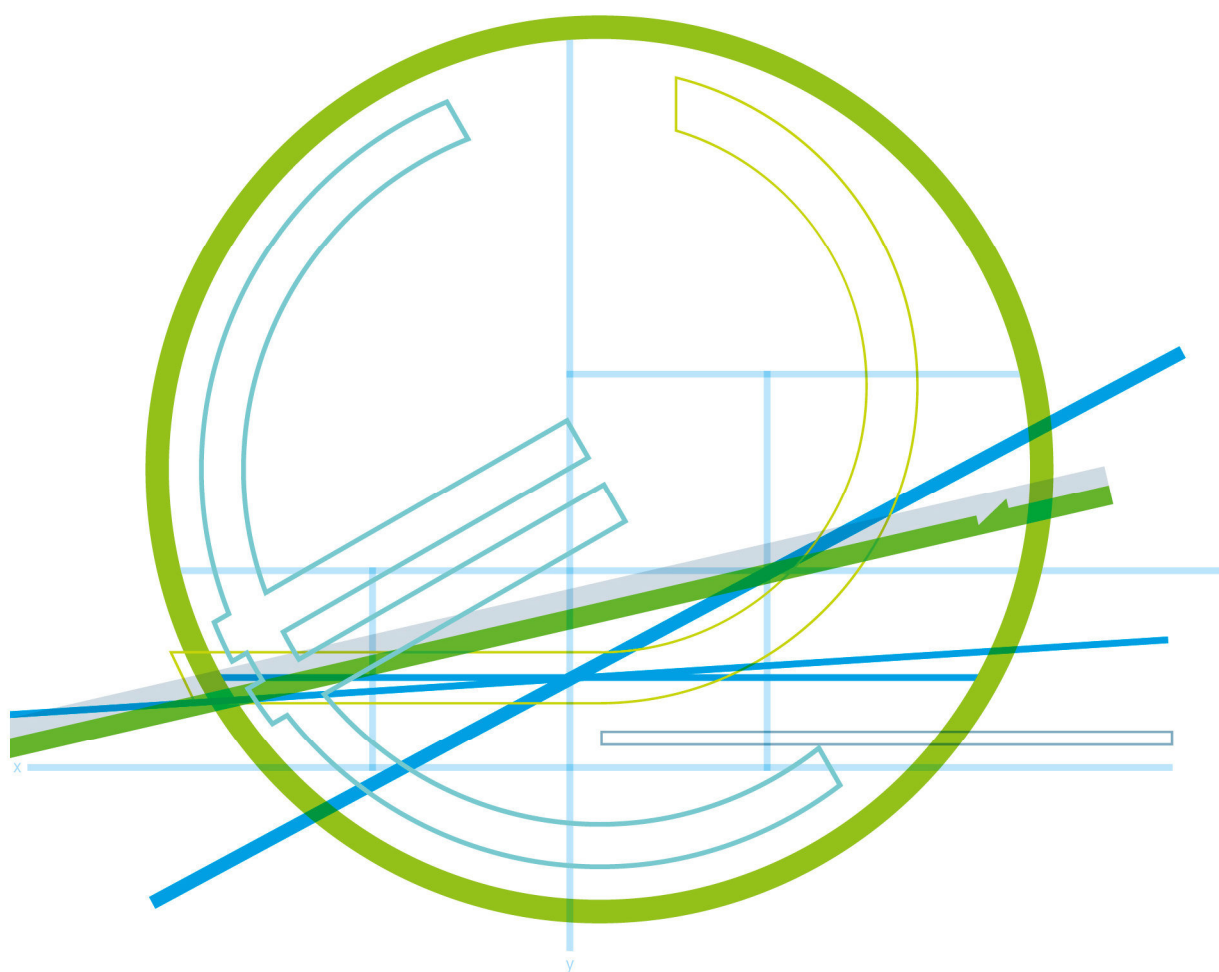


## Windatlas und Windpotentialstudie Österreich



## VORWORT

Die Publikationsreihe **BLUE GLOBE REPORT** macht die Kompetenz und Vielfalt, mit der die österreichische Industrie und Forschung für die Lösung der zentralen Zukunftsaufgaben arbeiten, sichtbar. Strategie des Klima- und Energiefonds ist, mit langfristig ausgerichteten Förderprogrammen gezielt Impulse zu setzen. Impulse, die heimischen Unternehmen und Institutionen im internationalen Wettbewerb eine ausgezeichnete Ausgangsposition verschaffen.

Jährlich stehen dem Klima- und Energiefonds bis zu 150 Mio. Euro für die Förderung von nachhaltigen Energie- und Verkehrsprojekten im Sinne des Klimaschutzes zur Verfügung. Mit diesem Geld unterstützt der Klima- und Energiefonds Ideen, Konzepte und Projekte in den Bereichen Forschung, Mobilität und Marktdurchdringung.

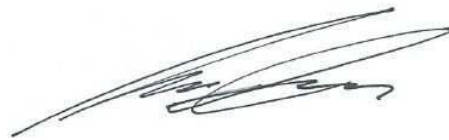
Mit dem **BLUE GLOBE REPORT** informiert der Klima- und Energiefonds über Projektergebnisse und unterstützt so die Anwendungen von Innovation in der Praxis. Neben technologischen Innovationen im Energie- und Verkehrsbereich werden gesellschaftliche Fragestellung und wissenschaftliche Grundlagen für politische Planungsprozesse präsentiert. Der **BLUE GLOBE REPORT** wird der interessierten Öffentlichkeit über die Homepage [www.klimafonds.gv.at](http://www.klimafonds.gv.at) zugänglich gemacht und lädt zur kritischen Diskussion ein.

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm „Neue Energien 2020“. Mit diesem Programm verfolgt der Klima- und Energiefonds das Ziel, durch Innovationen und technischen Fortschritt den Übergang zu einem nachhaltigen Energiesystem voranzutreiben.

Wer die nachhaltige Zukunft mitgestalten will, ist bei uns richtig: Der Klima- und Energiefonds fördert innovative Lösungen für die Zukunft!

A handwritten signature in black ink, reading 'Theresia Vogel'.

Theresia Vogel  
Geschäftsführerin, Klima- und Energiefonds

A handwritten signature in black ink, reading 'Ingmar Höbarth'.

Ingmar Höbarth  
Geschäftsführer, Klima- und Energiefonds

## Inhaltsverzeichnis

|                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------|----|
| Kurzfassung .....                                                    | 2  |
| Abstract .....                                                       | 3  |
| 1 Einleitung .....                                                   | 4  |
| 1.1 Aufgabenstellung .....                                           | 4  |
| 1.2 Schwerpunkte des Projektes .....                                 | 4  |
| 1.3 Einordnung in das Programm .....                                 | 5  |
| 1.4 Verwendete Methoden .....                                        | 9  |
| 1.5 Aufbau der Arbeit .....                                          | 9  |
| 2 Inhaltliche Darstellung .....                                      | 11 |
| 2.1 Aufbereitung der Winddaten (AP2) .....                           | 11 |
| 2.2 Windmodellierung (AP3) .....                                     | 12 |
| 2.3 Kriterien für die Berechnung des Windkraftpotentials (AP4) ..... | 25 |
| 2.4 Potentialmodellierung (AP5) .....                                | 28 |
| 2.5 Dissemination (AP 6) .....                                       | 40 |
| 3 Ergebnisse und Schlussfolgerungen .....                            | 41 |
| 4 Ausblick und Empfehlungen .....                                    | 44 |
| 5 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis .....                          | 46 |
| 6 Literaturverzeichnis .....                                         | 48 |

## Kurzfassung

Bis dato wurden bei Windressourcenberechnungen für das österreichische Bundesgebiet vereinfachte Modellansätze gewählt, die den komplexen Anforderungen nicht entsprechen konnten. Bei darauf aufbauenden Windpotentialabschätzungen wurden für Windenergieprojekte wesentliche Einflussgrößen wie Wirtschaftlichkeit und technische Entwicklung der Anlagen ausgeklammert. Dies führte in Kombination mit der Verwendung der verfälschten Windgeschwindigkeiten zu großen Unsicherheiten in den Ergebnissen bisheriger Windpotentialabschätzungen.

Ziel des vorliegenden Projektes ist daher die Erstellung einer hoch aufgelösten Windressourcenkarte mit einer darauf aufbauenden umfassenden Potentialmodellierung.

Als Berechnungsansatz wurde die Verschränkung einer neuen Form der dynamischen Modellierung mit einem geo-statistischen Interpolationsverfahren gewählt, wobei die Qualität der Ergebnisse durch die Einbindung einer hohen Anzahl von qualitativen Windmessdaten und Energieerträgen von bestehenden Windkraftanlagen stark verbessert wurde.

Darauf aufbauend wurde eine WebGIS-Applikation programmiert, die es dem User erlaubt, anhand veränderbarer Einflussgrößen das in Österreich theoretisch maximal mobilisierbare Windenergiepotential zu simulieren. Die Ergebnisse werden für die jeweils vom User ausgewählten technischen, raumordnungsrelevanten und wirtschaftlichen Kriterien in Form von bezirksweise aggregierter, installierbarer Leistung und aliquotem Energieertrag ausgewiesen. Um zu gewährleisten, dass der verwendete Kriterienkatalog unparteiisch ist, wurde dieser im Zuge von Expertenworkshops definiert.

Die Ergebnisse der Windmodellierung wurden als Windatlas Österreichs gemeinsam mit den Ergebnissen der Potentialmodellierungen auf der Projekthomepage ([www.windatlas.at](http://www.windatlas.at)) der Öffentlichkeit zugänglich gemacht.

## Abstract

Up to now simplified models have been used for the calculation of the wind resources in Austria, which could not correspond to the complex situation. In wind potential estimations based on those simulations, parameter crucial for wind energy projects like technical development of turbines and profitability have been factored out. In combination with the usage of not accurate wind resource estimations this caused severe uncertainties in the results of existing wind potential estimations.

Aim of this study is therefore the elaboration of a detailed wind resource map with a high resolution and the subsequent comprehensive modelling of the Austrian wind potential.

For the calculation of the wind resources a combination of a dynamic model together with a geo-statistical interpolation method has been used for the first time, whereupon the quality of the results is improved through the integration of high quality wind measurement data and energy yields of existing wind turbines.

Based on this first project result a Web GIS application has been programmed, which allows the user to simulate theoretically maximal achievable Austrian wind energy potentials using alterable parameters. Based on the user selected technical, economic and topographic criteria the results are displayed on a district level in the form of installable power and aliquot energy output. In order to assure that the list of criteria that (used in this application) is unbiased, it has been defined in the course of workshops with international experts and stakeholders.

The results of the wind modelling are made open to the public as a wind atlas for Austria together with results of the wind potential simulations on the project homepage ([www.windatlas.at](http://www.windatlas.at)). In this context the feasible wind energy potential is illustrated on a district level for different scenarios and diversifying technical and economical conditions, respectively.

## 1 Einleitung

### 1.1 Aufgabenstellung

Insbesondere aufgrund der Vielschichtigkeit der Orographie sind die österreichischen Windressourcen gekennzeichnet durch eine Vielzahl von lokalen Winden, 'Low Level Jets' und überregionalen Windströmungen. Da diese unterschiedlichen Windsysteme sich gegenseitig sehr stark überlagern, ist eine exakte Berechnung der Windverhältnisse weder durch Stand-alone Anwendung dynamischer Modelle noch geo-statistischer Verfahren möglich.

Die Ergebnisse bisheriger Abschätzungen des realisierbaren jährlichen Windkraftpotenzials in Österreich weisen eine große Bandbreite von 3 TWh bis 20 TWh [1] auf. Bei diesen Studien wurden in den meisten Fällen nur Kriterien der Raumordnung berücksichtigt, aber andere wesentliche Kriterien wie technische Realisierbarkeit und wirtschaftliche Rentabilität sind vernachlässigt worden. Des Weiteren wurden die Parameter (wie Anlagengröße oder einzuhaltende Bauabstände) vorab festgelegt, wodurch die Simulationen auf einzelne Szenarien limitiert waren. Dieser stark vereinfachte Ansatz in Kombination mit Windkarten unbekannter Qualität führte zu hohen Ungenauigkeiten und geringer Aussagekraft der Ergebnisse.

Um diese Mängel zu überwinden wurde das Projekt "Windatlas und Windpotenzialstudie Österreich" ([www.windatlas.at](http://www.windatlas.at)), gefördert durch den Österreichischen "Klima- und Energiefonds", initiiert. Ziel dieser Studie war einerseits die Berechnung einer möglichst detaillierten Windkarte (Auflösung 100 m × 100 m) bekannter Fehlercharakteristik mittels eines neu entwickelten, kombinierten Modellierungsansatzes und andererseits sollte darauf aufbauend eine Möglichkeit zur umfassenden und dynamischen Abschätzung von Windkraftpotenzialen geschaffen werden.

### 1.2 Schwerpunkte des Projektes

Entsprechend der oben beschriebenen Aufgabenstellung wurden folgende Schwerpunkte bearbeitet:

- Der erste Schwerpunkt der inhaltlichen Arbeit war die Sammlung, Evaluierung und Aufbereitung qualitativ hochwertiger Windmessdaten. Insgesamt flossen Daten von in Summe 254 Stationen ein.
- Mit dem dynamischen Modell MM5 [2] wurden die atmosphärischen Prozesse eines klimatologisch relevanten Zeitraumes von 10 Jahren (1981 bis 1990) mit einer horizontalen Auflösung von 2 km × 2 km Gitterweite simuliert.
- Die Ergebnisse der beiden ersten Schwerpunkte flossen als Datengrundlage in die anschließende geo-statistische Modellierung ein.

- Parallel dazu wurden jene technischen und wirtschaftlichen Kriterien definiert, die für die Abschätzungen des theoretisch maximal mobilisierbaren Potentials von wesentlicher Bedeutung sind.
- Auf Basis der Ergebnisse zum theoretischen Windangebot und unter Berücksichtigung der wesentlichen Einflussgrößen wurde eine dynamische WebGIS-Applikation programmiert, die es dem User erlaubt, das in Österreich theoretisch maximal mobilisierbare Windenergiepotential zu simulieren.
- Ein zusätzlicher Schwerpunkt des Projektes war eine sehr umfangreiche Disseminations-Arbeit, die darauf abzielte das Projekt sowohl einem möglichst breiten Publikum als auch nationalen und internationalen Fachkreisen vorzustellen. Bei einem abschließenden Dissemination Workshop präsentierte die Energiewerkstatt gemeinsam mit den Projektpartnern die Ergebnisse des Projektes.

## 1.3 Einordnung in das Programm

Mitte 2011 waren in Österreich 625 Windkraftanlagen mit einer installierten Leistung von 1.011 MW in Betrieb. Bei einer durchschnittlichen Jahresarbeit dieser Anlagen von 2,3 TWh können etwa 3,5% des österreichischen Elektrizitätsbedarfs mit Windstrom gedeckt werden[3]

### Energiestrategische Ziele

- *Sicherstellung der Kriterien der Nachhaltigkeit: ökonomisch, ökologisch und sozial dauerhaft*

Unter der Annahme, dass die im Rahmen des gegenständlichen Projektes erreichten Ergebnisse einen Impuls zur besseren Erschließung des österreichischen Windkraftpotentials leisten, können die genannten Kriterien der Nachhaltigkeit erfüllt werden.

Windkraft stellt eine erneuerbare Energiequelle dar, deren Nutzung zu 100% den Kriterien der Nachhaltigkeit entspricht und in der Lage ist, die Erzeugung von Elektrizität aus fossilen Energiequellen oder den Import von Elektrizität zu reduzieren. Durch die schadstofffreie Energieproduktion und die Substitution von zu importierenden fossilen Brennstoffen kann Windkraft einen Beitrag zu einer sicheren, wirtschaftlichen aber auch ökologisch und sozial dauerhaften Energieversorgung leisten.

- *Erhöhung der Ressourcen- und Energieeffizienz des Wirtschaftssystems*

Mit der Steigerung der Nutzung von Windenergie ist eindeutig eine Erhöhung der Ressourcen- und Energieeffizienz des Wirtschaftssystems gegeben. Vergleichbar mit der Wasserkraft, besteht auch bei der Nutzung von Windkraft nach Inbetriebnahme der Anlagen keine Abhängigkeit von Rohstoffen oder den Preisschwankungen der internationalen Energiemärkte. Somit ist die langfristige Energieaufbringung zu stabilen Preisen gesichert.

Im Erfahrungsbericht zum Erneuerbare Energiegesetz des deutschen Umweltministeriums [4] konnte nachgewiesen werden, dass die vorrangige Abnahme von Strom aus erneuerbarer Energie zu festgelegten Preisen eine senkende Wirkung auf die Großhandelspreise hat (Merit-Order-Effekt).

- *Aufbau und Sicherung langfristig klimaschützender Raum- und Wirtschaftsstrukturen*

Windkraft stellt eine erneuerbare Energiequelle dar, bei deren Nutzung über die gesamte Lebensdauer (ca. 20 Jahre) keine Treibhausgase freigesetzt werden. Nach Ablauf der Lebensdauer können Windkraftanlagen ohne viel Aufwand abgebaut und durch Neuanlagen ersetzt werden, wobei die Materialien der Altanlagen Großteils wieder in den Stoffkreislauf zurückgeführt werden. Erwähnenswert ist im Zusammenhang mit der Diskussion über klimaschützende Wirtschaftsstrukturen, dass Windkraftanlagen hervorragend günstige energetische Amortisationszeiten aufweisen (etwa 4 Monate).

- *Erzielung struktureller und langfristig quantitativ maßgeblicher Effekte*

Ein langfristig quantitativ maßgeblicher Effekt der beantragten Grundlagenstudie ist durch die erreichte Qualität der Ergebnisse (Windatlas und Potentialstudie) insofern gegeben, weil dadurch die gezielte Nutzung bisher nicht bekannter Potentialgebiete ermöglicht wird und somit ein Beitrag zur Erreichung der in Ökostromgesetz 2012 formulierten Zielsetzung geleistet werden kann. Das neue Gesetz sieht vor, dass bis 2020 zur bestehenden Leistung von 1.011 MW zusätzlich 2.000 Megawatt Windkraft errichtet werden.

## **Systembezogene Ziele**

- *Reduktion des Verbrauchs fossiler und nuklearer Energieträger*

Unter der Annahme, dass die im Rahmen des Projektes erreichten Ergebnisse eine bessere Erschließung des österreichischen Windkraftpotentials ermöglichen, kann eine deutliche Reduktion des Verbrauchs fossiler und nuklearer Energieträger erwartet werden. Für den Fall, dass die im Ökostromgesetz vorgesehene zusätzliche Ausbaukapazität von 2000 MW oder 4,3 GWh/Jahr erreicht wird, können im Jahr 2020 bei einer gesamten Windstromerzeugung von 6,6 TWh (Bestand und Neuerrichtung) jährlich mehr als 1,14 Mio. Tonnen Erdöl eingespart werden.



- *Erschließung von Ressourcen erneuerbarer Energieträger*

Die Ergebnisse des beantragten Projektes können zur Optimierung der Nutzung des in Österreich vorhandenen Windpotentials beitragen.

- *Verbesserung der Umwandlungseffizienz*

Mit der Ausarbeitung einer, dem aktuellen Stand der Wissenschaft entsprechenden Ressourcenkarte und der Nachbildung der Windgeschwindigkeitsverhältnisse über dem komplexen Oberflächenrelief Österreichs wird eine bisher noch nicht erreichte Detailtiefe geboten und dadurch die gezielte Nutzung der effizientesten Windstandorte ermöglicht.

- *Multiplizierbarkeit, Hebelwirkung und Signalwirkung*

Die Ressourcenkarte und die Ergebnisse der Potentialabschätzung sind öffentlich zugänglich gemacht. Die Ergebnisse können sowohl als Instrumente für energiepolitische Weichenstellungen und langfristige regionale Planungen (auf Bundes- Landes- und Gemeindeebene), als auch zur Planungshilfe für zukünftige Betreiber verwendet werden.

- *(Kosten-)Effizienz der Treibhausgasreduktion: Euro pro Tonne CO<sub>2</sub>-Äquivalent pro Jahr über die technisch-wirtschaftliche Nutzungsdauer der Investition*

Unter der Annahme, dass die im Rahmen des Projektes erreichten Ergebnisse einen Impuls zur besseren Erschließung der österreichischen Windkraftpotentiale leisten, kann ein sehr wesentlicher Beitrag zum Klimaschutz geleistet werden.

Um die Kosten für die Einsparung von CO<sub>2</sub> Emissionen durch Windenergie abzuschätzen, wird zunächst die Differenz zwischen dem derzeitigen Marktpreis (etwa 6 ct/kWh) und dem derzeitigen Einspeisetarif (9,7 ct/kWh) ermittelt. Unter Berücksichtigung der Kosten für die Bereitstellung der Ausgleichsenergie in Österreich (0,5 ct/kWh) ergeben sich Mehrkosten von 4,2 ct/kWh. Infolge resultieren bei einem Reduktionsszenario von 0,67 Tonnen/MWh (österreichischer kalorischer Kraftwerksmix) derzeitige Reduktionskosten von etwa 60 € je Tonne CO<sub>2</sub>.

Sehr wesentlich für die zukünftige Wirtschaftlichkeit der Windenergie ist die Entwicklung des Marktpreises. Für das gegenständliche Projekt einigte man sich im Zuge der Workshops auf einen Anstieg auf 11 ct/kWh bis 2020 bzw. 15 ct/kWh bis 2030. Da eine im Jahr 2011 in Betrieb gegangene Windkraftanlage über ihre Lebensdauer von 20 Jahren Ökostrom ohne CO<sub>2</sub> Emissionen produziert, würde auf der Grundlage dieser Marktpreisentwicklung und der Einspeisetarifverordnung 2010 (13 Jahre, 9,7 ct/kWh) bereits im Jahr 2017 der „break-even-point“ erreicht sein und die Anlage keine Mehrkosten mehr verursachen. Hochgerechnet auf einen Durchschnitt von 20 Jahren ergeben sich somit durchschnittliche Mehrkosten von 1,5 ct/kWh und, basierend auf einem Reduktionsszenario von € 0,67/Tonne/MWh, Reduktionskosten von etwa 20 € je Tonne CO<sub>2</sub>.

## Technologiestrategische Ziele

- *Erhöhung des inländischen Wertschöpfungsanteils im Energiesystem*

Unter der Annahme, dass die im Rahmen des Projektes erarbeiteten Ergebnisse eine bessere Erschließung des österreichischen Windkraftpotentials ermöglichen und dass das im Ökostromgesetz 2012 vorgesehene Ziel zur Errichtung von zusätzlich 2000 MW Windkraft erreicht wird, kann im Jahr 2020 mit der Windstromerzeugung (Bestand und Neuerrichtung) der Import von 6,6 TWh Elektrizität ersetzt werden. Bei einem angenommenen Marktpreis von 70 €/MWh kann damit ein inländischer Wertschöpfungsanteil von jährlich 462 Mio. € geschaffen werden.

- *Stärkung der Technologiekompetenz österreichischer Unternehmungen*

Die gesamte Windbranche mit Zuliefer- und Dienstleistungsunternehmen bietet derzeit rund 3.300 Beschäftigten in Österreich einen Arbeitsplatz. Die heimischen Zulieferunternehmen zur Endfertigung von Windrädern sowie die Dienstleistungsunternehmen der Windbranche, wie z.B. Windtec in Klagenfurt ([www.ams-c-windtec.com](http://www.ams-c-windtec.com)), Elin EBG Motoren GmbH in Weiz ([www.elinebgmotoren.at](http://www.elinebgmotoren.at)), Bachmann Electronic GmbH ([www.bachmann.info](http://www.bachmann.info)) und Hexel Composites in Oberösterreich ([www.hexel.com](http://www.hexel.com)), erwirtschafteten 2009 einen Umsatz von 470 Mio. Euro.

Die verstärkte Nutzung von Windkraft in Österreich bietet den in der Windkraftindustrie tätigen Unternehmen die Möglichkeit, ihre Technologiekompetenzen weiter auszubauen. Besonders im Planungsbereich sind die in Österreich gewonnenen Erfahrungen mit dem Betrieb von Windkraftanlagen an Standorten mit komplexen Geländestrukturen und unter extremen klimatischen Bedingungen international gefragt.

- *Generierung von Sekundärnutzen bzw. Spin Offs durch eine Technologie*

Die derzeit von regionalen Klimamodellen verwendeten Auflösungen in österreichischen Klimamodellierungsprojekten („Research for Climate Protection: Model Run Evaluation (reclip:more)“[5], sein Nachfolger „Research for Climate Protection: Century Climate Simulations (reclip:century)“[6], sowie „Next Generation Regional Climate Scenarios for the Greater Alpine Region (ReCliS:NG)“[7]) weisen eine Gitterweite von mindestens 10 km auf. Durch die Erstellung eines hoch aufgelösten Klimadatensatzes mittels dynamischer Modellierung (Gitterweite 2 km) für den Ostalpenraum im Zuge des gegenständlichen Projektes wird eine spezielle Form der dynamischen Modellierung („dynamic initialisation“ [8]) der nationalen und internationalen Klima- und Klimafolgenforschung zur Verfügung gestellt. Selbiges gilt auch für das geo-statistische Interpolationsverfahren, das speziell für den Ostalpenraum kalibriert wird, sowie dessen Ergebnisse.

### 1.4 Verwendete Methoden

Als Berechnungsansatz für das theoretische Potential (Winddargebot) wurde im gegenständlichen Projekt erstmals die Verschränkung einer dynamischen Modellierung mit einem geo-statistischen Interpolationsverfahren gewählt. Durch diese Kombination ergaben sich zahlreiche Verbesserungsmöglichkeiten bei der räumlichen Strukturierung des Modells, wodurch der Variabilität der österreichischen Geländestruktur und Windressourcen besser Rechnung getragen werden konnte. Die Qualität der Ergebnisse wurde durch die Einbindung einer sehr hohen Anzahl von realen Windmessdaten und Energieerträgen von bestehenden Windkraftanlagen verbessert.

Aufbauend auf den Ergebnissen der Windfeldmodellierung wurden Windkraftpotenzialmodellierungen für Österreich durchgeführt. Dafür wurden geographische Informationssysteme (GIS) genutzt, wodurch verschiedenste Datensätze über deren Raumbezug verknüpft werden konnten. Im Projekt wurde ein räumliches Modell entwickelt, über das die Windkraftpotenziale in Österreich abgebildet werden können. Um möglichst breite Erfahrungen zu sammeln und um zu gewährleisten, dass die zugrunde gelegten Kriterien unparteiisch sind, wurden diese im Zuge von internationalen Expertenworkshops definiert. Im Anschluss wurden diese Kriterien in eine IT basierte WebGIS-Applikation eingepflegt.

Um die Ergebnisse einer möglichst breiten Öffentlichkeit zugänglich zu machen, wurde vereinbart, die Windkarte sowie die WebGIS Applikation auf der Projekt Website, [www.windatlas.at](http://www.windatlas.at), zu veröffentlichen.

### 1.5 Aufbau der Arbeit

Entsprechend der inhaltlichen Zielsetzung wurde das Projekt in sechs Arbeitspakete gegliedert und entsprechend abgearbeitet.

AP1 – Projektmanagement: Ziel dieses Arbeitspaketes war die Schaffung und Aufrechterhaltung entsprechender Strukturen zur effizienten und zeitgerechten Erreichung der definierten Projektziele.

AP2 - Winddaten: Ziel dieses Arbeitspaketes war die Beschaffung und Aufbereitung von Windmessdaten und Realenergieerträgen bestehender Windkraftanlagen zur Verwendung als Eingangs- und Vergleichsdaten für die Windmodellierung in AP 3.

AP3 – Windmodellierung: Dieses AP hatte zum Ziel einen Windatlas (mittlere Jahreswindgeschwindigkeiten, Form- und Lageparameter der Weibull-Verteilung) mit einer horizontalen Auflösung von 100 m × 100 m und verschiedenen Höhenlevels zwischen 50 m – 130 m über Grund zu erstellen. Die Genauigkeit des Windatlas sollte über das gesamte Gebiet bekannt sein.

AP4 – Kriterien für die Berechnung des Windkraftpotentials: Ziel des AP4 war die Definition der technischen und wirtschaftlichen Kriterien für die Berechnung des Windkraftpotentials in Form eines Kriterienkataloges, der als direkter Input für die GIS-Modellierung (AP5) verwendet werden kann.

AP5 – Potentialmodellierung: Ziel dieses APs war die Entwicklung eines Modells zur Abschätzung des räumlich differenzierten Windkraftpotenzials unter Berücksichtigung geographischer, wirtschaftlicher, technischer und physikalischer Aspekte.

AP6 – Dissemination: Ziel dieses APs war es, die Ergebnisse sowohl einer möglichst breiten Öffentlichkeit aber auch einem interessierten Fachpublikum zu präsentieren und zugänglich zu machen.

## 2 Inhaltliche Darstellung

### 2.1 Aufbereitung der Winddaten (AP2)

Aufgrund der Verfügbarkeit von Antriebsdaten zur dynamischen Modellierung aus dem Projekt reclip:more umfasste die dynamische Modellierung die Zeiträume 1981 bis 1990, sowie das Jahr 1999 (siehe AP3). Dementsprechend mussten die Daten für diese beiden Zeiträume aufbereitet werden.

#### Modellierungsphase 1999:

Für die erste Phase der Modellierung, das Jahr 1999, wurden die Messdaten von den folgenden Quellen angefordert und aufbereitet: Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG), Messstellen der Landesregierungen, Messdaten aus geförderten Windmessprogrammen, privat finanzierte Windmessungen und Energieertragsdaten von bestehenden Windkraftanlagen. Zusätzlich wurden vom Deutschen Wetterdienst (DWD) Messdaten angekauft sowie vom Südtiroler Wetterdienst und von MeteoSwiss Daten zur Verfügung gestellt.

Aus dem dichten Stationsmessnetz der **ZAMG** wurden zunächst jene Stationen, die sich für die Arbeitsschritte zur Generierung und Validierung der Windmodellierung eignen (möglichst unbeeinflusste Anströmung), vorselektiert. Die Vorselektion wurde mittels hoch aufgelöstem (~100 m x ~100 m Gitterweite) digitalen Höhenmodell SRTM [9], CORINE Landcover, sowie Luftbildaufnahmen (in Einzelfällen) durchgeführt. Etwaige Inkonsistenzen in den Metadaten zur Georeferenzierung der Stationen wurden dabei korrigiert. Jene Stationen, bei denen in Umkreisen bis zu 500 m zu starke Variabilitäten in den Geländehöhen und/oder zu viele Änderungen der Landnutzungsklassen festgestellt wurden, wurden ausgeschieden. Durch den direkten Zugriff des Wegener Zentrums auf die Datenbank der ZAMG konnten durch das Wegener Zentrum weitere Stationen aufgrund einer Analyse der Messdaten (mittlere Windgeschwindigkeit, Anzahl valider Daten) ausselektiert werden. Eine verfeinerte Selektion der Stationen wurde je nach Anwendung in AP3 (dynamische Modellierung, geo-statistische Modellierung) im Anschluss durchgeführt. Zusätzlich wurden von 65 TAWES Stationen statistische Größen (Mittelwerte, Form- und Lageparameter der Weibullverteilung) für das Jahr 1999 und von 11 Klimastationen für die Periode 1981-1990 von der ZAMG käuflich erworben.

Da die **Winddaten der Landesregierungen** nicht zentral archiviert werden, wurde mit den zuständigen Stellen in den Ländern Kontakt aufgenommen um den Datenumfang, Verfügbarkeit und die Positionen der Messstellen in Erfahrung zu bringen. Nach Klärung der Details konnten von allen Ländern Windmessdaten in einer zur weiteren Verarbeitung geeigneten Form bereitgestellt werden.

Der Großteil der **privaten Windmessungen** war nicht für das Jahr 1999 vorhanden. Deshalb wurden verschiedene Methoden geprüft und Ansätze entwickelt, um diese von Messtechnik

und Messhöhe sehr wertvollen Daten für den benötigten Zeitraum verwendbar zu machen. Auch weil sich die dafür nötigen Vergleichsdaten meist in mehr als 10km Entfernung befinden, wurde das beste Resultat mittels linearer Korrelation von Monatsmittelwerten erzielt. Des Weiteren wurden für die privaten Windmessungen, Windgeschwindigkeiten und Weibullverteilungen in 100 m Höhe hochgerechnet und für Vergleichszwecke mit den Modellergebnissen weitergegeben. Als Basis dieser Hochrechnungen wurden Ertragsdaten von bestehenden Windkraftanlagen mit größeren Nabenhöhen, Windprofilmessungen und Ergebnissen aus mikroskaligen Modellberechnungen herangezogen. Hierbei hat sich besonders die Berücksichtigung des k-Parameters als wesentlicher Einflussfaktor dargestellt, dem große Aufmerksamkeit in der Validierung zugesprochen werden musste. Gleichzeitig wurde festgestellt, dass auch im internationalen Kontext hinsichtlich der Veränderung des k-Parameters über die Höhe noch kaum Erfahrungen vorhanden sind.

Insgesamt wurden im Zuge der Bearbeitung des AP2 folgende Daten für das erste Modellierungsjahr (1999) zur Verfügung gestellt:

- Private Windmessung 124 Stationen
- ZAMG 65 Stationen
- Landesregierungen 36 Stationen
- Deutscher Wetterdienst 8 Stationen
- Südtiroler Wetterdienst 6 Stationen
- Universität Innsbruck 2 Stationen
- MeteoSchweiz 13 Stationen

## Modellierungsphase 1981-90:

In den achtziger Jahren war das Stationsmessnetz der ZAMG noch nicht in dem Umfang ausgebaut, wie das heute der Fall ist: Erst Mitte der Neunziger Jahre wurden teilautomatische Stationen (TAWES) eingeführt. Um die Simulationsergebnisse bezüglich der Achtziger Jahre trotzdem validieren zu können, wurden Zeitreihen der ausgewählten (siehe oben) TAWES Stationen mit Hilfe eines statistischen Verfahrens namens „quantile mapping“ [10] für den Zeitraum der Achtziger Jahre rekonstruiert. Das statistische Verfahren wurde mit den TAWES und Klimastationsdaten aus überlappenden Zeitperioden (1995 bis 2007) trainiert. Eine Evaluation dieses Rekonstruktionsverfahrens hat ergeben, dass die Beträge der Abweichungen zwischen beobachtetem und rekonstruiertem Jahresmittelwert der Windgeschwindigkeit kleiner 5% (entspricht etwa 0,15 m/s) liegen [11].

## **2.2 Windmodellierung (AP3)**

Mit einem neuen Ansatz, einer Kopplung des dynamischen Modells MM5 [2] und einer geo-statistischen Modellierung, wurde das Windfeld in verschiedenen Höhen auf eine Auflösung von 100 m hinunter skaliert. Die Modellunsicherheit wurde mittels eines Kreuzvalidierungsverfahrens bestimmt.



MM5 Modell setup: Mit dem dynamischen Modell MM5 werden die atmosphärischen Prozesse mit einer horizontalen Auflösung von  $2\text{ km} \times 2\text{ km}$  simuliert, wobei die Simulation mit dem Reanalyse Datensatz ERA40 [12] angetrieben wird. Zur Durchführung der dynamischen Modellierung wird auf ein bestehendes Simulationsergebnis, das im Rahmen des Projektes reclip:more angefertigt wurde, zurückgegriffen. Dieser reclip:more Datensatz umfasst den gesamten Alpenraum in einer Horizontalaufklärung von  $10\text{ km} \times 10\text{ km}$  und bezieht sich auf die Zeiträume 1981 bis 1990 sowie das Jahr 1999. Durch weitere Anwendung von MM5 wird die angestrebte Auflösung von  $2\text{ km} \times 2\text{ km}$  erreicht. Am Ende der Simulation liegen für jeden Punkt im 3-dimensionalen Gitter, die dynamisch modellierten Zeitreihen von allen meteorologischen Parametern vor.

Geostatistisches Modell: Abbildung 1 zeigt schematisch den Ablauf des geo-statistischen Modells für die mittlere Windgeschwindigkeit. Das 3D Windfeld von MM5 wird auf vorgegebene Höhengschichten in vertikaler und auf ein  $100\text{ m} \times 100\text{ m}$  Gitter in horizontaler Richtung interpoliert. Mit Hilfe eines digitalen Geländemodells wird der komplexen Topographie in höherer Auflösung Rechnung getragen. Mit Hilfe von Messdaten wird der Bias der dynamischen Modellierung bestimmt, welcher regional gemittelt korrigiert wird. Mit Hilfe des digitalen Geländemodells werden Geländeformen bestimmt und mit Korrekturtermen versehen. Am Schluss wird die Windkarte noch lokal an die Messwerte hingezogen.

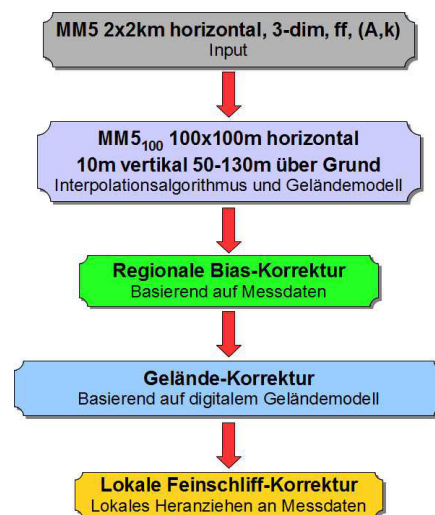


Abbildung 1: Ablaufschema der geo-statistischen Modellierung für die mittlere Windgeschwindigkeit. Das  $2\text{ x }2\text{ km}$  Gitter vom MM5 wird auf ein  $100\text{ m} \times 100\text{ m}$  Gitter interpoliert. Anschliessend werden einzelne Korrekturen angewendet.

Inputgrößen für das geo-statistische Interpolationsverfahren: Als Ausgangslage dienten die Modellergebnisse der dynamischen Simulation mit dem numerischen Wettermodell MM5, Messdaten von offiziellen Wetterstationen sowie von privaten Windmessungen aus

Windenergieprojekten und mit dem SRTM ein digitales Höhenmodell [9], um die Topographie in der gewünschten horizontalen 100 m × 100 m Auflösung abbilden zu können. Die Eingangsgrößen sind in Tabelle 1 tabellarisch zusammengefasst und werden in diesem Kapitel noch detaillierter diskutiert.

Tabelle 1: Inputdaten für das geo-statistische Modell.

| Inputgröße | Beschreibung                                                                                                     |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| MM5        | Daten (Windgeschwindigkeit) des numerischen Wettermodells MM5 2 km × 2 km horizontal und ca. 30 – 60 m vertikal. |
| Messdaten  | Messungen (mittlere Windgeschwindigkeit, A und k Parameter) homogenisiert auf 100 m über Grund.                  |
| SRTM       | Digitales Geländemodell                                                                                          |

Teilweise war es schwierig die Windgeschwindigkeit in 100 m über Grund abzuschätzen, z.B. bei Messungen auf 10 m Höhe in der Nähe von Häusern oder Bäumen. Deshalb wurden solche Messungen aussortiert. Abbildung 2 zeigt die Verteilung der ins geo-statistische Modell eingeflossenen Messstationen über das österreichische Staatsgebiet als Grafik der Stationsdichte. Je dunkler die Region, umso mehr Messdaten sind dort eingeflossen. Eine gute Dichte an Messpunkten zeigt sich in den Bundesländern Burgenland, Niederösterreich, und Oberösterreich, sowie in der Brennerregion. Schlussendlich sind nach der Aussortierung in Summe ungefähr 200 Messdaten eingeflossen.

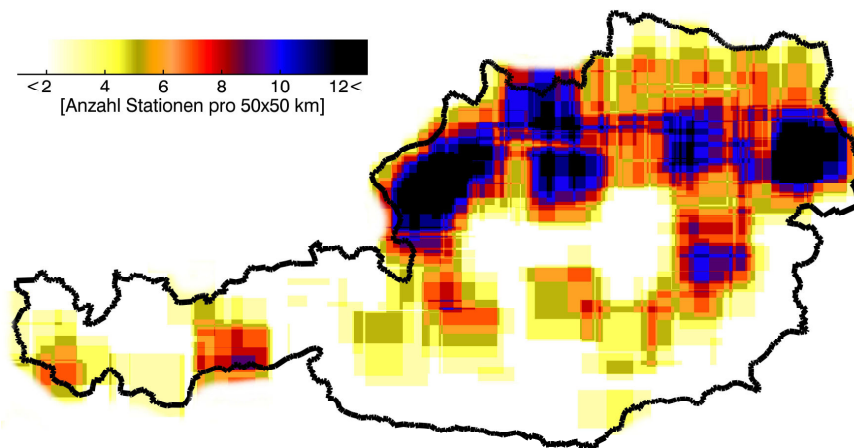


Abbildung 2: Dichte der ins Modell eingeflossenen Stationen. Die Farbcodierung zeigt an, wie viele Stationen in einem Quadrat von 50 x 50 km Größe verwendet wurden.

Die Topographie im MM5 und im SRTM ist gerade im komplexen Gelände der Alpen recht unterschiedlich. Die Differenzen in den Seehöhen an einzelnen Punkten belaufen sich bis zu 500 m. Der Detailgrad von Tälern und Bergspitzen kommt im SRTM viel detaillierter zum Vorschein (vergleiche Abbildung 3). Diese Vereinfachung der Topographie im MM5 Modell hat zur Folge, dass in der geo-statistischen Interpolation einige Korrekturterme eingeführt werden müssen. Die Annahme, dass bei sich ähnlichen Geländestrukturen, die Topographie



im MM5 ähnlich vereinfacht ist und somit ähnliche Unsicherheiten numerisch modelliert werden, führt uns zu den Korrekturtermen bezüglich der Geländeform.

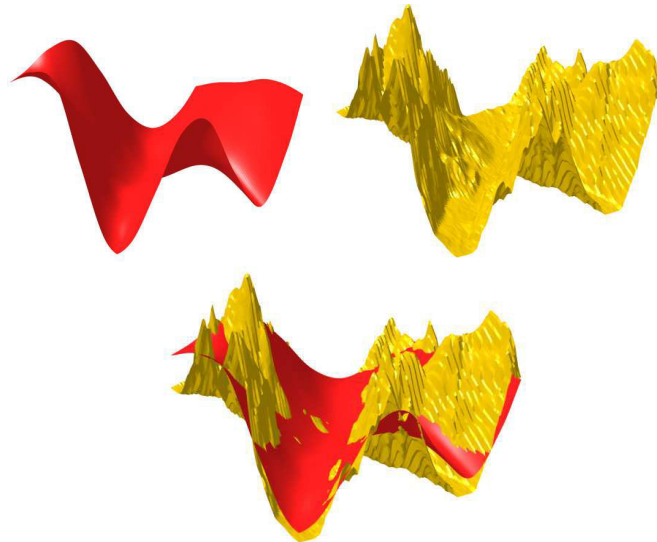


Abbildung 3: Die Topographie, wie sie im MM5 repräsentiert ist (oben links) und die Topographie wie sie im SRTM vorhanden ist (oben rechts). Die Darstellung unten zeigt die beiden Höhenmodelle übereinander gelegt. Täler sind im SRTM in der Regel tiefer und Bergspitzen höher als im MM5. Zusätzliche kleinräumige Erhebungen und Senken kommen im SRTM nun auch zum Vorschein.

Geostatistisches Modell: Im geo-statischen Modell wird über verschiedene Korrekturschritte die finale Windkarte erreicht. Folgende Formel beinhaltet alle Teilkorrekturen, wie im Modellablaufschemata (Abbildung 1) beschrieben.

$$v = \underbrace{v(MM5)}_{\text{Interpolation auf } 100 \times 100 \text{ m}} + \Delta z \cdot \frac{dv}{dz} + \underbrace{\varepsilon_{\text{bias}}}_{\substack{\text{regionale} \\ \text{Biaskorrektur}}} + \underbrace{\varepsilon_{\text{hang}}}_{\substack{\text{Hangneigungs-} \\ \text{korrektur}}} + \underbrace{\varepsilon_{\text{kamm}}}_{\substack{\text{Korrektur} \\ \text{Kämme}}} + \underbrace{\varepsilon_{\text{graben}}}_{\substack{\text{Korrektur} \\ \text{Graben}}} + \underbrace{\varepsilon_{\text{lokal}}}_{\substack{\text{Lokale} \\ \text{Korrektur}}}$$

Die horizontal 2 km × 2 km aufgelösten MM5 Daten wurden auf ihren entsprechenden Modelllevels mittels einer cubic convolution Interpolation auf ein 100 m × 100 m Gitter herunter gerechnet. Anhand der MM5 Daten wurde ein Höhengradient dv/dz (Abbildung 4) bestimmt, der an jedem Punkt mit der Differenz Δz in den beiden Topographiemodellen SRTM [9] und des MM5 multipliziert wird. Dies ergibt eine einfache Korrektur bezüglich des realen Geländes. Die Windkarte, die wir so erhalten benennen wir mit MM5<sub>100</sub>.

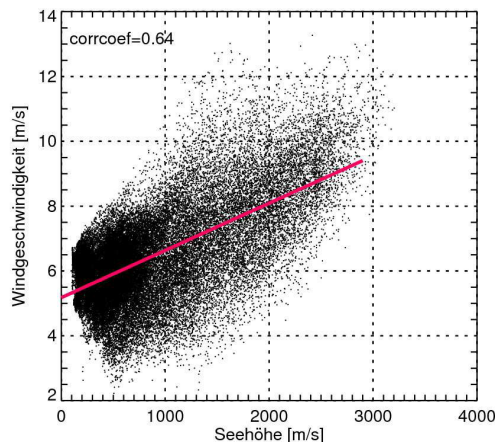


Abbildung 4: Der Höhengradient  $dv/dz$  wurde bestimmt aus den MM5 Daten.

Verglichen mit Messdaten zeigt das MM5<sub>100</sub> generell eine deutliche Überschätzung der mittleren Windgeschwindigkeit (Abbildung 5). Die Überschätzung kommt vom MM5 her.

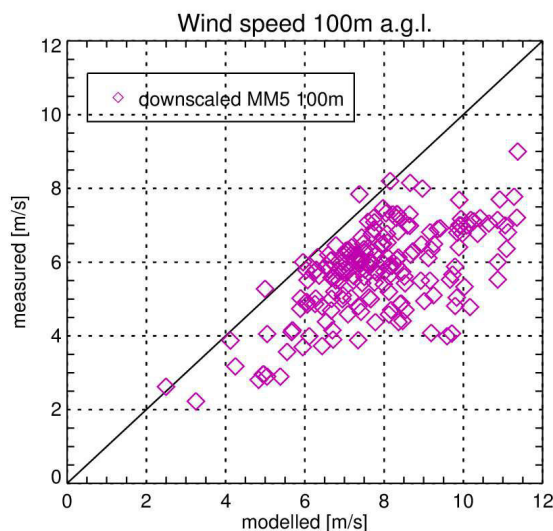


Abbildung 5: Abweichungen des MM5<sub>100</sub> zu Messdaten auf 100 m über Grund. Es zeigt sich eine Überschätzung des Modells.

Um der Überschätzung entgegenzuwirken wird ein regional gemittelter relativer Bias subtrahiert. Dazu wurde an den Messpunkten die relative Abweichung mit

$$\varepsilon_{bias} = \frac{v_{Modell} - v_{Messung}}{v_{Messung}}$$

bestimmt. Anschließend wurden sie mittels Kriging Interpolation auf das 100 m × 100 m Gitter interpoliert und über eine Distanz von 25 km geglättet, um einer stark exponierten Messung nicht zu starkes regionales Gewicht zu geben. Es hat sich gezeigt (Abbildung 6),

## IMPRESSUM

### **Verfasser**

Energiewerkstatt

Andreas Krenn  
Heiligenstatt 24, 5211 Friedburg  
Tel.: +43 7746 28212 0  
Web: [www.energiewerkstatt.org](http://www.energiewerkstatt.org)

### **Co-Autoren und Projektpartner**

- P1. Energiewerkstatt  
([www.energiewerkstatt.org](http://www.energiewerkstatt.org))  
Johann Winkelmeier  
Christoph Tiefgraber
- P2. Meteotest  
([www.meteotest.ch](http://www.meteotest.ch))  
Geogr. René Cattin  
Stefan Müller
- P3. Wegener Zentrum – Universität Graz  
([www.wegcenter.at](http://www.wegcenter.at))  
Heimo Truhetz
- P4. Research Studio iSpace  
([www.ispace.researchstudio.at](http://www.ispace.researchstudio.at))  
Markus Biberacher  
Sabine Gadocha

### **Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber**

Klima- und Energiefonds  
Gumpendorfer Straße 5/22  
1060 Wien  
[office@klimafonds.gv.at](mailto:office@klimafonds.gv.at)  
[www.klimafonds.gv.at](http://www.klimafonds.gv.at)

### **Disclaimer**

Die Autoren tragen die alleinige Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts. Er spiegelt nicht notwendigerweise die Meinung des Klima- und Energiefonds wider.

Der Klima- und Energiefonds ist nicht für die Weiternutzung der hier enthaltenen Informationen verantwortlich.

### **Gestaltung des Deckblattes**

ZS communication + art GmbH