellt wird. Dieser Ansatz wird üblicherweise mit Versorgungssicherheit assoziiert und es gibt es quantifizierbare Indikatoren (z.B. Redundanz). Die Störungen in dieser Art der Resilienz („resilience against known

---

<sup>1</sup> <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124607>

unknowns“) können modellierbar sein, es kann z.B. eine Resilienz gegen oder bei Ausfall einer Komponente geben.

Die allgemeine Resilienz („resilience against unknown unknowns“) definiert sich als Widerstandsfähigkeit gegen unvorhergesehene Ereignisse oder Änderung der Rahmenbedingungen. Da Widerstandsfähigkeit gegen unvorhergesehene Ereignisse auch solche gegen benannte Ereignisse umfasst, kann diese Art der Resilienz so lesen, als dass sie die technische Resilienz umfasst.

## Indikator Performance in Szenarien

Allgemeine Indikatoren für technische Resilienz haben den Nachteil, dass diese keine Aussage im Sinne der Beeinflussung der Indikatoren im Falle einer Störung ableiten lassen. Um technische Resilienz ohne gesonderten Indikator abzubilden, lässt sich stattdessen der

*Wert anderer Indikatoren in Szenarios (als Optimierungsgröße)*

ermitteln. Hierbei soll mindestens ein optimistisches sowie ein pessimistisches (Zukunfts-) Szenario gewählt werden, um die Bandbreite der Ergebnisse abzubilden.

## Indikator Stresstest

Auf allgemeine Resilienz also lässt sich prinzipbedingt nicht optimieren, da ein mögliches Szenario nach seiner Betrachtung sozusagen „verbraucht“ ist. Da aus Sicht der Optimierung separat davon gehaltene Szenarien jedoch nicht von tatsächlich unvorhersehbaren Ereignissen zu unterscheiden lässt, ist ein Stresstest als einmaliger Indikator für Resilienz verwendbar. Somit kann der

*Wert anderer Indikatoren in Szenarios (als informative Größe)*

auch als Indikator für Resilienz dienen. Diese Szenarien müssen variantenreich sein, um eine Aussage über die Resilienz zuzulassen. Da es sich per Konstruktion nur um einen informativen Indikator und nicht um eine Optimierungsgröße handeln kann, sollen nach Auswahl möglicher Versorgungslösungen zur Wahl stehende Varianten einem zu entwickelnden Stresstest unterzogen werden. Hierbei handelt es sich um Szenarien, die so konstruiert sind, dass die Versorgungssicherheit in einer signifikanten Anzahl an Szenarien in unterschiedlichen Versorgungslösungen nicht gewährleistet ist.

## Zentrale oder dezentrale Versorgung

Dieses Themenfeld ist rein informativ. Zentrale oder dezentrale Versorgung sind nicht per se unterschiedlich gut. Folglich wird hier auch nicht aktiv optimiert. Über Constraint (z.B. Platzbedarf, Verfügbarkeit von Wärmequellen) kann jedoch eine Art der Versorgung bevorzugt werden. Zudem ist das Thema nachträglich für die Kommunikation des Konzepts relevant. Die Einführung qualitativer Skala (z.B. durch Punktevergabe) kann die Kommunikation vereinfachen.

# Kosten

Relevant sind aus Projektsicht die Kosten für Gesamtgesellschaft. Das bedeutet, dass Steuern, Abgaben, Förderung oder Subventionen nicht berücksichtigt werden. Externe (Klima-) Effekte müssen nicht einbezogen zwingend werden, da sie in einem separaten Indikator bewertet sind. Im Rahmen der Kommunikation ist eine ehrliche Betrachtung der Gesamtkosten jedoch von Vorteil.

## Indikator Annuität (CapEx)

*Kosten der Anlagenerrichtung geteilt durch die zu erwartende Lebensdauer der jeweiligen Anlage*

Bei der Berechnung der Annuitäten wird üblicherweise Zinszahlung auf Kredite sowie Inflation berücksichtigt. Ob dies nötig oder sinnvoll ist, hängt jedoch auch vom angenommenen Verhältnis von Zinsen und Preiseinwicklung ab.

## Indikator Investitionskosten

*Summe aller Investitions- und Errichtungskosten*

Als Abschätzung für den Aufwand bei Umsetzung werden zusätzlich zur Annuität die Kosten ohne Berücksichtigung der Anlagenlebensdauern betrachtet.

## Indikator Betriebskosten

*Kosten für Energiebeschaffung und Wartung abzüglich der Verkaufserlöse*

Betriebskosten für die Zukunft sind schwer absehbar, insbesondere da Energiekosten sehr stark politisch geprägt sind: Neben Steuern und Abgaben ist auch das Marktmodell (klassischer Räumungspreis, im Stromsektor „Merit Order“ genannt) Teil der politischen Diskussion.