



Technologien zur Dekarbonisierung
der Prozesswärme

Industrielle Trocknung

Faktenblatt

Mit Unterstützung der:



Niedersachsen
Allianz für Nachhaltigkeit

CO₂-arme Prozesswärme für Trocknungsprozesse

Industrielle Trocknungsprozesse sind energieintensiv und tragen erheblich zum industriellen Energieverbrauch bei. In der Papierindustrie beispielsweise entfallen etwa 70 % des gesamten Energieverbrauchs auf den Trocknungsprozess. Derzeit basiert ein Großteil der für die Trocknung notwendigen Energie auf fossilen Brennstoffen. Mit welchen Maßnahmen Trocknungsprozesse dekarbonisiert werden können, zeigt dieses Faktenpapier.

Stand der Technik

Die industrielle Trocknung findet in vielen Bereichen Anwendung, so z. B. in der Lebensmittelproduktion, der Pharmazie- und Chemieindustrie, der Textil- und Papierherstellung sowie in der Abwasserreinigung und Landwirtschaft. Bei Trocknungsprozessen wird der Feuchtigkeitsgehalt eines Produkts auf ein definiertes Niveau reduziert, um beispielsweise die Haltbarkeit und Lagerfähigkeit zu erhöhen oder Transportkosten durch Gewichtsreduktion zu senken. Jede Branche hat dabei spezifische Anforderungen an die Trocknung, die von der Art des zu trocknenden Materials und den gewünschten Endprodukten abhängen.

Trocknungsprozesse gehen mit einem hohen Energieverbrauch einher. Das liegt zum einen am hohen Energiebedarf für die Verdampfung von Wasser und zum anderen an dem häufig geringen Wirkungsgrad der Trocknungsanlagen, der teilweise unter 50 % liegt.

Temperaturniveaus der Trocknung

Industrielle Trocknungsprozesse erfolgen in der Regel bei Temperaturen zwischen 40 und 250 °C. Die gewählten Temperaturniveaus variieren abhängig von den spezifischen Anforderungen der zu trocknenden Materialien und der angestrebten Restfeuchte (Tabelle 1). Höhere Temperaturen können die Trocknung zwar beschleunigen, jedoch besteht dabei die Gefahr einer Beschädigung des Materials. Niedrigere Temperaturen werden oft für empfindlichere Materialien wie pharmazeutische Produkte verwendet, um deren Beschaffenheit und Qualität zu sichern.

Umsetzung der industriellen Trocknung

Die Trocknungsverfahren basieren auf unterschiedlichen Arten des Wärmeeintrags, die sich miteinander kombinieren lassen.

Industrie	Temperaturbereich
Holz	50–80 °C
Ziegel	60–90 °C
Textil	60–110 °C
Antibiotikum	Circa 70 °C
Klärschlamm	70–240 °C
Insulin	70–110 °C
Lack	80–200 °C
Feuerfeste Keramiken	80–200 °C
Papier	130–190 °C
Milchpulver	210–240 °C

Tabelle 1 Temperaturbereiche der Trocknungsprozesse in verschiedenen Industrien

Konvektionstrocknung

Bei der Konvektionstrocknung, auch Verdunstungstrocknung genannt, wird ein vorgewärmtes Trocknungsgas direkt in Kontakt mit dem zu trocknenden Gut gebracht (Abbildung 1). Während sich das zu trocknende Gut leicht erwärmt, kühlt das Trocknungsgas ab. Durch die zugeführte Wärme verdunstet die Feuchtigkeit im Material. Hierbei nimmt das Trocknungsgas die Feuchtigkeit auf und wird abgeführt. Als Trocknungsgase werden Luft, Inert- oder Rauchgase, oder überhitzter Wasserdampf eingesetzt. In der Regel werden hierfür entweder Abwärmeströme oder Wärme aus der Verbrennung von fossilen Energieträgern verwendet. Eine klassische Anwendung ist der Bandtrockner, auf dem Klärschlamm ab einer Temperatur von 70 °C getrocknet wird.

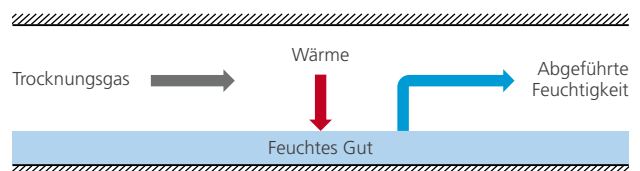


Abbildung 1 Prinzip der Konvektionstrocknung

Kontaktstrocknung

Die Kontaktstrocknung (auch konduktive Trocknung genannt) ist ein Verfahren, bei dem die Wärme durch Wärmeleitung von beheizten Kontaktflächen auf das Feuchtgut übertragen wird (Abbildung 2). Die entstehende Feuchtigkeit wird abgeführt, was beispielsweise durch einen Vakuumbetrieb realisiert werden kann.

Alternativ wird ein Trocknungsgas eingesetzt, sodass eine Kombination aus Kontakt- und Konvektionstrocknung stattfindet.

Eine typische Anwendung ist der dampfbeheizte Trocknungszyylinder in der Papierindustrie, der üblicherweise mit Dampftemperaturen von 120 bis 150 °C arbeitet.

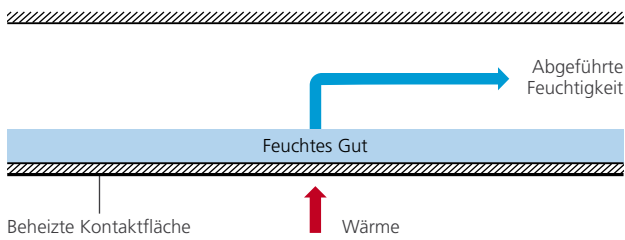


Abbildung 2 Prinzip der Kontaktstrocknung

Strahlungstrocknung

Bei der Technik der Strahlungstrocknung wird dem Feuchtgut die notwendige Wärme über Strahlung zugeführt (Abbildung 3). Das Feuchtgut absorbiert Strahlungsenergie, was zur Erwärmung des Materials und zur Verdampfung der darin enthaltenen Feuchtigkeit führt. Die Feuchtigkeit wird entweder mittels Vakuum oder einem Trocknungsgas abgesogen. Aufgrund der direkten Energieübertragung kann die Trocknung schnell und effizient erfolgen. Beispiele für diese Trocknungsart sind Hochfrequenz-, Mikrowellen- oder Infrarottrocknung. Diese Technik kommt häufig zum Einsatz, wenn kurze Trocknungszeiten erforderlich sind oder herkömmliche Trocknungsmethoden ineffizient wären. Die Infrarottrocknung wird beispielsweise in der Papier- und Textilindustrie aufgrund ihrer hohen Leistungsdichte und schnellen Regelbarkeit angewendet.

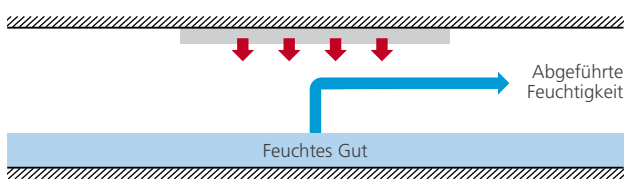


Abbildung 3 Prinzip der Strahlungstrocknung

Technologien zur Dekarbonisierung

Aufgrund der zahlreichen Anwendungen der industriellen Trocknung sind die Möglichkeiten zur Dekarbonisierung ebenfalls vielfältig. Potenzielle Maßnahmen können dabei die Elektrifizierung, der Einsatz von Wärmepumpen, die Umstellung auf Verbrennung von alternativen Brennstoffen oder die Solartrocknung sein. Auch Energieeinsparungen sind in allen konventionellen Trocknungsprozessen möglich und von großer Bedeutung.

Steigerung der Energieeffizienz

Um die Energieeffizienz in industriellen Trocknungsprozessen zu verbessern, sollte in einem ersten Schritt der Material- und Energiefluss des Trockners bilanziert werden. Dadurch lassen sich Bereiche aufdecken, in denen Änderungen der Betriebsbedingungen zu einer Steigerung der Effizienz des Trocknerbetriebs führen. Damit können Energieeinsparungen in Höhe von 10 bis 30 % erzielt werden.

Reduktion des Feuchtigkeitsgehalts

Zusätzlich ist es in vielen Fällen möglich, den anfänglichen Feuchtigkeitsgehalt eines Produkts durch andere Methoden wie z. B. durch mechanische Behandlung (Pressen, Zentrifugieren, o. ä.) zu reduzieren. Beispielsweise wird Klärschlamm vor der thermischen Trocknung mechanisch in Band- und Kammerfilterpressen entwässert, sodass der Feststoffgehalt von unter 10 % auf 20 bis 45 % gesteigert wird.

Minimierung der Wärmeverluste

Eine weitere Maßnahme zur Effizienzsteigerung besteht in der Reduktion der Wärmeverluste durch verbesserte wärmedämmende Materialien. Diese tragen dazu bei, die Abstrahlverluste zu minimieren und die Energie im System zu halten.

Der wesentliche Anteil der Wärmeverluste in Trocknungsprozessen ist auf die Energie zurückzuführen, die in der feuchten Abluft verbleibt und ungenutzt aus dem Trockner abgeführt wird. Daher ist die Nutzung der Abwärme von hoher Relevanz. Insbesondere bei konvektiven Trocknern (z. B. Band-, Sprüh- und Trommeltrocknern), in denen die Wärme durch einen Kanal geführt wird, ist eine Wärmerückgewinnung effektiv. Hierfür eignen sich Wärmetauscher, die Energie aus dem Abgas nutzen und auf das zugeführte Trocknungsgas übertragen. Zusätzlich kann die Abgaswärme zur Vorwärmung des Trocknungsguts genutzt werden und somit den Energiebedarf für die Erwärmung verringern.

Optimierung der Wärmeübertragung

Bei der Kontaktstrocknung hängt die Trocknungsgeschwindigkeit maßgeblich von der Wärmeübertragung zwischen der Heizfläche und dem Trocknungsgut sowie der Wärmeleitung innerhalb des Materials ab. Zur Steigerung der Wärmeübertragung und somit der Effizienz kann das Gut mittels Rührwerke durchmischt oder durch Drehung des Trockners umgelagert werden (z. B. Rüttelplatten, Trockentrommel). Dies sorgt dafür, dass das Material gleichmäßig erwärmt wird und die Feuchtigkeit effektiver entweichen kann.

Elektrifizierung

Eine Möglichkeit zur Dekarbonisierung von Trocknungsprozessen ist die Elektrifizierung, welche durch verschiedene Techniken möglich ist. Zum einen können direkt-elektrische Verfahren wie die Strahlungstrocknung oder die dielektrische Trocknung verwendet werden. Zum anderen kann die Erzeugung von Heißgas beispielsweise durch Wärmepumpen elektrifiziert werden. Elektrifizierte Trocknungsprozesse ermöglichen kürzere Bearbeitungszeiten, was die Energieeffizienz erheblich steigert.

Bei der dielektrischen Trocknung durch Mikrowellen- oder Hochfrequenz Trocknung ist insbesondere der direkte Wärmeeintrag von Vorteil, da eine präzise und effiziente Trocknung erzielt wird. Weiterhin erhöhen die schnellen Start- und Abschaltmöglichkeiten die Flexibilität. Es entstehen keine Verbrennungsabgase, was die Notwendigkeit für Abgasbehandlungen reduziert oder sogar eliminiert und somit die Umweltbelastung verringert. Allerdings ist diese Technik mit hohen Kosten verbunden, weshalb der Einsatz meist auf Anlagen mit geringen Durchsätzen oder auf Anwendungen beschränkt bleibt, bei denen eine alternative Wärmeeintragung schwierig umzusetzen ist. Beispiele sind Edelhölzer, keramische Produkte als auch Lebens- und Genussmittel.

Wärmepumpen

Wärmepumpen können in der Trocknung zur Nutzung der Abwärme oder für die Wärmebereitstellung eingesetzt werden.

Integration in das bestehende System

Werden Wärmepumpen in ein bestehendes System integriert, nutzen diese den Abwärmestrom und heben diesen auf das Temperaturniveau an, welches für den Prozess erforderlich ist (Abbildung 4). Somit steigern sie die Effizienz bestehender Systeme. Insbesondere die Integration von Wärmepumpen bei Konvektionstrocknern bietet große Vorteile, da sie häufig verwendet werden und die Einbindung einer Wärmepumpe leicht umzusetzen ist. Somit besteht das Potenzial, bis zu 50 % Energie im Vergleich zu herkömmlichen Konvektionstrocknern einzusparen.

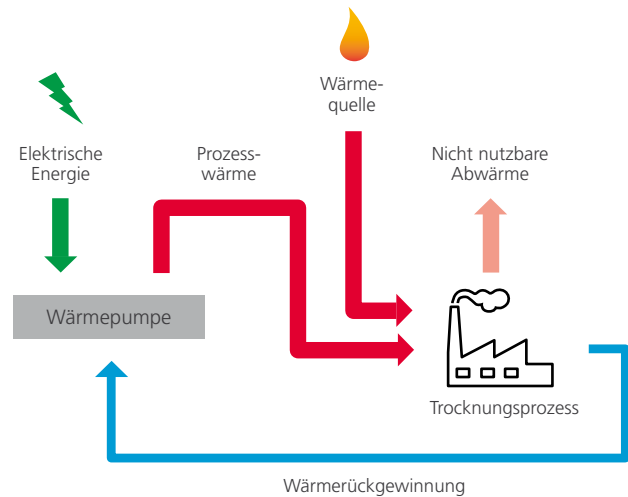


Abbildung 4 Schematische Darstellung der Integration einer Wärmepumpe in ein Trocknungssystem

Erzeugung der Prozesswärme

Wird eine Wärmepumpe allein zur Erzeugung der Prozesswärme eingesetzt, verwendet diese die beim Trocknungsprozess entstehende Abwärme als primäre Energiequelle (Abbildung 5). Diese Abwärme, die sonst teilweise ungenutzt entweicht, wird von der Wärmepumpe auf ein höheres Temperaturniveau gebracht und anschließend wieder in den Prozess eingespeist. Da bei Trocknungsprozessen häufig ein erhöhter Druck herrscht – beispielsweise wird in der Papierindustrie 70 % des Dampfes bei über 3 bar verwendet – sind bei Einsatz von Wärmepumpen zusätzlich Kompressoren notwendig. Durch die Verwendung von Wärmepumpen zur Prozesswärmeerzeugung sind Einsparungen der CO₂-Emissionen zwischen 50 bis 80 % im Vergleich zu fossilbeheizten Systemen möglich.

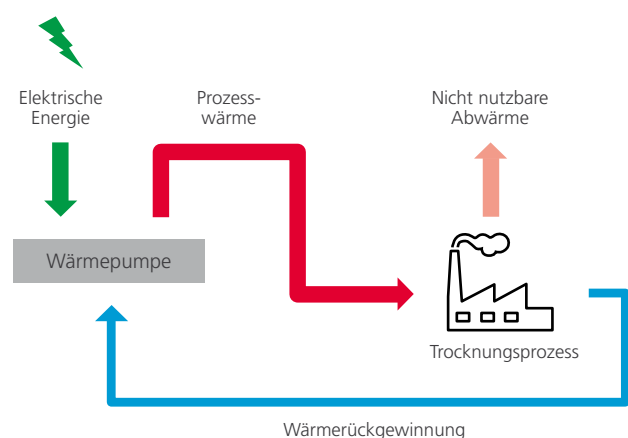


Abbildung 5 Schematische Darstellung der Nutzung einer Wärmepumpe zur Prozesswärmeerzeugung

Aktuelle Grenzen der Wärmepumpe

Der Einsatz von Wärmepumpen in der industriellen Trocknung stößt an Grenzen. Ein wesentlicher Faktor ist das erreichbare Temperaturniveau. Aktuell können Wärmepumpen Temperaturen bis etwa 165 °C erreichen. Im Labor- und Pilotmaßstab sind bereits Temperaturen von 200 °C bis potenziell 300 °C möglich. Diese Technologie ist jedoch noch nicht für den breiten industriellen Einsatz verfügbar. Darüber hinaus sollte auch der jeweilige Preis für Strom bzw. Gas beachtet werden: Ist der Strompreis im Vergleich zum Gaspreis hoch, kann die Wirtschaftlichkeit des Einsatzes von Wärmepumpen beeinträchtigt sein.

Alternative Brennstoffe

Unter alternativen Brennstoffen wird die energetische Nutzung von Biomasse, Biogas oder synthetisch hergestellten Brennstoffen wie Wasserstoff oder Ammoniak verstanden. Diese können fossile Brennstoffe ersetzen und die Abhängigkeit von diesen reduzieren. Theoretisch sind sie eine attraktive Möglichkeit für die Energieversorgung in Trocknungsprozessen. Allerdings steht der Einsatz in Trocknungsprozessen in Konkurrenz zu anderen Nutzungsmöglichkeiten, da die Verfügbarkeit dieser Brennstoffe begrenzt ist. Zusätzlich sind synthetische Brennstoffe im Vergleich zum direkten Einsatz von elektrischer Energie über die gesamte Erzeugungskette hinweg mit Umwandlungsverlusten verbunden.

Solartrocknung

Bei der Solartrocknung wird die Energie der Sonnenstrahlung genutzt, um Material zu trocknen. Es gibt zwei Hauptmethoden: die direkte Trocknung, bei der die Sonnenstrahlen direkt genutzt werden und die indirekte Trocknung – die sogenannte Solarthermie.

Direkte Solartrocknung

Bei den direkten Methoden werden häufig Gewächshauskonstruktionen eingesetzt – beispielsweise in der Klärschlamm-trocknung. Diese Solartrocknungsanlagen sind tendenziell kleiner als herkömmliche industrielle Trockner. So haben durchschnittliche Solartrocknungsanlagen für die Klärschlamm-trocknung eine Kapazität von 380 Tonnen Trockenschlamm pro Jahr im Vergleich zur konventionellen Kontakt-trocknung, die eine Kapazität von 14.000 Tonnen pro Jahr aufweist.

Solarthermie

Eine weitere Möglichkeit der Solartrocknung ist die Solarthermie, die mit dem Einsatz von thermischen Solarkollektoren funktioniert. Nicht-konzentrierende Kollektoren erreichen Temperaturen von bis zu 150 °C, während konzentrierende Kollektoren bis zu 400 °C erzielen. Diese Technik eignet sich beispielsweise

zum Trocknen von Biomasse oder Holzhackschnitzeln mittels Solarluftkollektoren. Die begrenzte Kapazität und die Abhängigkeit von Wetterbedingungen sind wesentliche Faktoren, welche die breitere Anwendung der Solartrocknung in der Industrie einschränken. Aus diesem Grund wird Solarthermie mit anderen Energiequellen wie beispielsweise der Nutzung von Abwärmeströmen kombiniert, um die Zuverlässigkeit zu gewährleisten. Der Einsatz von Pufferspeichern kann hierbei zusätzlich sinnvoll sein, um Schwankungen in der Energieverfügbarkeit auszugleichen und eine kontinuierlichere Trocknung zu gewährleisten.

Tiefengeothermie

Tiefengeothermie nutzt Erdwärme aus einigen Kilometern Tiefe zur Bereitstellung von Wärmeenergie (Abbildung 6). Thermalwasser mit Temperaturen von 100 bis über 200 °C wird mittels Pumpen an die Oberfläche befördert und über Wärmetauscher in nutzbare Wärme umgewandelt.

Ob diese Technik eingesetzt werden kann, hängt stark von der Region ab, da hohe Temperaturen und Förder-raten des Thermalwassers, die sogenannte Fündigkeit, notwendig sind. Informationen zur regionalen Eignung bietet das Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie des Landes Niedersachsen (LBEG).

Erste Untersuchungen zeigen das Potenzial der Tiefen-geothermie für die Dampferzeugung in Trocknungs-prozessen (z. B. Projekt Geothermale Papiertrocknung). Diese ist jedoch kapitalintensiv sowie finanziell riskant, insofern empfiehlt es sich zur Risikominimierung Voruntersuchungen wie 2D- oder 3D-Seismik durchführen zu lassen.

Tiefengeothermie eignet sich für die Verbraucher mit einem Wärmebedarf von mindestens 50 bis 100 GWh pro Jahr und ist aufgrund der kontinuierlichen Ver-sorgung besonders für die Grundlastwärmeversorgung interessant. Bei guter Fündigkeit kann im Vergleich zum Stromeinsatz bis zu 20-mal mehr Wärme bereit-gestellt werden.

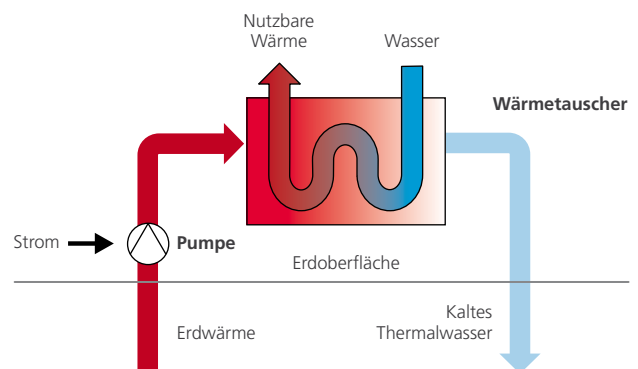


Abbildung 6 Prinzip der Tiefengeothermie

Fazit und Handlungsempfehlung

Die verschiedenen Technologien der industriellen Trocknung bieten eine Vielzahl an Möglichkeiten zur CO₂-Reduktion. Die Steigerung der Energieeffizienz sollte hierbei der erste Schritt sein. Dazu sollte insbesondere die stärkere Nutzung von Abwärme aus dem Trocknungsprozess im Fokus stehen.

Der Einsatz von elektrischen Trocknungsmethoden bietet große Vorteile hinsichtlich der Effizienz und der CO₂-Reduktion. Dabei ist insbesondere der Einsatz von Wärmepumpen, durch die eine deutliche Reduktion des Energieverbrauchs ermöglicht wird, hervorzuheben.

Aktuell ist deren Einsatz bis zu einer Temperatur von circa 165 °C begrenzt, jedoch ist mit einer Steigerung der Zieltemperatur aufgrund zahlreicher Forschungsprojekte zu rechnen. Elektrische Trocknungsmethoden können mit hohen Investitionskosten verbunden sein; speziell wenn bestehende Anlagen umgerüstet werden müssen und der Ausbau der Infrastruktur nötig ist.

Zudem kann die Abhängigkeit von Strompreisen und deren Schwankungen die Betriebskosten beeinflussen. Es bedarf daher einer sorgfältigen Planung, um die Elektrifizierung wirtschaftlich attraktiv zu gestalten und die Dekarbonisierung der Trocknungsprozesse erfolgreich umzusetzen. Bei sämtlichen elektrischen Verfahren und Effizienzmaßnahmen ist davon auszugehen, dass mit steigender Verfügbarkeit an erneuerbaren Energien eine vollständige Dekarbonisierung der Trocknungsprozesse möglich ist.

Obwohl alternative Brennstoffe Potenzial bieten, sollten sie aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit und der Konkurrenz zu anderen Anwendungen nachrangig betrachtet werden.

Das Einsatzgebiet von Solartrocknungssystemen ist groß. Jedoch können diese Systeme aufgrund ihrer begrenzten Kapazität und Wetterabhängigkeit nicht den kompletten Trocknungsbedarf einer industriellen Anlage abdecken. Durch die Kombination mit anderen Energiequellen (Hybridlösung) und den Einsatz von Pufferspeichern kann die Zuverlässigkeit der Solartrocknungssysteme verbessert werden, wodurch sie als Ergänzung eine größere Anwendung in der Industrie finden können.

Tiefengeothermie bietet Potenzial für die CO₂-neutrale Wärmeversorgung, insbesondere bei Anwendungen mit hohem, kontinuierlichem Wärmebedarf, da sie eine Grundlastversorgung ermöglicht. Allerdings ist diese Technologie regional begrenzt und mit finanziellen Risiken verbunden, weshalb umfassende Voruntersuchungen zur Risikominimierung unerlässlich sind.

Allgemein ist die Kenntnis der technischen Möglichkeiten und der eigenen Standortbedingungen (wie vorhandene und zukünftige Infrastruktur, Netzanschlüsse) entscheidend. Hierzu sollten frühzeitig Gespräche mit den relevanten Akteuren wie Energieversorgern, Netzbetreibern und Kommunen (im Rahmen der Kommunalen Wärmeplanung) angestoßen und gemeinsam Pläne erarbeitet werden.

Bildnachweis:
Titelfoto: Sevector (AdobeStock)

Herausgeber:
Klimaschutz- und Energieagentur
Niedersachsen GmbH
Osterstraße 60 | 30159 Hannover

Erstellung in Zusammenarbeit mit:
RWTH Aachen University
Institut für Industrieofenbau und Wärmetechnik (IOB)
Kopernikusstraße 10 | 52074 Aachen

Gefördert durch:
 **Niedersächsisches Ministerium
für Umwelt, Energie und Klimaschutz**