

Cross-Impact-Studie zur nationalen Erdwärmekampagne

Relevanz- und Einflussanalyse zum Ausbauziel von 10 TWh/a Wärmeenergie aus Tiefer Geothermie bis 2030 unter Einbeziehung der Industrie- expertise

– Identifizierung von Schlüsselfaktoren,
die den Ausbau der Tiefen Geothermie
aus Sicht der Industrie beschleunigen –

Berichtsdatum: 23.02.2023
Archiv-Nr. : OASYS 208100

Bibliothek/Wissenschaftliches Archiv
im GEOZENTRUM HANNOVER

**Leibniz-Institut für
Angewandte Geophysik
Hannover**

Cross-Impact-Studie zur nationalen Erdwärmekampagne

**Relevanz- und Einflussanalyse zum Ausbauziel von 10 TWh/a Wärmeenergie
aus Tiefer Geothermie bis 2030 unter Einbeziehung der Industrieexpertise**

- Identifizierung von Schlüsselfaktoren, die den Ausbau der Tiefen Geothermie
aus Sicht der Industrie beschleunigen –

Sachbearbeitung:

Prof. Dr. Inga Moeck
Dr. Thomas Kölbel
Dr. Jochen Schneider

Fachlektorat:

Dr. Josef Weber
Katja Finkenzeller

Veröffentlichung:
Externe Reviews:

Pre-Print 02.02.2023, Print 23.02.2023
abgeschlossen

Inhalt

Impact Studie Geothermie - Überblick	3
Zusammenfassung.....	4
1. Einführung.....	5
1.1. Anlass und Zweck	5
1.2. Methodik von Cross-Impact Analysen	7
1.2.1. Anwendungsbereiche	7
1.2.2. Vorgehensweise	8
1.3. Informationsermittlung in der durchgeführten Cross-Impact Analyse über Experteneinschätzung ..	10
2. Szenariotechnik der durchgeführten Cross-Impact Analyse	12
2.1. Auswahl und Clusterbildung der Einflussfaktoren aus Faktoren	12
2.2. Aufstellung der Matrix.....	13
3. Ergebnisanalyse	16
3.1. Matrixdarstellung der Relevanzanalyse.....	16
3.1.1. Ergebnisse nach Gesamtranking.....	16
3.1.2. Ergebnisse nach Cluster-Ranking.....	18
3.2. Matrixdarstellung der Einflussanalyse.....	19
3.2.1. Ergebnis zum Impuls-Index.....	20
3.2.2. Ergebnis zum Dynamik-Index	21
4. Synthese und Prognose	23
4.1. Die Quadranten des Vier-Felder-Diagramms	23
4.2. Deskriptoren in der Übersicht: Wechselwirkungen im Gesamtsystem	24
4.2.1. Impact des Clusters Projektumsetzung	26
4.2.2. Impact des Clusters Ausbildung und Wissen	27
4.2.3. Impact des Clusters Fördersysteme und Versicherungen	28
4.3. Prognose: Potenzielle Schlüsselfaktoren zum beschleunigten Ausbau der Tiefen Geothermie	29
4.4. Handlungsempfehlungen für das Ausbauziel 10 TWh/a durch Tiefe Geothermie in 2030 nach Experteneinschätzung der Industrie	30
5. Annex	32
Teilnehmende, Zusammensetzung der Expertengruppe.....	32
Glossar	33
Bezeichnungen, Fachbegriffe	36
Schematische Erläuterung der Fachbegriffe, Tabellen und Grafiken	36

Danksagung

Es wurden zwei Reviews durchgeführt. Den Gutachter:Innen ist an dieser Stelle für ihre gründliche Durcharbeitung an dieser Studie ausdrücklich gedankt.

Autoren:

Prof. Dr. Inga S. Moeck, inga.moeck@leibniz-liag.de
Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik, Stilleweg 2, 30655 Hannover

Dr. Thomas Kölbel, tkoelbel@enbw.de
EnBW Energie Baden-Württemberg AG, Durlacher Allee 93, 76131 Karlsruhe

Dr. Jochen Schneider, jochen.schneider@enerchange.de
ENERCHANGE GmbH & Co. KG, Tizianstr. 96, 80638 München

Fachlektorat:

Dr. Josef Weber
Georg-August Universität Göttingen, Goldschmidtstr. 3, 37077 Göttingen

Katja Finkenzeller
ENERCHANGE GmbH & Co. KG, Tizianstr. 96, 80638 München

Impact Studie Geothermie - Überblick

Problemstellung: Wärmewende muss durch Hochlauf der Geothermie beschleunigt werden, um die Versorgung der Bevölkerung mit erneuerbarer Heizenergie flächendeckend sicherzustellen.

Leitfrage: Was muss heute getan werden, um 10 TWh Wärme aus (Mittel-)Tiefer Geothermie in 2030 bereitstellen zu können?

Wer hat geantwortet: Experten aus verschiedenen Bereichen der Geothermiewirtschaft

Ergebnis

Besonders wichtig für den Hochlauf der Tiefen Geothermie:

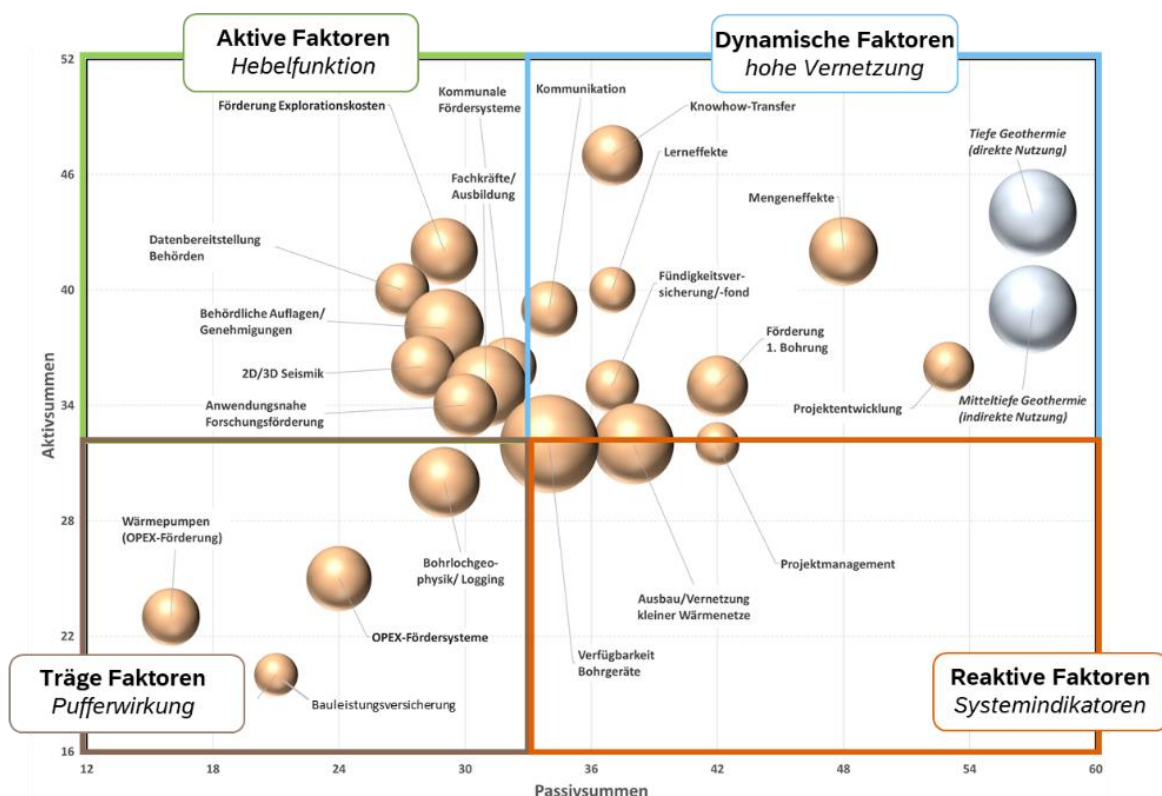
- Verfügbarkeit von Bohrgeräten
- Verfügbarkeit und Ausbildung von Fachkräften
- Ausbau / Verbindung kleiner Wärmenetze
- Vereinfachung von komplizierten behördliche Auflagen und Genehmigungen

Hoher Impuls für den Hochlauf der Tiefen Geothermie durch:

- zügige Datenbereitstellung durch Behörden
- OPEX Förderung für Wärmepumpen
- Förderung der Explorationskosten

Besonders systemkritisch und darf deshalb nicht fehlen:

- Verfügbarkeit von Bohrgeräten
- Mengeneffekte
- Knowhow-Transfer
- Kommunikation
- Lerneffekte
- Förderung der 1. Bohrung
- Fündigkeitsversicherung/-fond
- Projektentwicklung



Zusammenfassung

Die Cross-Impact Analyse (Wechselwirkungsanalyse) ist eine anerkannte Szenariotechnik für Technologieprognosen stark interdisziplinärer Systeme. Unter dem Blickwinkel, dass Wirtschaftsunternehmen den Ausbau der Geothermie in Deutschland umsetzen sollen, war die Leitfrage der vorliegenden Analyse, was heute getan werden muss, um 10 TWh Wärme aus Tiefer Geothermie in 2030 bereitstellen zu können. Mit dem Ergebnis der Cross-Impact Analyse können Instrumente zur Förderung des geothermischen Ausbaus gezielt überprüft und gegebenenfalls angepasst werden.

Die Cross-Impact-Analyse wurde mittels Experteneinschätzung durchgeführt. Die Expertengruppe wurde so zusammengestellt, dass jede Phase der geothermischen Projektentwicklung - von der Vorplanung bis hin zur Gewinnung - durch die Fachlichkeit der Experten vollständig abgedeckt war. Die Expertengruppe umfasste 18 Personen, die weit überwiegend aus Wirtschaft und Industrie kommen.

Für die Analyse wurden mit der Expertengruppe zunächst aus einer Reihe von Faktoren genau die Schlüsselfaktoren ermittelt, die für einen schnellen Markthochlauf der Geothermie zur Dekarbonisierung des Wärmesektors relevant sind.

Durch Wichtung dieser Faktoren wurden 23 Einflussfaktoren ermittelt, die in die Cluster „Projektumsetzung“, „Ausbildung und Wissen“ und „Fördersysteme und Versicherungen“ sortiert wurden. Die Einflussfaktoren wurden mittel Einfluss- und Relevanzmatrix miteinander verglichen und analysiert. So konnten die Wechselwirkungen im Gesamtsystem Geothermiewirtschaft quantifiziert werden.

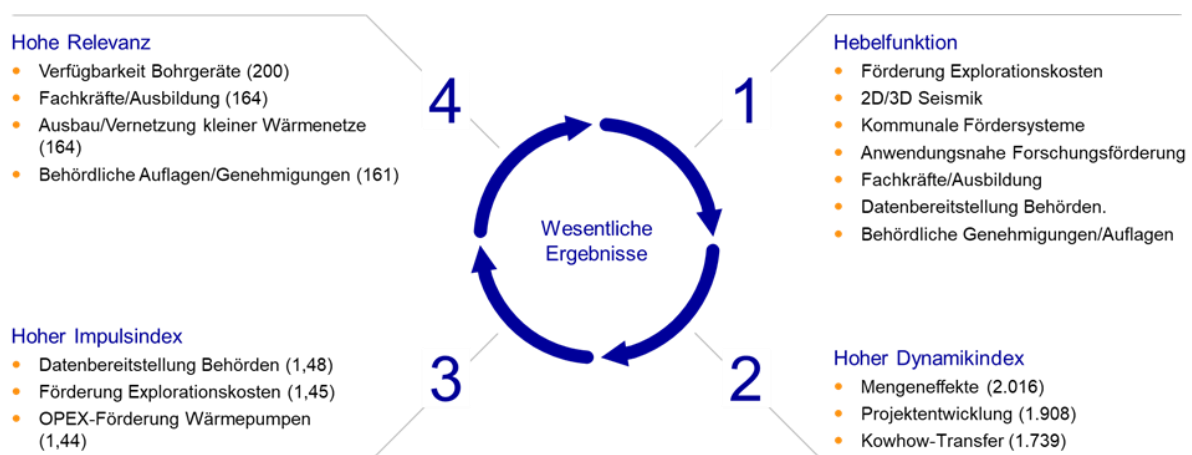
Besonders wichtig für den Hochlauf der Tiefen Geothermie sind die **Verfügbarkeit von Bohrgeräten, der Fachkräfteausbildung, der Wärmenetzausbau** und Abbau von teilweise derzeit starken Verzögerungen durch **behördliche Auflagen und Genehmigungen**.

Um dem Hochlauf der Tiefen Geothermie zu beschleunigen, sollte die zügige **Datenbereitstellung durch Behörden** gewährleistet, der **Betrieb von Wärmepumpen** und die **Explorationskosten gefördert** werden.

Die Faktoren mit hoher Hebelfunktion (I) **Förderung der Explorationskosten**, (II) **zügige Datenbereitstellung der Behörden**, (III) **Abbau behördlicher Auflagen und Beschleunigung von Genehmigungen**, (IV) **Verfügbarkeit von 2D/3D Seismik**, (V) **Anwendungsnahe Forschungsförderung**, (VI) **Ausbildung und Verfügbarkeit von Fachkräften** und (VII) **Kommunale Fördersysteme** beeinflussen aktiv-positiv den Ausbau der Geothermie.

Besonders systemkritisch wird die **Verfügbarkeit von Bohrgeräten, Mengeneffekte, Knowhow-Transfer, Kommunikation, Lerneffekte, Förderung der 1. Bohrung, Fündigkeitsversicherung/-fond und Projektentwicklung** gesehen. Bei Fehlen, Reduktion oder Ausbleiben dieser Faktoren mit hohem Vernetzungsgrad wird eine Negativentwicklung der Geothermiewirtschaft befürchtet, auch wenn an anderer Stelle gefördert wird.

Die Schlüsselfaktoren für den Hochlauf der Geothermie



1. Einführung

1.1. Anlass und Zweck

Im Zuge der Transformation des Wärmesektors ist die Geothermie die relevanteste Lösungsoption. **Die Geothermie ist ein idealer Ersatz für fossile Brennstoffe zur Bereitstellung von Heizenergie.** Die Geothermie speist sich aus dem natürlichen und stetigen Wärmestrom der Erde, **sie ist damit als einzige erneuerbare Wärmeenergiequelle grundlastfähig.** Gas-, Öl- und Kohle-Heizungssysteme können durch Geothermie-Heizungen ersetzt werden.

In seiner Informationsbroschüre „Wärmewende mit Geothermie“ [1] hat das LIAG bereits 2018 auf den hohen, über 50 % liegenden Anteil an Wärmeenergie am gesamten Primärenergiebedarf Deutschlands hingewiesen und die Wärmewende als entscheidenden Baustein für das Gelingen der deutschen Energiewende bezeichnet. Während das geologisch-technische und gesellschaftlich-technische Potenzial der Geothermie zur Wärmeversorgung in Deutschland enorm hoch ist [2], wurde die Bandbreite etablierter geothermischer Technologien bislang weit unter den vorhandenen Möglichkeiten genutzt. Die Gründe hierfür können sowohl in den vergleichsweise hohen Anfangsinvestitionen gegenüber später niedrigen Betriebskosten liegen als auch in der fehlenden gesellschaftlichen Wahrnehmung.

Eine Änderung dieser Lage trat in jüngerer Zeit ein. Im Koalitionsvertrag für die Jahre 2021-2025 „Mehr Fortschritt wagen“ der Bundesregierung vom 08.12.2021 und auch in der „Eröffnungsbilanz Klimaschutz“ des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) vom 11.01.2022 findet sowohl die oberflächennahe Geothermie (in Verbindung mit Wärmepumpen) als auch die Tiefe Geothermie bereits Erwähnung. Genau zehn Monate später hat das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) in seiner Pressemitteilung vom 11.11.2022 eine Erdwärmekampagne mit acht Maßnahmen verkündet, mit denen die Marktanteile der Geothermie gerade durch Unterstützung der kostenintensiven frühen Projektphasen erhöht werden soll. Unter anderem geht es dabei um die Verbesserung der Datenlage zum Ausbau der Oberflächennahen Geothermie und um eine Explorationskampagne zur Marktbereitung der Tiefen Geothermie. Diese Maßnahmen werden durch die zwei Forschungsprojekte WärmeGut und Warm-Up flankiert, die durch die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) und das Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG) im 7. Energieforschungsprogramm des BMWK eingereicht wurden und in die die Staatlichen Geologischen Dienste der Länder eingebunden sind.

Der zukünftig mögliche Ausbau der Oberflächennahen und Tiefen Geothermie wurden in Vorbereitung der Forschungsprojekte von BGR und LIAG in der „Nationalen Erdwärmestrategie“ skizziert. Die Strategie zeigt auf, wie und in welchem Umfang Geothermie für eine nachhaltige,

preisstabile und versorgungssichere Abdeckung des Wärmebedarfs in Deutschland umgesetzt werden kann. Für den Bereich der Mitteltiefen Geothermie ist eine deutschlandweite Anschubhilfe für Explorationstätigkeiten zur Umsetzung von hydrothermalen Projekten mit hohen Erfolgsaussichten vorgesehen. Das dafür ausgelegte Forschungsprojekt Warm-Up zielt auf die Unterstützung des Roll-Outs insbesondere der mitteltiefen, hydrothermalen Geothermie (Fördertemperaturen von ca. 40 bis 70°C) für die Wärmewende ab. Das Ziel ist der Ausbau der (Mittel-)Tiefen Geothermie von heute etwa 1,4 TWh/a auf 10 TWh/a in 2030. Dieses Ausbauziel wurde bereits in der Metastudie des LIAG zur nationalen Erdwärmestrategie durch einen soliden, aber auch ambitionierten Ausbaupfad hergeleitet [3].

Die Metastudie des LIAG formuliert zwar Ausbaustufen der Tiefen Geothermie bis 2045 in Kombination mit Einsparungen im Wärmesektor durch Bedarfsreduktion [3], es wurde jedoch nicht analysiert, welche Faktoren den Ausbau der Tiefen Geothermie besonders stark beeinflussen und beschleunigen können.

Die Geothermie ist eine komplexe Technologie, bei der untertägige und übertägige Faktoren zusammenwirken und in Abhängigkeiten zueinanderstehen. In derartig komplexen Systemen lassen sich einzelne Deskriptoren nicht losgelöst voneinander beleuchten. Betrachtet man insbesondere dynamische Systeme, deren Objekte mehr als nur einen Zustand annehmen können, ist nicht nur entscheidend, welche Faktoren miteinander verbunden sind, sondern auch wie diese zusammenhängen, und das in Stärke und Richtung. Ein Kreis von Wechselwirkungen entsteht und ergibt Rückkopplungen.

Für eine wirkungsvolle Unterstützung der Geothermie sollten genau die Systemelemente gefördert werden, die eine große Hebelfunktion aufweisen. Zur Identifikation von Schlüsselementen mit hoher Wirkung und Relevanz können Cross-Impact Analysen durchgeführt werden. **Die vorliegende Cross-Impact-Studie soll die Frage beantworten, was bereits jetzt getan werden muss, um 2030 10 TWh/a Wärmeenergie aus Tiefer Geothermie bereitstellen zu können.** Zur Beantwortung dieser Frage sollte nicht die wissenschaftliche Perspektive wiedergegeben werden, sondern - unter wissenschaftlich neutraler Anleitung - die Sicht derjenigen, die die Wärmewende für Kommunen umsetzen: die geothermische Industrie.

In dieser Cross-Impact-Studie geht es darum, die Faktoren, die nach Experteneinschätzung aus der Industrie für eine schnelle, positive Entwicklung der Tiefen Geothermie in Deutschland notwendig sind, zu identifizieren, zu gewichten und quantitativ einzuordnen. Die Ergebnisse dienen der Politikberatung und sollen eine Entscheidungshilfe für die Entwicklung von Förderinstrumenten liefern, mit denen der Geothermiemarkt in Deutschland gezielt gefördert werden kann. Damit kann einerseits die deutsche Wirtschaft beim Ausbau der Tiefen Geothermie unterstützt werden, und andererseits können die Klimaschutzziele im Verbrauchssektor Raumwärme

mit optimiertem Mitteleinsatz erreicht werden. Aus diesem Grund erhielt die vorliegende Cross-Impact-Studie den Arbeitstitel „Wärmewende mit Geothermie aus Sicht der Industrie“ belegt.

1.2. Methodik von Cross-Impact Analysen

1.2.1. Anwendungsbereiche

Cross-Impact Analysen werden auch als Wechselwirkungsanalysen bezeichnet. Sie wurden als Analysemethode bereits in den 1960-er Jahren für Technologieprognosen entwickelt und ist heute eine etablierte Szenariotechnik [4]. Die Cross-Impact Analyse wird für Systeme angewendet, die sich durch eine starke Inter- und Transdisziplinarität auszeichnen und in denen verschiedene Faktoren aus verschiedenen Disziplinen miteinander in Wechselwirkung stehen. Eine empirische oder theoretisch begründete Herangehensweise ist in diesen komplexen Systemen nicht mehr anwendbar, wenn Einfluss und Relevanz bestimmter Faktoren auf die Entwicklung eines Systems erfasst und verstanden werden sollen [4]. Die Cross-Impact Analyse bietet die Möglichkeit, Systeme trotz hoher Komplexität und Interdisziplinarität auf entscheidende Entwicklungsfaktoren hin zu untersuchen, indem Experten des jeweiligen Fachgebiets in die Analyse eingebunden werden. Sie ist also eine Szenario-Technik, die unterschiedliche Expertisen bündelt und durch ein disziplinübergreifendes Verständnis zur Steuerung komplexer gesellschaftlicher Themen beitragen kann [5]. Dabei werden Interaktionen von Schlüsselfaktoren durch Experten qualitativ bewertet, um die Frage zu beantworten, welche Systemelemente besonders wirksam und effizient für die Entwicklung des Systems sind.

Die geothermische Industrie ist ein disziplinübergreifendes System, das zur Projektentwicklung die Geowissenschaften, die Physik, die Ingenieurwissenschaften und Bereiche des technischen Handwerks (Metall- und Bauhandwerk, Elektro-, Maschinen- und Versorgungstechnik) verbinden muss. In der Gesamtsystembetrachtung sind zudem auch Wirtschafts- und Sozialwissenschaften notwendig. Die Auswahl von Experten und Stakeholdern orientierte sich für die vorliegende Cross-Impact Analyse an den Entwicklungsschritten der geothermischen Projektentwicklung (Abb. 1), wobei darauf geachtet wurde, dass die teilnehmenden Experten auch an den Schnittstellen zum jeweils folgenden Entwicklungsschritt aktiv sind.

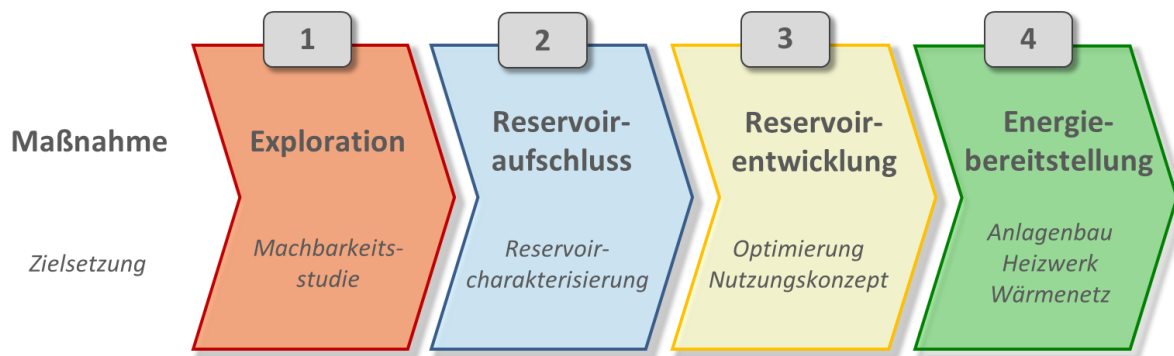


Abb. 1. Schematische Darstellung der wesentlichen Phasen der geothermischen Projektentwicklung

Ein gängiges Verfahren ist, die Experten aufgrund ihrer Expertise einschätzen zu lassen, welche Ursachen hinter dem gegenwärtigen Systemzustand stehen, wie sich das System unter bestimmten Faktoren in der Zukunft weiterentwickeln wird und welche Faktoren als aktive oder passive Steuerungselemente zu bezeichnen sind [4]. Während die eingebundenen Expertinnen und Experten durch ihre Berufserfahrung nicht unbedingt das Gesamtsystem Geothermie, sondern jeweils nur einen Teilaspekt der geothermischen Projektentwicklung abdecken können, **erreicht die Expertengruppe gemeinsam die Expertise für das Gesamtsystem.** Wenn es den Expertinnen und Experten gelingt, ihre Teilexpertisen zusammenzuführen, kann eine Cross-Impact Analyse zur Beantwortung einer Leitfrage führen.

1.2.2. Vorgehensweise

Das Gesamtsystem der deutschen Geothermiewirtschaft kann modellhaft parametrisiert und in sich gegenseitig beeinflussende Faktoren gegliedert werden (Abb. 2). Entsprechend der Vorgehensweise von Cross-Impact Analysen werden daher anfangs Faktoren festgelegt, nach denen die Geothermiewirtschaft von der Planung bis zur Energiebereitstellung anhand eines einfachen Modells strukturiert werden kann.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass in Cross-Impact Analysen häufig der Begriff „*Variable*“ zur Beschreibung des Gesamtsystems verwendet wird. In dieser Studie wurde der Begriff „*Faktor*“ statt des Begriffs „*Variable*“ verwendet, auch wenn „*Variablen*“ der wissenschaftlich korrekte Begriff sein mag, insbesondere für dynamische, sich entwickelnde Systeme wie die Geothermiewirtschaft. Der Begriff „*Faktor*“ steht dagegen für ein momentan feststehendes Element und nicht für ein momentan veränderliches Element der „*Variable*“. „*Faktor*“ hat sich im Arbeitsablauf dieser Studie somit etabliert und trug zum gemeinsamen Verständnis in der Expertengruppe bei, nämlich in einer Momentaufnahme die deutsche Geothermiewirtschaft in Faktoren zu gliedern.

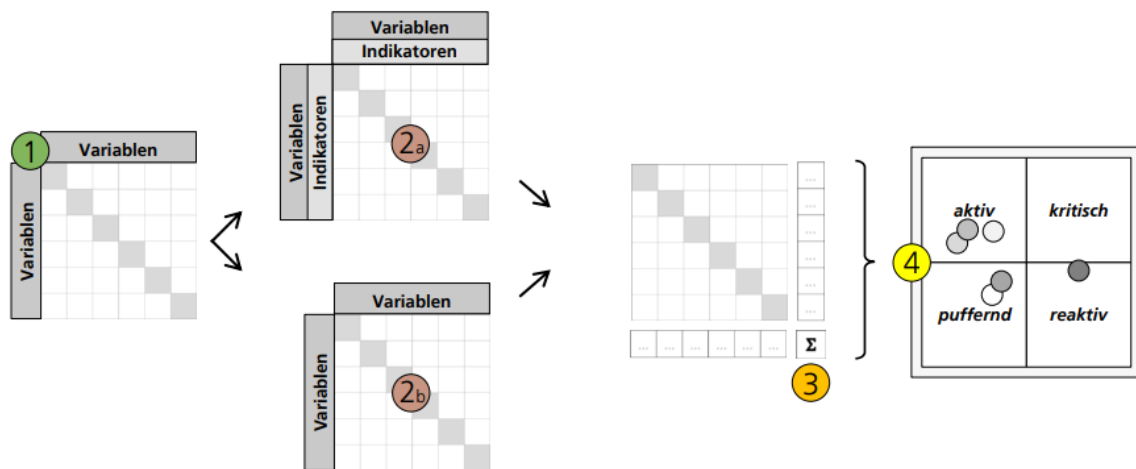


Abb. 2. Generelle Vorgehensweise in Cross-Impact Analysen zur Ermittlung der Faktoren (wissenschaftlich als Variablen bezeichnet), die aktiv, reaktiv, kritisch oder puffernd auf das System wirken. 1: Definition der Faktoren, 2: Erstellung der Einflussmatrix mittels 2a: Indikatoren oder 2b: Experteneinschätzung, 3: Bildung der Aktiv- und Passivsummen, 4: Interpretation des Vier-Felder-Diagramm (verändert aus [6]).

Diese Faktoren werden in eine Matrix eingetragen, um sie vergleichend gegenüberzustellen. Bei dem Vergleich wird zu jedem Faktorenpaar gefragt, welchen wechselseitigen Einfluss sie aufeinander haben und welcher Faktor stärker wichtet. Aus diesem Vergleich können Relevanzsummen errechnet werden. Darüber hinaus kann in jedem Paarvergleich gefragt werden, welchen Einfluss der eine auf den anderen Faktor hat. Aus diesem Vergleich können Aktiv- und Passivsummen gebildet werden. Die Aktivsumme ist eine Kennzahl dafür, wie stark die betrachtete Komponente andere Komponenten beeinflusst. Die Passivsumme gibt wiederum an, wie stark die betrachtete Komponente von anderen Komponenten beeinflusst wird. So können Wechselwirkungen im Gesamtsystem der Geothermiewirtschaft klassifiziert werden. Die Ergebnisse werden in einem Vier-Felder-Diagramm dargestellt. Entsprechend seiner jeweiligen Aktiv- und Passivsumme kann jeder Faktor einer der vier folgenden Ergebnisfeldern zugeordnet werden (Abb. 2):

- Aktiv: starker Einfluss, schwache Abhängigkeit
- Reaktiv (passiv): schwacher Einfluss, starke Abhängigkeit
- Kritisch: starker Einfluss, starke Abhängigkeit
- Puffernd: schwacher Einfluss, schwache Abhängigkeit

Damit können die Ergebnisse ausgehend von deren Aktiv- und Passivsummen typisiert werden.

Für die vorliegende Cross-Impact Analyse wurde die Variante 2b aus Abbildung 2 [6] gewählt, da die Faktorenbeeinflussung mittels Einschätzung von Experten aus der Geothermiewirtschaft quantifiziert werden sollte, und nicht über Indikatoren (Variante 2a). m

Die Leitfrage für diese Cross-Impact Analyse war, welche Faktoren die geothermische Entwicklung besonders vorantreiben können und wo derzeit Engpässe mit Blick auf die Zielgröße „10 TWh Wärme in 2030“ gesehen werden.

Die Cross-Impact Analyse mit Experteneinbindung birgt neben Stärken jedoch auch eine Schwäche, die hier nicht unerwähnt bleiben darf. Systeme sind dynamisch und können von äußeren Ereignissen richtungsändernd beeinflusst werden. Eine solche Systemdynamik wird durch die Cross-Impact Analyse nicht wiedergegeben, sie bietet lediglich eine Momentaufnahme. Auch die Größe und die Zusammensetzung der Expertengruppe beeinflussen das Ergebnis. In der vorliegenden Studie wurde deshalb auf eine praktikable Größe sowie eine gleichmäßige Zusammensetzung der Gruppe aus den unterschiedlichen Industriesparten der geothermischen Projektentwicklung geachtet. Eine Lösung zur Berücksichtigung der Systemdynamik kann sein, die Cross-Impact Analyse in regelmäßigen Abständen zu wiederholen, möglichst bei gleicher Zusammensetzung der Expertengruppe, um einen Ergebnisvergleich herstellen zu können.

1.3. Informationsermittlung in der durchgeführten Cross-Impact Analyse über Experteneinschätzung

An insgesamt vier Terminen wurden 18 für die geothermische Industrie repräsentative Expertinnen und Experten mit ihren individuellen Perspektiven und Interessenlagen an der Cross-Impact Analyse durch Befragungen und Diskussionen beteiligt. Der Anlass und der Ablauf der Studie wurden der Expertengruppe zu Beginn der Studie vorgestellt; diese besteht aus insgesamt sechs Schritten (Abb. 3). Das erste, dritte und vierte Meeting fand online statt, das zweite Meeting zur Bearbeitung der Studien-Matrix wurde in Präsenz abgehalten.

Zunächst wurden mit der Expertengruppe die Faktoren festgelegt, welche die Geothermiewirtschaft derzeit beschreiben. Im nächsten Schritt wurde mit der Expertengruppe eine Bewertungsskala festgelegt, mit der die verschiedenen Faktoren bzw. Deskriptoren von den Experten vergleichend bewertet wurden. Diese Bewertung wurde von den Teilnehmenden in Einzelarbeit vorgenommen, sodass schließlich 18 verschiedene Bewertungsergebnisse vorliegen konnten. Anschließend wurde die Beeinflussung der Deskriptoren untereinander in einer dafür zusammengestellten Matrix von den Experten bewertet. Aus diesen Bewertungsergebnissen wurden die Relevanz-, die Aktiv- und die Passivsummen abgeleitet, wobei Aktivsummen den Einfluss

eines Zeilen-Deskriptors auf einen Spaltendeskriptor widerspiegeln. Anschließend wurden die Ergebnisse visualisiert und analysiert. Die Ergebnisanalyse wurde mit den Expertinnen und Experten an einem weiteren Termin diskutiert und interpretiert.

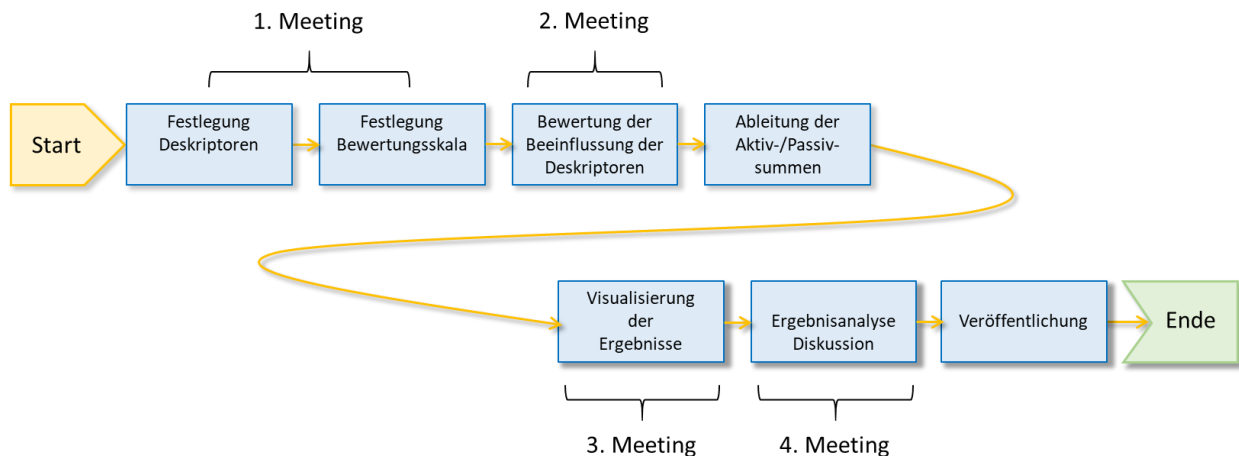


Abb. 3. Konsistenter Entwicklungspfad der Cross-Impact Analyse „Wärmewende mit Geothermie aus Sicht der Industrie“. Über vier Meetings wurden die Experten an dem Ablauf der Analyse beteiligt.

Quellen für Kapitel 1:

- [1] WEBER, J., MOECK, I. (2019): Wärmewende mit Geothermie. Broschüre, November, Juli 2019, 4. Auflage, ISBN: 978-3-9817896-4-5, 12 Seiten, Hannover, abrufbar unter www.geotis.de
- [2] MOECK, I., SCHINTGEN, T., SHIPILIN, V., OZOR, M. (2022): Katalogisierung geothermischer Provinzen nach dem Konzept der Fündigkeitstypen (play type) zum wirtschaftlichen Ausbau und zur Internationalisierung der deutschen Geothermie. Endbericht, FKZ 0324210, 58 Seiten. Wissenschaftliches Archiv im GEOZENTRUM HANNOVER, Archiv Nr. OASYS 207568
- [3] MOECK, I. (2022): Ersatz fossiler Brennstoffe im Bereich Raumwärme und Warmwasser durch Geothermie als unverzichtbarer Bestandteil im Energiesektor Ökowärme bis 2045. Metastudie zur nationalen Erdwärmestrategie. 29 Seiten. Wissenschaftliches Archiv im GEOZENTRUM HANNOVER, Archiv Nr. OASYS 207685, abrufbar unter www.geotis.de
- [4] WEIMER-JEHLE, W. (2015): Cross-Impact Analyse. In: Niederberger, M., Wassermann, S. (eds) Methoden der Experten- und Stakeholdereinbindung in der sozialwissenschaftlichen Forschung, S. 243-259. Springer VS, Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-01687-6_12
- [5] NIEDERBERGER, M. (2015). Methoden der Experteneinbindung. In: Niederberger, M., Wassermann, S. (eds) Methoden der Experten- und Stakeholdereinbindung in der sozialwissenschaftlichen Forschung, S. 33-48. Springer VS, Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-01687-6_3
- [6] Kempster, T., Zysset, A., Basler, E. (2013). Vorgehensweise Cross-Impact Analyse. Nationales Forschungsprogramm NFP 61, Bericht „Auf dem Weg zu einer integrierten Wasserpolitik - Politikinstrumente von Bund und Kantonen (NFP 61), S. 13 ff.

2. Szenariotechnik der durchgeführten Cross-Impact Analyse

2.1. Auswahl und Clusterbildung der Einflussfaktoren aus Faktoren

Im ersten Webinar sind durch die Expertengruppe insgesamt 53 Faktoren als relevant bewertet und zusammengetragen worden (Tab. 1).

Tabelle 1. Die 53 Faktoren, die für die Cross-Impact Analyse ausgewählt wurden

• Allgemeine Versicherungen	• Hydrochemie	• Kalte Nahwärmenetze
• Ausbildung	• Inselnetze/Quartiere	• Verbrauchskosten
• Betriebskosten	• Lerneffekte	• Inhibitoren
• Co-Produkte	• Skaleneffekte	• Ausfällungsproblematik
• Kaskadensysteme/Abwärmenutzung	• Monitoringsysteme	• Verfügbarkeit
• Anlagenbau-Engineering	• Multi Laterals	• Fündigkeitsversicherung
• Reservoir-Engineering	• Nachfrage Bohrgeräte	• Behördliche Genehmigungen
• Eigenstrombedarf	• Innovative Technologien	• Behördliche Auflagen
• spez. Explorationskosten	• Öffentlichkeitsarbeit	• Forschungsförderung
• Fernwärmenetze	• Optimierung Technik	• Künstliche Intelligenz
• Wärmepumpentechnologie	• Projektmanagement	• Spez. Fördersysteme Wärme
• Förderpumpenmarkt	• Öffentliche Akzeptanz	• Kraft-Wärme-Kopplung
• Förderung Bohrkosten	• Rationalisierungseffekte	• Hydraulische Stimulation
• Förderung Explorationskosten	• Vorbohrung (Slimhole)	• Laserbohrverfahren
• Förderung Heizwerk	• spez. Bohrkosten	• sonstiges Well Enhancement
• Fündigkeitsversicherung	• spez. Finanzierungskosten	• 2D/3D Seismik
• Fachkräfte	• spez. Baukosten	• Bohrlochgeophysik/Logging
	• spez. Rohstoffkosten	• Andere geophysikalische Methoden

Diese Faktoren wurden in die einfachen Kategorien (I) Wichtig, (II) Wünschenswert und (III) Unwichtig gruppiert. Nur mit den Variablen der Gruppe „Wichtig“ wurde im Folgenden unter dem Begriff Faktoren bzw. Deskriptoren weitergearbeitet. Die Faktoren wurden den drei Clustern (I) „Projektumsetzung“, (II) Ausbildung & Wissen und (III) „Fördersysteme & Versicherungen“ zugeordnet (Tab. 2).

Tiefe und Mitteltiefe Geothermie sind sinnvoll nur miteinander zu vergleichen; dies ist bei der Auswertung berücksichtigt.

Tabelle 2. Cluster der Einflussfaktoren, die für die Bildung der Matrix verwendet wurden.

PROJEKTUMSETZUNG	AUSBILDUNG & WISSEN	FÖRDERSYSTEME & VERSICHERUNGEN
Verfügbarkeit Bohrgeräte	Fachkräfte/Ausbildung	Förderung Explorationskosten
Tiefe Geothermie (direkte Nutzung)	Knowhow-Transfer	OPEX-Fördersysteme
Mitteltiefe Geothermie (indirekte Nutzung)	Kommunikation	Anwendungsnahe Forschungsförderung
Ausbau/Vernetzung kleiner Wärmenetze	Lerneffekte	Förderung 1. Bohrung
Behördliche Auflagen/ Genehmigungen		Kommunale Fördersysteme
Bohrlochgeophysik/ Logging		Wärmepumpen (OPEX-Förderung)
Mengeneffekte		Fündigkeitsversicherung/-fond
2D/3D Seismik		Bauleistungsversicherung
Datenbereitstellung Behörden		
Projektentwicklung		
Projektmanagement		

2.2. Aufstellung der Matrix

Die Schlüsselfaktoren wurden in eine Matrix überführt (Abb. 4), die zwei Aufgaben dienen sollte. Zuerst wurde die Matrix als Relevanzmatrix (Abb. 4) zum binären Vergleich der Schlüsselfaktoren eingesetzt, um die Relevanz der einzelnen Faktoren zu ermitteln. Dabei wurde abgefragt, ob der Schlüsselfaktor der Zeile wichtiger als der Schlüsselfaktor der Spalte ist. Bei einem

- „Ja“ wurde eine 1, bei einem
- „Nein“ eine 0 eingetragen.

Je Faktor ergeben sich daraus Relevanzsummen. Die Faktoren mit den höchsten Relevanzsummen werden als „Erfolgsfaktoren“ bezeichnet. Mit dieser Analyse kann ermittelt werden, welche Faktoren für die geothermische Entwicklung in Deutschland nach Einschätzung der Experten derzeit besonders wichtig sind. In einer zweiten Abfrage wurde die Matrix als Einflussmatrix verwendet. Hier werden Faktoren als Deskriptoren bezeichnet und die Frage lautet, welchen Einfluss die Deskriptoren im direkten Vergleich auf die jeweils anderen Deskriptoren haben.

Hier konnten vier Antworten gegeben werden, die wie folgt quantifiziert wurden:

- „kein Einfluss“ = 0
- „Geringer Einfluss“ = 1
- „Mittlerer Einfluss“ = 2
- „Hoher Einfluss“ = 3

Mit dieser Matrix können die Aktiv- und die Passivsummen ermittelt werden, die zur Interpretation des Vier-Felder-Diagramms dienen.

Relevanzmatrix "Ist der Einflussfaktor i (Zeile) wichtiger als Einflussfaktor j (Spalte)?" Ja = 1 Nein = 0 Bewertung: Je höher die Relevanzsumme, desto relevanter der Zeilenparameter		Anwendungsnahe Forschungsförderung	Knowhow-Transfer	Lerneffekte	Kommunikation	Fündigkeitsversicherung/-fond	Bauleistungsversicherung	Mitteltiefe Geothermie (indirekte Nutzung)	Tiefe Geothermie (direkte Nutzung)	Datenbereitstellung Behörden	Kommunale Fördersysteme	Projektmanagement	Projektentwicklung	2D/3D Seismik	Förderung 1. Bohrung	Fachkräfte/Ausbildung	OPEX-Fördersysteme	Ausbau/Vernetzung kleiner Wärmenetze	Wärmepumpen, (OPEX-Förderung)	Behördl. Auflagen/ Genehmigungen	Förderung Explorationskosten	Bohrlochgeophysik/ Logging	Mengeneffekte	Verfügbarkeit Bohrgeräte	Relevanzsumme
Anwendungsnahe Forschungsförderung		1																							
Knowhow-Transfer			1																						
Lerneffekte				1																					
Kommunikation					1																				
Fündigkeitsversicherung/-fond						1																			
Bauleistungsversicherung							1																		
Mitteltiefe Geothermie (indirekte Nutzung)								1																	
Tiefe Geothermie (direkte Nutzung)									1																
Datenbereitstellung Behörden										1															
Kommunale Fördersysteme											1														
Projektmanagement												1													
Projektentwicklung													1												
2D/3D Seismik														1											
Förderung 1. Bohrung															1										
Fachkräfte/Ausbildung																1									
OPEX-Fördersysteme																	1								
Ausbau/Vernetzung kleiner Fernwärmenetze																		1							
Wärmepumpen (OPEX-Förderung)																			1						
Behördl. Auflagen/ Genehmigungen																				1					
Förderung Explorationskosten																					1				
Bohrlochgeophysik/ Logging																						1			
Mengeneffekte																							1		
Verfügbarkeit Bohrgeräte																								1	

Abb. 4. Verwendete Relevanz-Matrix der Cross-Impact Analyse

Abb. 5. Verwendete Einflussmatrix der Cross-Impact Analyse

3. Ergebnisanalyse

3.1. Matrixdarstellung der Relevanzanalyse

Relevanzmatrix	Anwendungsnahe Forschungsförderung	Knowhow-Transfer	Lerneffekte	Kommunikation	Fündigkeitsversicherung/- fond	Bauleistungsversicherung	Mitteltiefe Geothermie (indirekte Nutzung)	Tiefe Geothermie (direkte Nutzung)	Datenbereitstellung Behörden	Kommunale Fördersysteme	Projektmanagement	Projektentwicklung	2D/3D Seismik	Förderung 1. Bohrung	Fachkräfte/ Ausbildung	OPEX-Fördersysteme	Ausbau/Vernetzung kleiner Wärmenetze	Wärmepumpen (OPEX-Förderung)	Behördl. Auflagen/ Genehmigungen	Förderung Explorationskosten	Bohrlochgeophysik/ Logging	Mengeneffekte	Verfügbarkeit Bohrgeräte	Relevanzsumme
"Ist der Einflussfaktor i (Zeile) wichtiger als Einflussfaktor j (Spalte)?"																								
Bewertung: Je höher die Relevanzsumme, desto relevanter der Zeilenparameter																								
Anwendungsnahe Forschungsförderung		7	8	4	5	7	4	4	8	7	9	8	6	6	5	5	6	7	4	6	8	2	3	129
Knowhow-Transfer	5		9	7	8	7	3	2	7	5	9	9	6	7	5	6	4	5	2	4	5	7	1	123
Lerneffekte	4	3		6	7	7	4	3	5	4	5	4	5	6	3	5	3	5	4	4	2	4	0	93
Kommunikation	8	5	6		2	7	5	5	5	4	11	9	6	5	2	5	3	6	4	4	4	4	4	114
Fündigkeitsversicherung/-fond	7	4	5	10		7	1	3	7	8	5	4	5	4	1	5	3	7	2	5	6	6	2	107
Bauleistungsversicherung	5	5	5	5	5		3	3	4	5	4	4	4	6	3	3	3	4	3	4	4	2	4	88
Mitteltiefe Geothermie (indirekte Nutzung)	8	9	8	7	11	9		4	8	8	8	9	10	10	6	8	8	8	10	9	7	9	4	178
Tiefe Geothermie (direkte Nutzung)	8	10	9	7	9	9	8		9	7	8	8	11	10	8	7	7	7	10	8	6	7	5	178
Datenbereitstellung Behörden	4	5	7	7	5	8	4	3		6	8	7	4	5	2	6	3	7	2	4	4	6	2	109
Kommunale Fördersysteme	5	7	8	8	4	7	4	5	6		7	7	3	7	4	5	1	8	3	5	6	6	3	119
Projektmanagement	3	3	7	1	7	8	4	4	4	5		6	3	4	5	3	4	2	4	5	2	3	1	88
Projektentwicklung	4	3	8	3	8	8	3	4	5	5	6		6	4	3	3	3	5	4	4	4	6	3	102
2D/3D Seismik	6	6	7	6	7	8	2	1	8	9	9	6		7	4	5	5	8	4	6	7	6	2	129
Förderung 1. Bohrung	6	5	6	7	8	6	2	2	7	5	8	8	5		5	6	4	8	4	6	8	5	2	123
Fachkräfte/ Ausbildung	7	7	9	10	11	9	6	4	10	8	7	9	8	7		8	4	7	6	8	5	9	5	164
OPEX-Fördersysteme	7	6	7	7	7	9	4	5	6	7	9	9	7	6	4		4	6	3	5	5	7	2	132
Ausbau/Vernetzung kleiner Fernwärmenetze	6	8	9	9	9	9	4	5	9	11	8	9	7	8	8	8		9	4	8	7	6	3	164
Wärmepumpen (OPEX-Förderung)	5	7	7	6	5	8	4	5	5	4	10	7	4	4	5	6	3		4	5	6	5	2	117
Behördl. Auflagen/ Genehmigungen	8	10	8	8	10	9	2	2	10	9	8	8	8	8	6	9	8	8		7	5	7	3	161
Förderung Explorationskosten	6	8	8	8	7	8	3	4	8	7	7	8	6	6	4	7	4	7	5		7	5	3	136
Bohrlochgeophysik/ Logging	4	7	10	8	6	8	5	6	8	6	10	8	5	4	7	7	5	6	7	5		6	5	143
Mengeneffekte	10	5	8	8	6	10	3	5	6	6	9	6	6	7	3	5	6	7	5	7	6		5	139
Verfügbarkeit Bohrgeräte	9	11	12	8	10	8	8	7	10	9	11	9	10	10	7	10	9	10	9	9	7	7		200

Abb. 6. Ergebnis der Experteneinschätzung zur Abfrage der Relevanzmatrix, in diesem Fall nach Rücklauf von 12 der insgesamt 18 Experten

Mit der Relevanzmatrix konnten aus 12 vollständigen Rückläufen aus der Expertengruppe insgesamt 3.036 Vergleiche durchgeführt. Die maximal erreichbare Relevanzsumme pro Einflussfaktor beträgt 264.

Der Einflussfaktor „Verfügbarkeit der Bohrgeräte“ hat mit 200 den höchsten Einzelwert. Die Einflussfaktoren „Bauleistungsversicherung“ und „Projektmanagement“ weisen die niedrigsten Einzelwerte auf.

3.1.1. Ergebnisse nach Gesamtranking

Die vier Faktoren mit der höchsten Relevanz vereinen 26 % der Gesamtrelevanzsumme in sich; diese sind:

- Verfügbarkeit Bohrgeräte
- Fachkräfte/Ausbildung

- Ausbau/Vernetzung (auch kleiner) Wärmenetze
- Behördliche Auflagen/Genehmigungen

Drei der vier Erfolgsfaktoren mit der höchsten Relevanz, nämlich „*Verfügbarkeit Bohrgeräte*“, „*Ausbau/Vernetzung (auch kleiner) Wärmenetze*“ und „*Behördliche Auflagen/Genehmigungen*“ gehören zum Cluster „Projektumsetzung“, einer zu „Wissen & Ausbildung“.

Die vier Faktoren mit der niedrigsten Relevanz bilden zusammen 10 % der Gesamtrelevanzsumme; diese sind:

- Projektentwicklung
- Lerneffekte
- Projektmanagement
- Bauleistungsversicherung

Die vier Faktoren mit der niedrigsten Relevanz verteilen sich auf alle drei Cluster. **Tiefe und Mitteltiefe Geothermie** sind sinnvoll nur miteinander zu vergleichen; beiden ist die gleiche Relevanzsumme zugeschrieben.

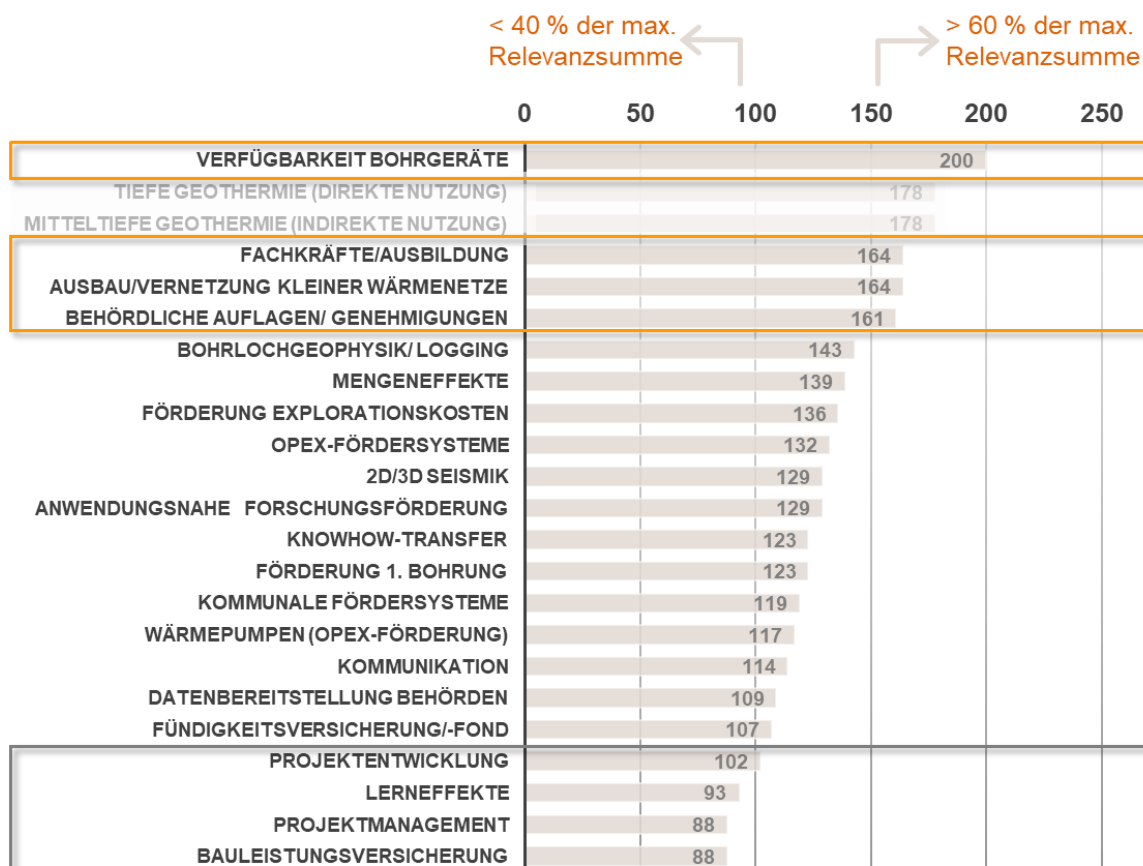


Abb. 7. Ergebnisse der Relevanzanalyse mit Ranking

3.1.2. Ergebnisse nach Cluster-Ranking

Die Relevanzsummen der einzelnen Faktoren wurden anschließend in die drei Cluster

- Projektumsetzung
- Wissen & Ausbildung
- Fördermaßnahmen & Versicherungen

eingeteilt. So konnten der Mittelwert der Relevanzsumme pro Cluster und die über dem Mittelwert liegenden Einflussfaktoren ermittelt werden. In den jeweiligen Clustern liegen die folgenden Einflussfaktoren über dem Cluster-Mittelwert:

Wichtigste Einflussfaktoren pro Cluster		
Projektumsetzung	Wissen & Ausbildung	Fördermaßnahmen & Versicherungen
<ul style="list-style-type: none"> • Verfügbarkeit Bohrgeräte • Ausbau/Vernetzung Wärmenetze • Behördliche Auflagen • Bohrlochgeophysik 	<ul style="list-style-type: none"> • Fachkräfte/Ausbildung 	<ul style="list-style-type: none"> • Förderung Explorationskosten • OPEX-Fördersysteme • Anwendungsnahe Forschungsförderung • Förderung 1. Bohrung • Kommunale Fördersysteme

Dabei ist das Cluster „Projektumsetzung“ gemessen am Mittelwert am wichtigsten. Jedoch liegen die Mittelwerte der drei Cluster nah beieinander, sodass alle Cluster als gleichwertig relevant gewichtet werden können.

Das Gesamtergebnis stellt sich wie folgt dar:

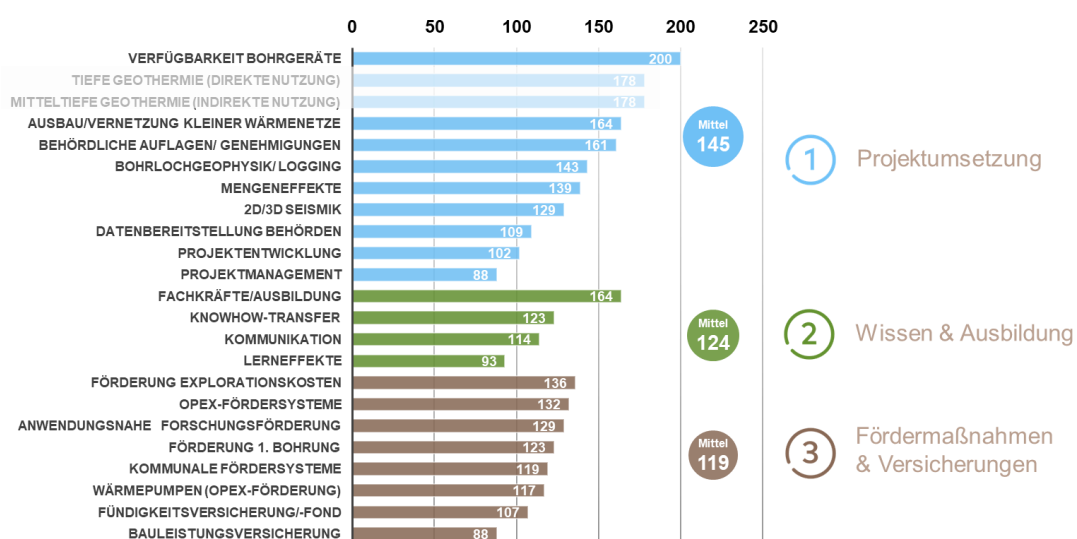


Abb. 8. Sortierung der Relevanzsummen nach Cluster-Ranking

3.2. Matrixdarstellung der Einflussanalyse

Anhand der Einflussmatrix konnten 6.072 direkte Vergleiche durchgeführt werden. Die maximal erreichbare Passiv- oder Aktivsumme beträgt 66. Die höchste Aktivsumme erzielte der Deskriptor „*Knowhow-Transfer*“ mit 47. „*Knowhow-Transfer*“ wird demnach als das Schlüsselement betrachtet, das sich am stärksten auf die anderen Deskriptoren der Geothermiewirtschaft auswirkt. Die höchste Passivsumme erzielte „*Projektentwicklung*“ mit 53. „*Projektentwicklung*“ wird demnach am stärksten von den anderen Deskriptoren beeinflusst.

Das Gesamtergebnis der Einflussmatrix stellt sich wie folgt dar:

Einflussmatrix																									Aktivsummen
"Welchen Einfluss hat der Deskriptor j (Spalte) auf den Deskriptor i (Zeile)?"	Anwendungsnahe Forschungsförderung	Knowhow-Transfer	Lerneffekte	Kommunikation	Fündigkeitsversicherung/-fond	Bauleistungsversicherung	Mitteltiefe Geothermie (indirekte Nutzung)	Tiefe Geothermie (direkte Nutzung)	Datenbereitstellung Behörden	Kommunale Fördersysteme	Projektmanagement	Projektentwicklung	2D/3D Seismik	Förderung 1. Bohrung	Fachkräfte/ Ausbildung	OPEX-Fördersysteme	Ausbau/Vernetzung kleiner Wärmenetze	Wärmepumpen (OPEX-Förderung)	Behördl. Auflagen/ Genehmigungen	Förderung Explorationskosten	Bohrlochgeophysik/ Logging	Mengeneffekte	Verfügbarkeit Bohrgeräte		
Bewertung: 0 = keinen Einfluss, 1 = schwacher Einfluss 2 = mittlerer Einfluss, 3 = starker Einfluss																									
Anwendungsnahe Forschungsförderung		3	2	1	2	0	2	3	1	1	1	2	1	2	2	2	1	0	2	1	2	1	2	2	34
Knowhow-Transfer	2		3	2	2	1	3	3	2	1	3	3	2	3	3	2	2	0	3	1	2	3	1	47	
Lerneffekte	2	2		3	2	1	2	2	1	1	3	3	1	2	2	1	2	1	2	1	2	3	1	40	
Kommunikation	1	3	2		2	1	3	3	1	2	2	3	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	39	
Fündigkeitsversicherung/-fond	1	1	1	1		1	3	3	1	2	2	3	1	3	1	1	1	0	1	2	1	3	2	35	
Bauleistungsversicherung	0	0	1	1	1		2	2	0	1	2	2	0	2	0	0	1	0	1	1	0	2	1	20	
Mitteltiefe Geothermie (indirekte Nutzung)	2	2	2	2	2	1		1	2	2	1	2	1	2	2	1	3	2	2	1	2	2	2	39	
Tiefe Geothermie (direkte Nutzung)	3	2	2	2	2	1	2		2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	3	44	
Datenbereitstellung Behörden	2	2	2	2	3	1	3	3		2	2	3	2	2	1	0	1	0	2	2	2	2	1	40	
Kommunale Fördersysteme	1	1	1	2	1	1	3	2	1		1	2	1	2	1	2	3	2	1	2	1	3	2	36	
Projektmanagement	1	2	2	2	1	1	2	2	1	1		2	1	2	2	1	2	1	1	1	1	2	1	32	
Projektentwicklung	1	2	2	2	1	1	3	3	1	1	2		1	2	1	1	2	1	1	2	1	3	2	36	
2D/3D Seismik	1	1	2	2	3	1	2	3	2	1	2	2		3	1	0	1	0	2	2	2	2	1	36	
Förderung 1. Bohrung	1	1	1	1	2	2	3	3	1	2	2	2	1		1	1	1	1	1	2	2	2	2	35	
Fachkräfte/Ausbildung	2	2	2	1	1	1	3	3	1	1	2	2	2	1		1	2	1	1	1	1	2	2	35	
OPEX-Fördersysteme	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	2	0	1	1		2	1	0	1	1	2	1	25	
Ausbau/Vernetzung kleiner Fernwärmenetze	1	3	2	1	1	1	3	3	1	2	2	2	1	1	1	1		1	1	1	0	2	1	32	
Wärmepumpen (OPEX-Förderung)	1	1	1	1	1	0	3	1	0	2	1	2	0	1	1	2	2		0	0	0	2	1	23	
Behördl. Auflagen/ Genehmigungen	1	1	1	2	2	1	3	3	2	2	3	3	2	2	1	1	2	0		1	2	2	1	38	
Förderung Explorationskosten	1	2	2	1	2	1	3	3	2	2	2	3	3	3	1	1	2	1	1		2	2	2	42	
Bohrlochgeophysik/ Logging	2	2	2	1	2	1	2	3	2	1	2	2	1	1	1	1	0	0	1	1		1	1	30	
Mengeneffekte	2	2	2	2	2	1	2	3	2	1	2	3	2	2	2	2	2	1	1	2	1		3	42	
Verfügbarkeit Bohrgeräte	1	1	1	1	1	1	3	3	0	1	2	3	1	2	2	0	2	1	1	1	1	3		32	
Passivsummen	30	37	37	34	37	21	57	57	27	32	42	53	28	42	31	24	38	16	29	29	29	48	34		

Abb. 9. Ergebnis der Einflussanalyse

3.2.1. Ergebnis zum Impuls-Index

Der Impulsindex ist der Quotient aus Aktiv- und Passivsumme jedes Deskriptors und gilt als ein Maß für die **Eigenkraft**. Deskriptoren mit hohen Impulsindices treiben das Gesamtsystem an. Auch hier gilt: Tiefe und Mitteltiefe Geothermie sind nur miteinander sinnvoll zu vergleichen; beide weisen sehr niedrige Impulsindices auf.

Die Impulsindices für die Deskriptoren stellen sich wie folgt dar:

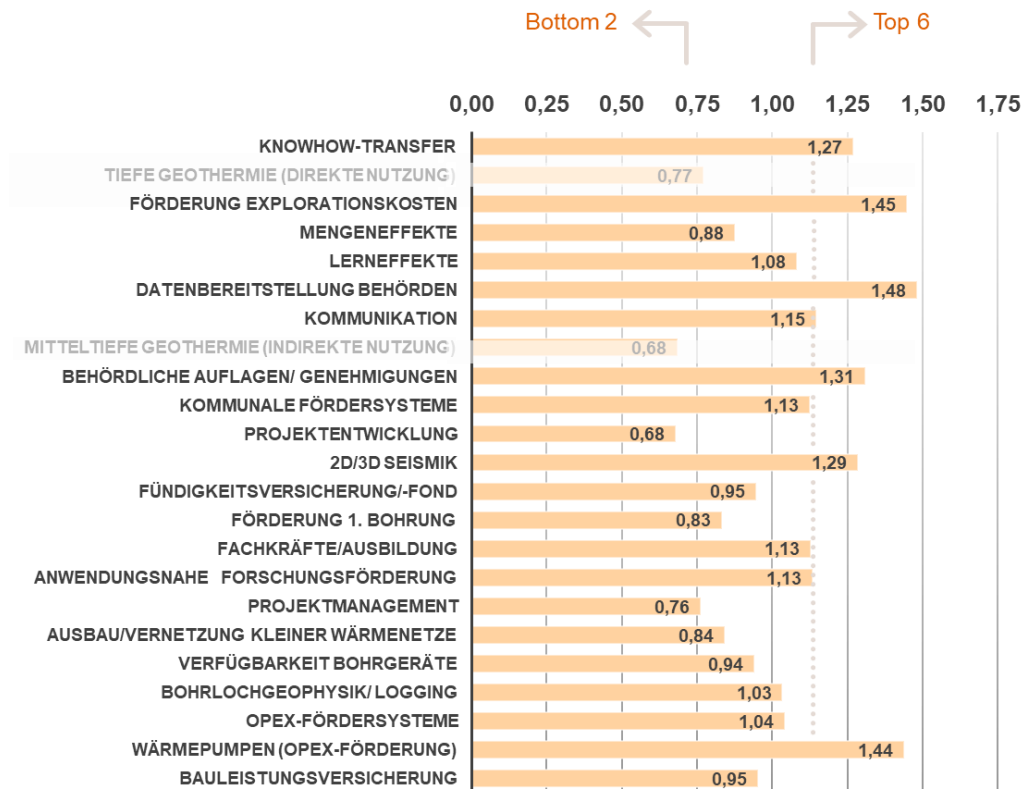


Abb. 10. Ranking der Faktoren nach Impulsindices

Die sechs Deskriptoren mit dem höchsten Einfluss sind

- Wärmepumpen (im Sinne OPEX Förderung),
- Datenbereitstellung durch die Behörden,
- Förderung der Explorationskosten,
- Behördliche Auflagen & Genehmigungen,
- Knowhow-Transfer
- 2D/3D Seismik

und vereinen ein Drittel der Summe aller Impulsindices auf sich. Von diesen Deskriptoren entfallen drei auf das Cluster „Projektumsetzung“, ein weiterer auf „Wissen & Ausbildung“. Zwei gehören zum Cluster „Fördersysteme & Versicherungen“.

Die Deskriptoren mit den niedrigsten Impulsindices sind

- Projektentwicklung und
- Projektmanagement

Sie bilden zusammen 6% der Summe aller Impulsindices und gehören dem Cluster „Projektumsetzung“ an.

3.2.2. Ergebnis zum Dynamik-Index

Der Dynamikindex ist Produkt aus Aktiv- und Passivsumme jedes Deskriptors und stellt ein Maß für die Systemeinbindung dar. Tiefe und Mitteltiefe Geothermie sind sinnvoll nur miteinander zu vergleichen; der Index für die Tiefe Geothermie liegt 25 Prozentpunkte über dem der Mitteltiefen Geothermie.

Die Dynamikindices für die Deskriptoren stellen sich wie folgt dar:

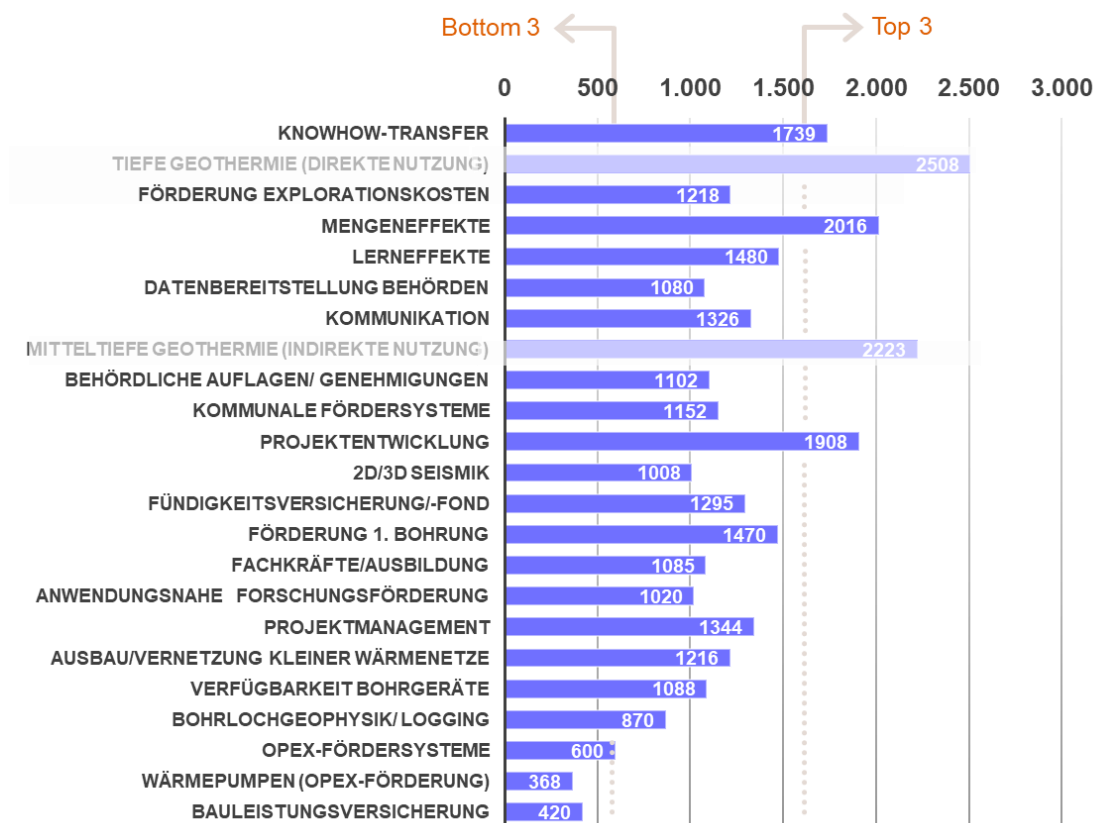


Abb. 11. Ranking der Faktoren nach Dynamikindices

Die drei Deskriptoren mit dem höchsten Dynamikindex sind

- Mengeneffekte,
- Projektentwicklung,
- Knowhow-Transfer

und vereinen etwa 20 % der Summe aller Dynamikindices auf sich. Zwei von ihnen gehören dem Cluster „Projektumsetzung“, einer dem Cluster „Wissen & Ausbildung“ an.

Die drei Deskriptoren mit dem niedrigsten Dynamikindex sind

- Wärmepumpen (im Sinne OPEX Förderung),
- Bauleistungsversicherung,
- OPEX-Fördersysteme

und bilden zusammen weniger als 6% der Gesamtsumme aller Dynamikindices ab. Alle drei sind dem Cluster „Fördersysteme & Versicherungen“ zuzuordnen.

4. Synthese und Prognose

4.1. Die Quadranten des Vier-Felder-Diagramms

Entsprechend ihren Aktiv- und Passivsummen können die Deskriptoren in ein Diagramm eingezeichnet werden, das aus vier Feldern besteht und die Wechselbeziehungen zwischen den Deskriptoren darstellt.

Im oberen linken Quadranten (Feld 1) stehen die aktiven Faktoren, die mehr Einfluss auf andere Faktoren nehmen, als dass sie selbst beeinflusst werden. Die Faktoren können eine enorme Hebelfunktion einnehmen, sofern sie lenkbar sind.

Im unteren rechten Quadranten (Feld 4) stehen dagegen die passiven bzw. reaktiven Faktoren. Sie nehmen wenig Einfluss und werden stark beeinflusst. Diese reaktiven Faktoren gelten als Indikatoren in einem System, da durch ihre Reaktivität Wechselwirkungen mit anderen beispielsweise aktiven oder dynamischen Faktoren festgestellt oder verfolgt werden können.

Im oberen rechten Quadranten (Feld 2) stehen die dynamischen Faktoren. Sie nehmen starken Einfluss und werden stark beeinflusst. Diese Faktoren weisen einen hohen Vernetzungsgrad auf.

Im unteren linken Quadranten (Feld 3) stehen die trägen Faktoren. Sie nehmen kaum Einfluss auf andere Faktoren und sind kaum beeinflussbar. Die trägen Faktoren weisen einen niedrigen Vernetzungsgrad auf.

Im Überblick stellt sich die Charakteristik des Vier-Felder-Diagramms wie folgt dar:

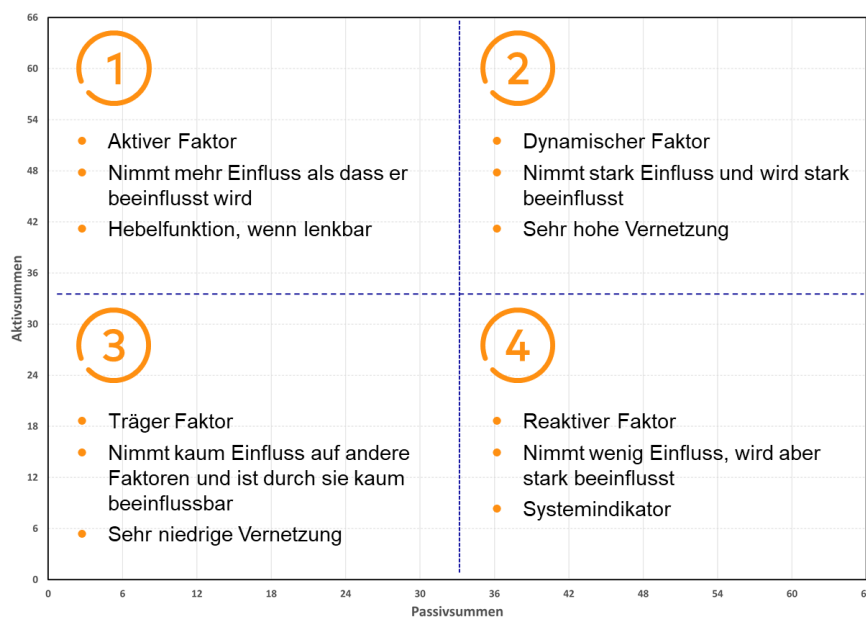


Abb. 12. Vier-Felder-Diagramm zur Interpretation der Einfluss- und Relevanzanalyse

Im folgenden Schritt werden die Deskriptoren in dieses Vier-Felder-Diagramm übertragen.

4.2. Deskriptoren in der Übersicht: Wechselwirkungen im Gesamtsystem

Die Mehrheit der Faktoren ist um den Diagrammmittelpunkt, also den Kreuzungspunkt der vier Felder bzw. um die Feldgrenzen gruppiert (Abb. 13). Dieses Ergebnis spricht für den Reifungsprozess der Geothermiewirtschaft. Dies wird insbesondere im Vergleich zur einer Cross-Impact Analyse von 2013 deutlich, als die Faktoren in die Außenbereiche der Quadranten gefallen sind (pers. Mitteilung T. Kölbel). Der Faktor „Verfügbare Bohrgeräte“ kann als ein Schlüsselement betrachtet werden, da er in der Diagramm-Mitte sowohl mit einem hohen Wert in den dynamischen als auch passiven Quadranten fällt. Wie in der Abbildung 13 zu erkennen ist, spiegelt die Größe der Kugeln, welche die Faktoren repräsentieren, den Größenwert der Passiv- und Aktivsummen und damit ihre Relevanz in den jeweiligen Summen wider.

In das Feld 1 **der aktiven Faktoren** fallen

- Förderung Explorationskosten,
- Datenbereitstellung der Behörden,
- Behördliche Auflagen und Genehmigungen,
- 2D/3D Seismik,
- Anwendungsnahe Forschungsförderung,
- Fachkräfte/Ausbildung und
- Kommunale Fördersysteme.

In das Feld 2 **der dynamischen Faktoren** fallen

- Verfügbare Bohrgeräte,
- Mengeneffekte,
- Knowhow-Transfer,
- Kommunikation,
- Lerneffekte,
- Förderung der 1. Bohrung,
- Fündigkeitsversicherung/-fond und
- Projektentwicklung.

In das Feld 3 **der trägen Faktoren** fallen

- Bohrlochgeophysik/Logging,
- Wärmepumpen (im Sinne der OPEX-Förderung),
- OPEX-Fördersysteme und
- Bauleistungsversicherung.

In das Feld 4 **der passiven Faktoren** fallen zum Grenzbereich zu den dynamischen Faktoren in Feld 2

- Verfügbare Bohrgeräte,
- Ausbau/Vernetzung kleiner Wärmenetze und
- Projektmanagement.

In dem Ergebnis in Abb. 13 können die folgenden Beobachtungen gemacht werden:

- Die **Verfügbarkeit von Bohrgeräten** weist die höchste Relevanzsumme auf. Es folgen mit etwas Abstand **Fachkräfte/ Ausbildung**, **Vernetzung/Ausbau** von FW-Netzen sowie **Behördliche Auflagen/Genehmigungen**.
- Den höchsten Impulsindex haben die **Behördliche Datenbereitstellung** sowie die **Förderung der Explorationskosten** und die **Betriebskosten von Wärmepumpen**.
- **Mengeneffekte**, die **Behördlichen Auflagen/Genehmigungen** und der **Knowhow-Transfer** weisen den höchsten Dynamikindex auf.
- Insgesamt **sieben Deskriptoren im Feld 1** bieten die Option einer **Hebelfunktion**.

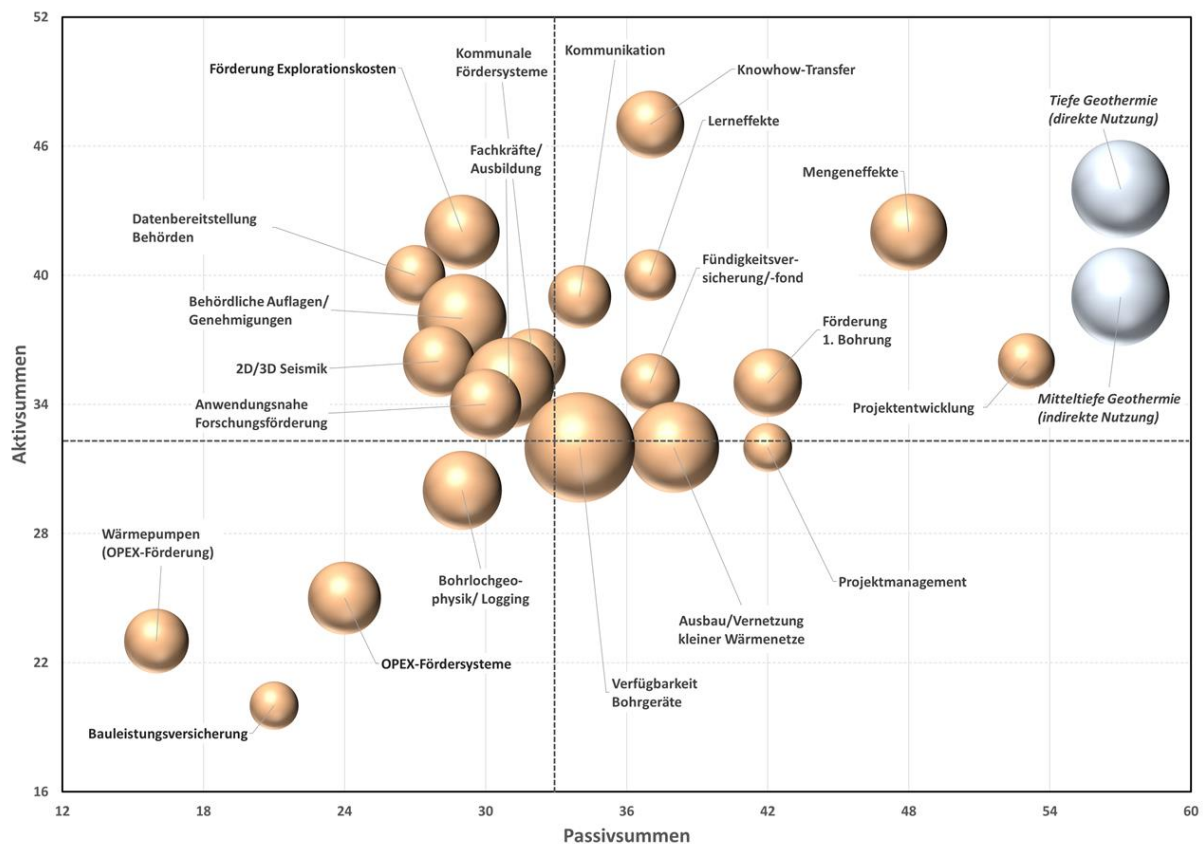


Abb. 13. Vier-Felder-Diagramm mit allen Faktoren der Geothermiewirtschaft. Die Größe der Kugeln spiegelt den Größenwert der Relevanzsumme wider.

Im Folgenden werden nun die einzelnen Cluster untereinander bewertet.

4.2.1. Impact des Clusters Projektumsetzung

Die Faktoren dieser Gruppe weisen vergleichsweise hohe Relevanzsummen und hohe Dynamikindizes auf.

Die **Verfügbarkeit von Bohrgeräten** weist die **höchste Relevanz** unter allen Faktoren auf.

Auflagen/ Genehmigungen und die **Datenbereitstellung** seitens der Behörden besitzen **sehr hohe Impulsindizes**. **Mengeneffekte** und die **Projektentwicklung** zeigen sehr hohe Dynamikindizes. Die **behördlichen Auflagen/Genehmigungen** und die **2D/3D Seismik** haben eine Hebelfunktion.

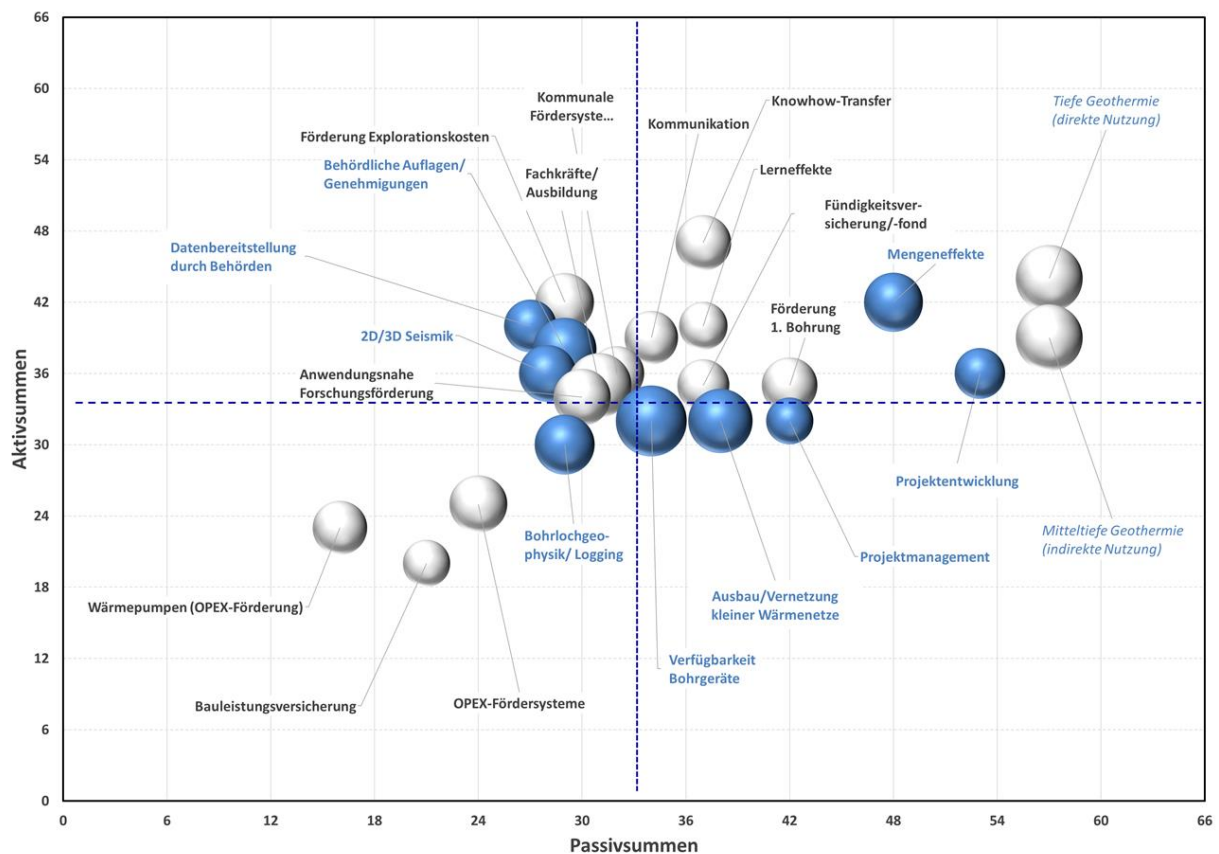


Abb. 14. Das Vier-Felder-Diagramm des Clusters „Projektumsetzung“. Die entsprechenden Faktoren des Clusters sind blau markiert.

4.2.2. Impact des Clusters Ausbildung und Wissen

Das Schlüsselement **Fachkräfte/Ausbildung** weist in dieser Gruppe die höchste Relevanz auf. Der **Knowhow-Transfer** besitzt einen hohen Impulsindex. Der Knowhow-Transfer besitzt zudem mit den höchsten, die **Lerneffekte** einen immer noch hohen Dynamikindex. Der Faktor **Fachkräfte/Ausbildung** hat eine Hebelfunktion.

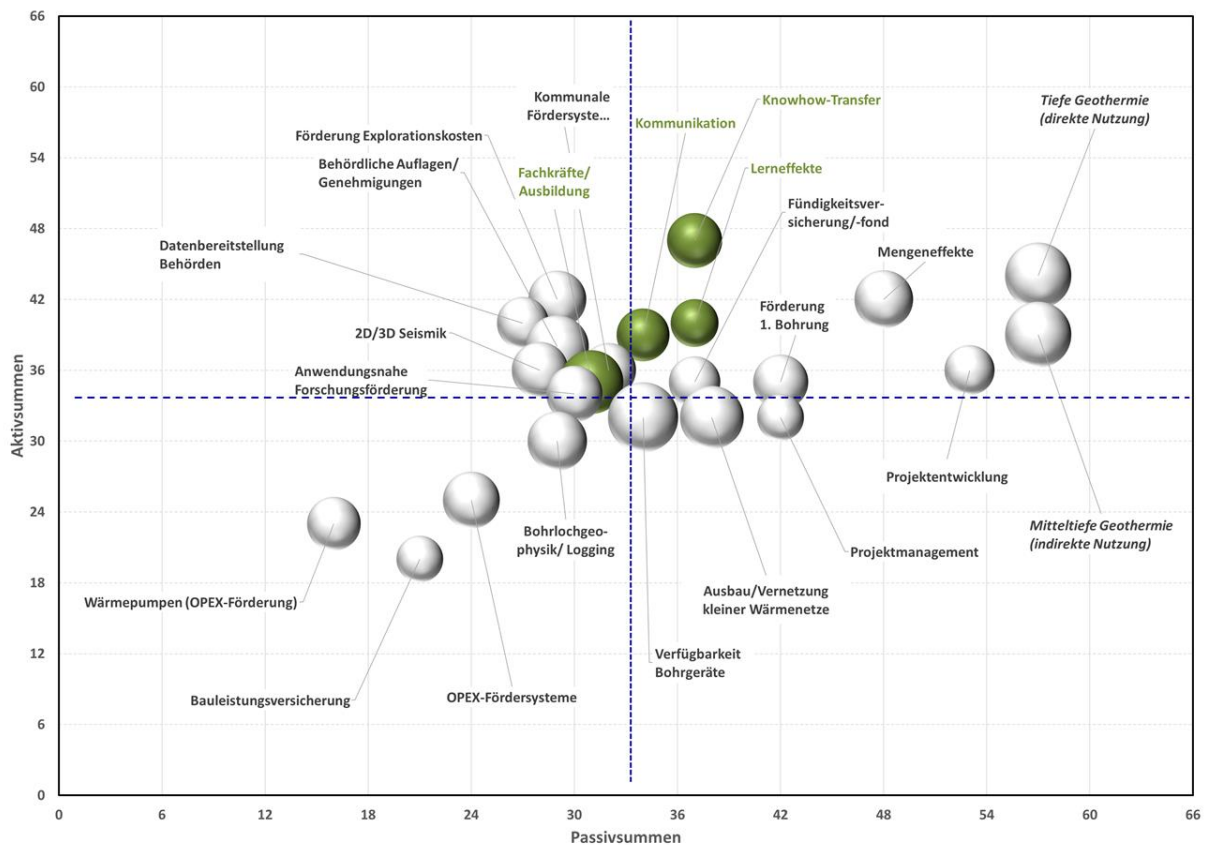


Abb. 15. Das Vier-Felder-Diagramm des Clusters „Ausbildung und Wissen“. Die entsprechenden Faktoren des Clusters sind grün markiert.

4.2.3. Impact des Clusters Fördersysteme und Versicherungen

Die Faktoren dieser Gruppe weisen vergleichsweise niedrige bis mittlere Relevanzsummen auf.

Eine **Förderung der Explorationskosten** und die **OPEX-Förderung von Wärmepumpen** haben einen sehr hohen Impulsindex. Alle Deskriptoren dieser Gruppe besitzen mittlere bis sehr niedrige Dynamikindices. Die **Förderung der Explorationskosten**, **Kommunale Fördersysteme** und die **Anwendungsnahe Forschungsförderung** haben eine **Hebelfunktion**.

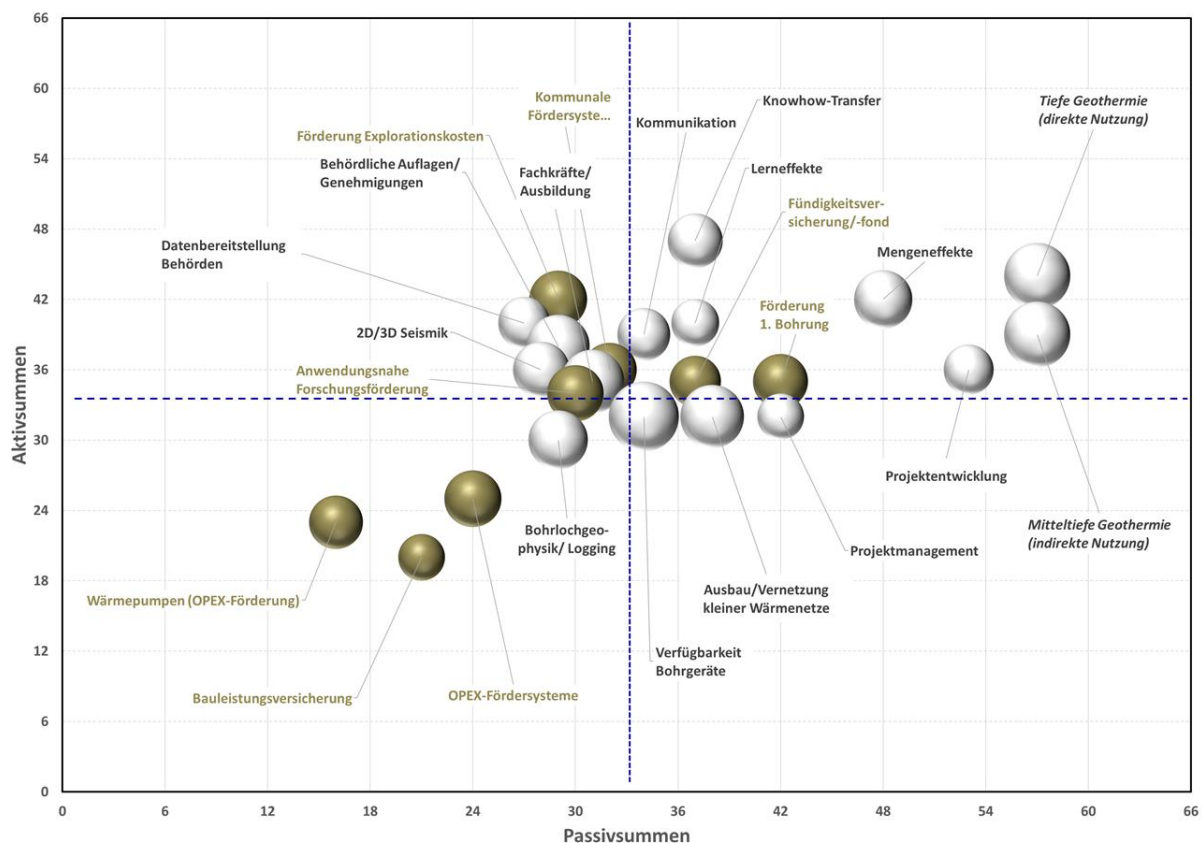


Abb. 16. Das Vier-Felder-Diagramm des Clusters „Fördersysteme und Versicherungen“. Die entsprechenden Faktoren des Clusters sind olivgrün markiert.

4.3. Prognose: Potenzielle Schlüsselfaktoren zum beschleunigten Ausbau der Tiefen Geothermie

Die Faktoren lassen sich in potenzielle Schlüsselfaktoren mit hoher Relevanz, großer Hebel-funktion, hohem Impulsindex und hohem Dynamikindex sortieren (Abb. 17). Mit dieser Zusammenstellung wird deutlich, welche Faktoren den Ausbau der Geothermie beschleunigen können und damit Schlüsselfaktoren sind.

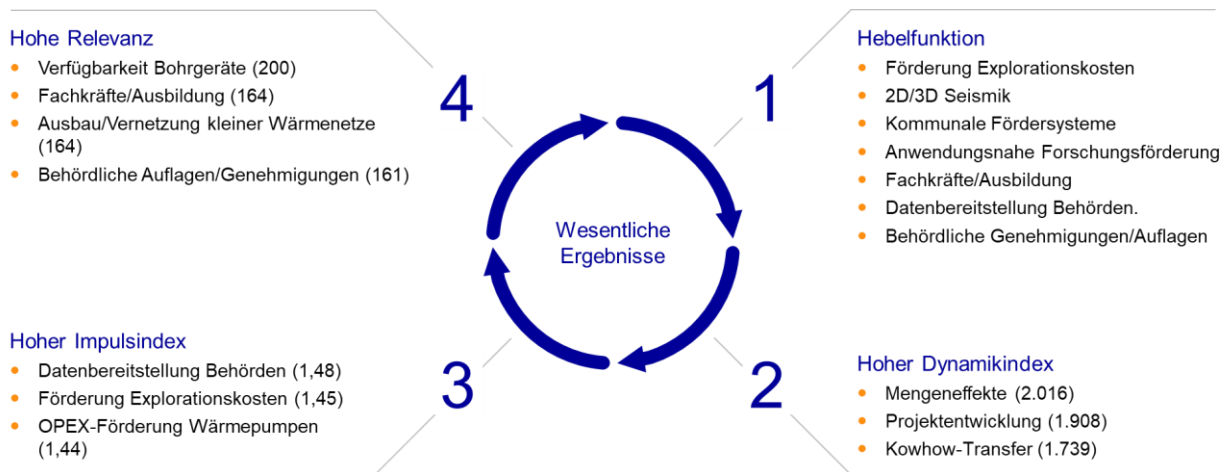


Abb. 17. Potenzielle Schlüsselfaktoren zum beschleunigten Ausbau der Geothermie aus Sicht der Geothermiewirtschaft.

Zukünftig könnte die **Speicherung von überschüssiger Wärme** in Aquiferspeichern (ATES = aquifer thermal energy storage) bei der **Transformation von Fernwärmenetzen eine wachsende Rolle** spielen. Geothermische Energie wird insbesondere für die Bereitstellung von Grundlastwärme genutzt, die hierfür wegen der niedrigen Betriebskosten prädestiniert ist. Geothermische Heizanlagen werden außerhalb der Heizsaison teilweise oder ganz abgeschaltet, was letztendlich dazu führt, dass das volle Potential der Wärmequelle nicht ausgeschöpft wird. **Mit der Integration von saisonalen Aquiferspeichern** besteht die Möglichkeit, **die Volllaststunden der Geothermieranlagen zu erhöhen**, die Auswirkungen der hohen Kapitalkosten zu verringern und die Wettbewerbsfähigkeit der Geothermie zu erhöhen. Hochtemperatur-Aquiferspeicher (HT-ATES) können auch lokale Wärmequellen Übertage (z.B. industrielle Abwärme oder Solarthermie) nutzen und somit die Flexibilität und Resilienz der städtischen Wärmeversorgung im Rahmen einer Kreislaufwirtschaft verbessern. Der großflächigen Nutzung von Aquiferspeichern stehen noch diverse Fragestellungen gegenüber, beispielsweise die Frage nach den Auswirkungen auf den geologischen Untergrund aber auch nach der effizienten Einbindung im Gesamtenergiesystem betreffend. Diese Fragen könnten durch **Piloten eines Tiefen Aquiferspeichers** innerhalb eines urbanen, geothermisch getriebenen Wärmesystems analysiert und beantwortet werden.

4.4. Handlungsempfehlungen für das Ausbauziel 10 TWh/a Wärmeenergie aus Tiefer Geothermie in 2030 nach Experteneinschätzung der Industrie

Besondere Relevanz weist die **Verfügbarkeit von Bohrgeräten** auf. Werden mögliche Wechselwirkungen der Schlüsselfaktoren hergestellt, so ist zu erwarten, dass die Förderung der Explorationskosten sowie Mengeneffekte einen positiven Einfluss auf diesen Aspekt nehmen (Abb. 18).

Ein weiteres wesentliches Element ist der **Fachkräftemarkt** und die **Ausbildung**. Vor allem die **Anwendungsnahe Forschungsförderung** und ein **Knowhow-Transfer** aus der Industrie sind für die Unterstützung geeignet.

Der **Ausbau** und die **Vernetzung** gerade von **kleinen Wärmenetzen** wird als ein weiterer Treiber für deutlich mehr Wärme aus Geothermie betrachtet. Vor allem **kommunale Fördersysteme** können hier flankierende Wirkung ausüben.

Als Faktor mit signifikanter Aktivsumme hat die **Förderung der Explorationskosten** einen positiven Einfluss auf die **Marktbereitung**. Durch eine hohe Explorationstätigkeit werden Anreize für die ausführenden Bohrunternehmen zum **Bau oder zur Beschaffung von Bohrgeräten** aus dem Weltmarkt geschaffen. Wie aus der Beispielregion München zu erkennen ist, verbessert eine hohe Explorationstätigkeit die Datenlage, wodurch Informationslücken gefüllt werden, durch die bessere Datenlage kann die kostenintensive Explorationsphase effizienter ausgeführt werden und führt damit zu einer Dämpfung der hohen Anfangsinvestitionen. Eine erfolgreiche Explorationstätigkeit führt zudem zu **Nachahmer-Projekten** und mithin zu **Mengeneffekten**, so dass mittelfristig mit einer durch die Geothermiewirtschaft selbstgetragenen Explorationstätigkeit zu rechnen ist. Wichtig ist bei der **Förderung der Explorationstätigkeit**, dass nicht nur die **2D/3D Seismik** sondern auch die **1. Bohrung als Exploration** erfasst wird. Nur so wird ein positives Signal an die Bohrunternehmen gesendet, die den wichtigen Faktor „Verfügbarkeit von Bohrgeräten“ bedienen können.

Behördliche Genehmigungen und Auflagen sind ein wichtiger Hebel beim Ausbau der Geothermie im Wärmesektor. Der **Knowhow-Transfer** zwischen den Behörden und mit der Industrie, ist geeignet, um unnötige Hemmnisse zu beseitigen.

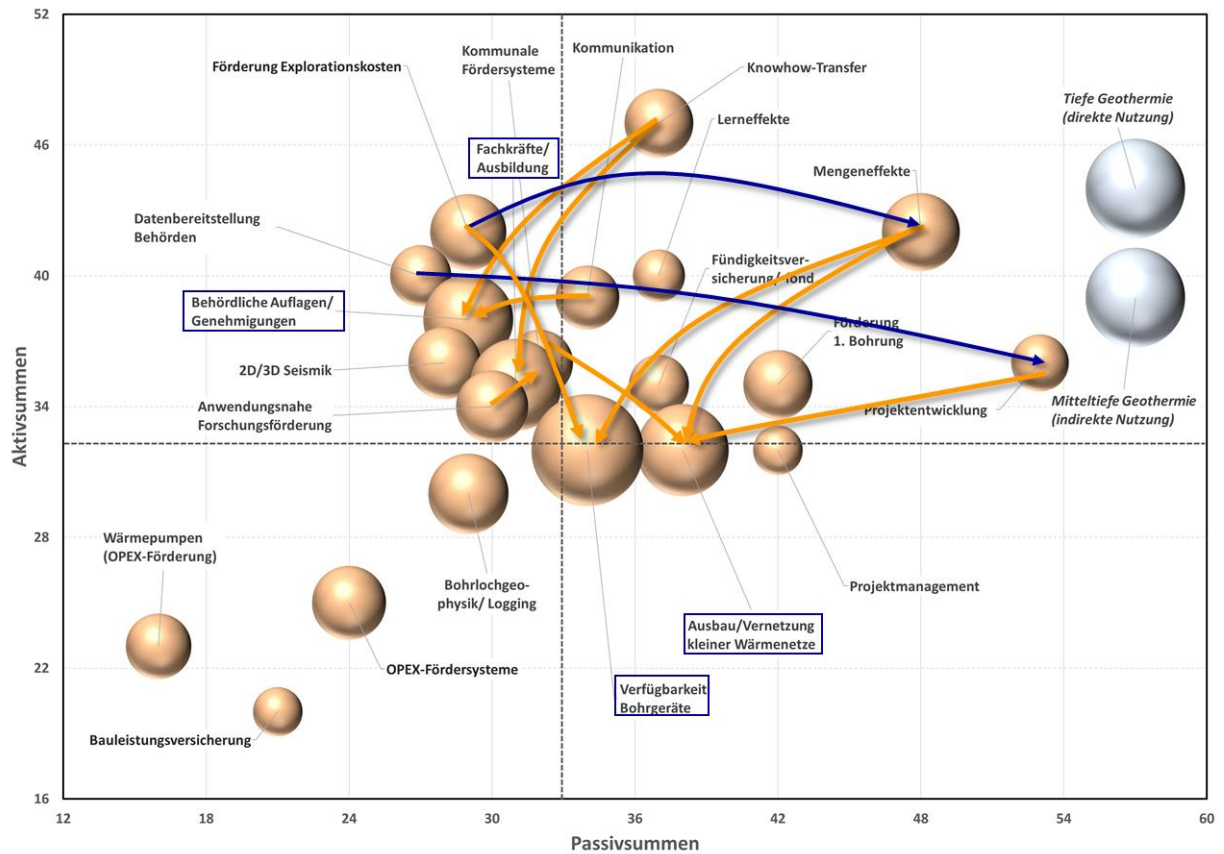


Abb. 18. Wechselwirkungen der Schlüsselfaktoren zum geothermischen Ausbau in Deutschland

5. Annex

Teilnehmende, Zusammensetzung der Expertengruppe

Name	Institution/Firma
Bauer, Wolfgang	360plusconsult
Bissmann, Silke	DMT
Bruchmann, Ullrich	BMWK
Ertle, Stefan	EnBW Energie Baden-Württemberg
Geisinger, Wolfgang	Geothermie Unterhaching
Keim, Maximilian	SWM Stadtwerke München
Kölbel, Thomas	EnBW Energie Baden-Württemberg
Krüger, Sven	Baker Hughes
Merkelbach, Robert	Neptune
Moeck, Inga	LIAG
Richter, Alexander	INNARGI
Röhling, Simone	BGR
Schädle, Karl-Heinz	E-Axiom
Schneider, Jochen	Enerchange
Schröder, Hartwig	ENEX
Seibt, Peter	GTN
Schindler, Uwe	Angers Söhne
Schindler, Daniel	Angers Söhne

Glossar

Aktivsumme	Am rechten Ende jeder Zeile [der Einflussmatrix] wird die Summe aller Spaltenwerte pro Zeile aufgeführt. Dieser wird als Aktivsumme bezeichnet und stellt dar, wie stark der Faktor der Zeile andere Faktoren beeinflusst. Je höher die Aktivsumme, desto höher ist der Einfluss des Faktors auf andere Faktoren. (Definition von Gausemeier/Plass, 2014, S. 52).
BGR	Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe ist eine technisch-wissenschaftliche Oberbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz.
Cluster	Als einheitliches Ganzes zu betrachtende Menge von Einzelteilchen, im Falle der vorliegenden Arbeit wurden für den Ausbau der Geothermie relevante Faktoren in drei übergeordnete Cluster zusammengefasst.
Cross-Impact Analyse	Die Cross-Impact Analyse ist eine Analysemethode, ist eine traditionelle, in den 1960er Jahren entwickelte Analysemethode. Sie verwendet Experteneinschätzungen, um die Interdependenzen komplexer, interdisziplinärer Systeme zu diskutieren, zu formulieren und zu analysieren.
Deskriptor	Ein Deskriptor ist der Faktor, welcher als wichtig für den Ausbau der Geothermie herausgearbeitet wurde. Deskriptoren werden für die Durchführung der Einflussanalyse herangezogen.
Dynamikindex	Der Dynamikindex ist das Produkt aus Aktiv- und Passivsumme jedes Deskriptors und damit ein Maß für dessen Systemeinbindung. Je höher der Dymnamikindex eines Faktors, desto stärker ist seine Wirkung auf den Ausbau der Tiefengeothermie.
Einflussanalyse	Eine Einflussanalyse zeigt auf, wie stark sich die Deskriptoren gegenseitig beeinflussen. Die aktive Einflussnahme von einem Deskriptor auf weitere Deskriptoren, sowie die passive Beeinflussbarkeit durch andere Deskriptoren.
Faktor	die von den Experten als "wichtig" eingestufte Variable. Die ausgewählten Faktoren werden für die Durchführung der Relevanzanalyse herangezogen
Feldgrenze	Linie, welche die Quadranten begrenzt.
FW-Netz	Fernwärmenetz
Hebelfunktion	Faktoren, die mehr Einfluss auf andere Faktoren nehmen, als sie selbst beeinflusst werden, können eine Hebelfunktion einnehmen sofern die lenkbar sind. Faktoren, die eine Hebelfunktion aufweisen, können andere Faktoren auf ein höheres Level "hebeln". Hierfür wird weniger Energie benötigt, als sonst für den Weg benötigt worden wäre.

Impulsindex	Maß für die Eigenkraft. Der Impulsindex beschreibt den Einfluss eines Faktors, ohne dass dieser selbst von anderen Faktoren beeinflusst wird.
Inter- und Transdisziplinarität	In einem interdisziplinären Vorhaben arbeiten Forschende aus verschiedenen Disziplinen zusammen, in einem transdisziplinären Vorhaben arbeiten Forschende aus verschiedenen Disziplinen mit Praxisakteuren zusammen.
Kreuzungspunkt	Schnittpunkt der Feldgrenzen(-linien).
LIAG	Das Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik mit Sitz in Hannover ist als eine Anstalt öffentlichen Rechts eine eigenständige, außeruniversitäre Forschungseinrichtung für angewandte Geophysik unter besonderer Berücksichtigung der Geowissenschaften.
Matrix	In der Mathematik beschreibt eine Matrix die Anordnung von Elementen in Form einer Tabelle.
Metastudie	Eine Metastudie ist eine quantitativ-statistische Zusammenfassung anderer Arbeiten.
Passivsumme	Um unteren Ende jeder Spalte [der Einflussmatrix] wird die Spaltensumme gebildet. Diese Passivsumme gibt Aufschluss darüber, wie stark der Faktor der Spalte von anderen Faktoren beeinflusst wird. Je größer die Passivsumme, desto stärker wird der Faktor von anderen Faktoren beeinflusst. (Definition von Gausemeier/Plass, 2014, S. 52).
Relevanzanalyse	Eine Relevanzanalyse beschreibt die Wirkungsstärke eines Faktors auf den Untersuchungsgegenstand - wie den Ausbau der Tiefengeothermie.
Relevanzmatrix	Die Relevanzmatrix ist eine tabellarische Darstellung, um die Relevanzsummen zu errechnen.
Relevanzsumme	Die Relevanzsumme ist die Summe aller Werte pro Zeile einer Relevanzmatrix. Je höher die Relevanzsumme, desto bedeutender ist ein Faktor für das Untersuchungsfeld - den Ausbau der Tiefengeothermie.
Schlüsselement / Schlüsselfaktor	Schlüsselfaktoren sind die prägendsten Faktoren für den Ausbau der Tiefengeothermie, i.d.R. Faktoren mit hoher Relevanz und starker Vernetzung im System durch hohe Wechselwirkungen mit anderen Faktoren.
Stakeholder	Personen(-gruppen), die ein berechtigtes Interesse an einem Projekt haben.

Systemdynamik	In der Systemdynamik werden die Dynamiken von Systemen untersucht. In der Cross-Impact Analyse wird KEIN Prozess, sondern eine Momentaufnahme abgebildet.
Systemindikator	Ein Systemindikator beschreibt Faktoren, die wenig Einfluss auf andere Faktoren nehmen, gleichzeitig jedoch stark beeinflusst werden. Sie stehen im unteren rechten Quadranten.
TWh/a	Terawattstunden pro Jahr
Wechselwirkungsanalyse	Die Wechselwirkungsanalyse ist das deutsche Synonym für die Cross-Impact Analyse.
wichten	Unter Gewichtung versteht man die Beurteilung von einzelnen Einflussfaktoren hinsichtlich ihrer Wichtigkeit. Sie führt dazu, dass einflussreichere (stark wichtende) Elemente größeren Einfluss auf den Untersuchungsgegenstand haben.

Bezeichnungen, Fachbegriffe

Variablen	unterschiedliche Größen in der Tiefengeothermie-Branche
Faktoren	die von den Experten als "wichtig" eingestufte Variable. Die ausgewählten Faktoren werden für die Durchführung der Relevanzanalyse herangezogen
Erfolgsfaktoren	Faktoren mit den höchsten Relevanzsummen werden als Erfolgsfaktoren bezeichnet
Deskriptoren	die von den Experten als "wichtig" eingestufte Faktoren. Diese werden in der Einflussanalyse als Deskriptoren bezeichnet.
Schlüsselfaktoren	Schlüsselfaktoren sind die prägendsten Faktoren für den Ausbau der Tiefengeothermie, i.d.R. Faktoren mit hoher Relevanz und starker Vernetzung im System

Schematische Erläuterung der Fachbegriffe, Tabellen und Grafiken

