

Gutachten

zu Auswirkungen von Wirbelschleppen auf Dächer nordöstlich des Flughafens Dortmund bei einer um 300 m verlängerten Landebahn 24

1. Untersuchungsgegenstand

Am Flughafen Dortmund soll die Schwelle 24 an das östliche Bahnende verlegt werden, um zukünftig eine Landestrecke in der Hauptbetriebsrichtung von 2.000 m ausweisen zu können. Gegenstand des Gutachtens ist die Untersuchung von Wirbelschleppen bestimmter aktuell und neu am Flughafen Dortmund auftretender und für die Wirbelschleppenbeurteilung maßgebender Flugzeugtypen (A321neo, B737MAX8), die aus Nordost anfliegen und auf der bisherigen Landebahn 24 landen bzw. auf der um 300 m nach NO verlängerten Landebahn 24 künftig landen sollen. Durch die Analyse des Wirbelschleppenverhaltens werden die Gebiete NO-lich des Flughafens bestimmt, in denen die Wirbelschleppen durch Überschreiten eines Grenzünderdrucks Schäden an Dacheindeckungen verursachen können. Dabei wird die additive Wirkung des Unterdrucks im Wirbel und der durch den atmosphärischen Wind verursachten Sogwirkung analysiert. Basierend auf einer 10-jährigen Windstatistik aus dem etwa 20 km entfernten Werl werden für die verschiedenen Flugzeugtypen die Wahrscheinlichkeiten für das Driften der Wirbelschleppen während ihres Absinkens und das entsprechende Überschreiten der Grenzünderdrücke für potentielle Schäden an Dacheindeckungen berechnet. Die daraus und aus den Anflügen auf die bisherige und geplante Schwelle resultierenden Einzugsgebiete werden in eine Karte eingetragen und miteinander verglichen.

2. Bestehendes Wirbelschleppenvorsorgegebiet und Flugzeugmuster

Auf Basis des Gutachtens von U. Peil und G. Schänzer (Peil & Schänzer 2002) wurde für den Flughafen Dortmund ein sog. „Wirbelschleppenvorsorgegebiet“ ausgewiesen, in dem der Flughafen für die hier enthaltenen Gebäude anhand von bestimmten Kriterien Vorsorgemaßnahmen, z.B. die Verklammerung von Dächern, traf. Dieses Gebiet wurde anhand der Charakteristika des damals zugrundgelegten Flugzeugmusters B737-800 und zusätzlich des – inzwischen aus der Genehmigung des Flughafens ausgeschlossenen – Flugzeugmusters Boeing 757 ermittelt. Beim weitaus überwiegenden Teil der am Flughafen Dortmund verkehrenden Pas-

sagierflugzeuge handelt es sich um Derivate der Airbus A320 Flugzeugfamilie (A319 bis einschließlich A321 NEO), so dass im hier vorliegenden Gutachten speziell das hier maßgebende Flugzeugmuster, die A321 NEO, zu untersuchen war, sowie das Flugzeugmuster B737 MAX8, das nach seiner Wiederezulassung ebenfalls am Flughafen Dortmund verkehren wird.

Mit dem Auftraggeber wurde vereinbart, dass die Untersuchungen unabhängig von dem bisher ausgewiesenen Wirbelschleppenvorsorgegebiet anhand der aktuellen Erkenntnisse der Forschung und mit konservativen Annahmen erfolgen sollen, um ein möglichst hohes Vorsorgemaß sicherzustellen.

3. *Zur Physik von Flugzeugwirbelschleppen*

3.1 Wirbelschleppen und ihr Verhalten in der Atmosphäre

Als unvermeidbare Konsequenz des Auftriebs erzeugt jedes Flugzeug (LFZ) hinter seinen Tragflächen ein Paar gegensinnig rotierender und langlebiger Wirbel – die so genannte Wirbelschleppe. Die Wirbelschleppe bildet sich an den Spitzen der Flügel und Klappen hinter dem Flugzeug. Bild 1 links zeigt einen der ansonsten unsichtbaren Wirbel, der hier vom DLR-Forschungsflugzeug ATTAS, einer VFW614, beim Durchstarten am Flughafen Braunschweig erzeugt und durch roten Rauch sichtbar gemacht wurde. Bild 1 rechts zeigt in einem Schnitt senkrecht zur Flugrichtung beispielhaft für das Flugzeug A300-600ST (Beluga) die durch die beiden Wirbel verursachte Strömung.

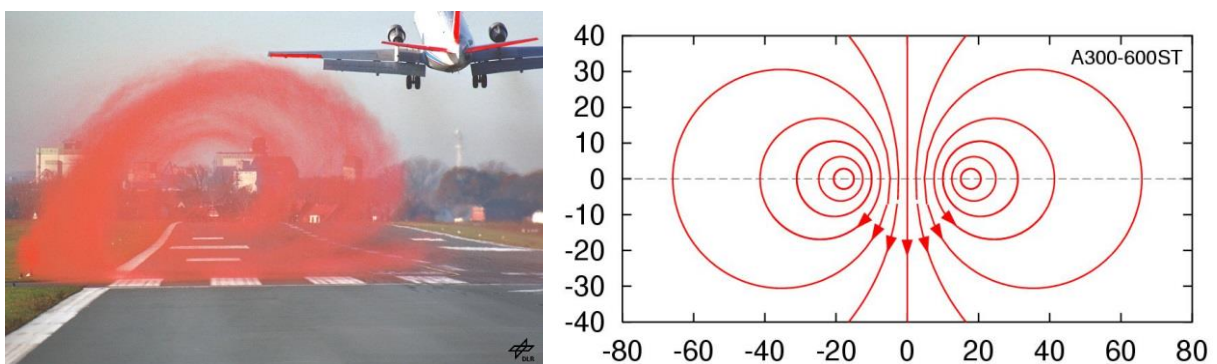


Bild 1. Sichtbarmachung eines Wirbels durch Rauch (links)
und momentane Struktur der Wirbelschleppe (rechts); Abmessungen in Meter.

Bild 2 links zeigt schematisch die Geschwindigkeitsverteilung im rechten Wirbel. Im Wirbelzentrum ist die Geschwindigkeit null und nimmt nach außen bis zum sog. Kernradius (propor-

tional zum Abstand vom Wirbelzentrum) zu. Außerhalb des Kernradius nimmt die Geschwindigkeit wieder kontinuierlich (und zwar umgekehrt proportional zum Abstand vom Wirbel) ab. Bild 2 rechts zeigt zusätzlich in blau die Geschwindigkeitsverteilung des linken Wirbels. In rot sind die Geschwindigkeiten der beiden Wirbel zur resultierenden vertikalen Geschwindigkeitsverteilung der Wirbelschleppe überlagert. Man erkennt, dass zwischen den Wirbelzentren die Geschwindigkeiten (im sog. *downwash*) nach unten gerichtet sind. Außerhalb der Wirbelzentren zeigen die Geschwindigkeiten (im sog. *upwash*) nach oben. Bild 2 rechts erklärt außerdem, warum die Wirbelschleppe absinkt: Jeder Wirbel erfährt in seinem Zentrum durch seinen Nachbarwirbel eine nach unten gerichtete Geschwindigkeit W , die der Sinkgeschwindigkeit des Wirbelpaares entspricht. Die nach unten gerichtete Geschwindigkeit W wächst mit der Stärke der Wirbel (Zirkulation Γ) und ist umso kleiner, je größer der Abstand b der Wirbel voneinander ist.

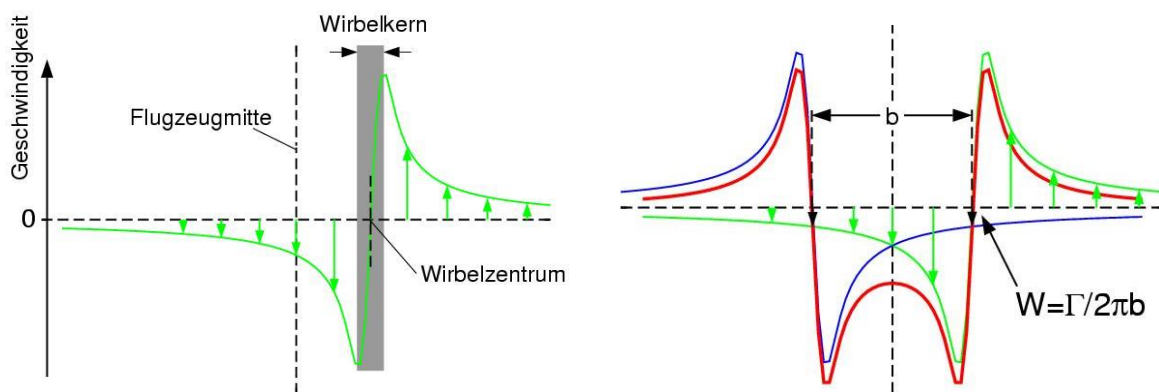


Bild 2. Geschwindigkeitsverlauf durch den rechten Wirbel (links) und die gesamte Wirbelschleppe (rechts in rot).

Die Intensität einer Wirbelschleppe wird durch ihre Zirkulation Γ beschrieben. Diese errechnet sich aus der Bilanz zwischen Gewicht und Auftrieb des Flugzeuges gemäß

$$\Gamma = \frac{M g}{\rho b V}, \quad (1)$$

wobei M die Masse, V die Geschwindigkeit des Flugzeuges, b der Abstand der beiden Wirbel, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ die Erdbeschleunigung und ρ die Luftdichte bezeichnen. Der Wirbelabstand b beträgt bei elliptischer Zirkulationsverteilung $\pi/4$ der Flugzeugspannweite B , was in ausreichender Näherung auch für Hochauftriebsbedingungen im Landeanflug gilt.

Die Zirkulation Γ der Wirbel folgt also direkt aus dem Auftrieb, den das Flugzeug erzeugen muss, um zu fliegen: Je schwerer es ist, umso mehr Auftrieb muss es erzeugen und umso stärker ist die Intensität der Wirbel; die Stärke der Wirbel wird hingegen reduziert, wenn das Flugzeug schneller fliegt oder eine größere Spannweite hat. Schließlich spielt noch die Dichte der Luft eine Rolle: je dünner die Luft umso größer wird die Zirkulation der Wirbel.

Transport und Zerfall der Wirbel werden maßgeblich durch die umgebende Atmosphäre bestimmt. Die durch eigenen Antrieb absinkende Wirbelschleppe wird gleichzeitig durch den sie umgebenden Wind verdriftet. Da die Windgeschwindigkeiten der Atmosphäre nicht gleichförmig sind, werden die beiden Wirbel entsprechend deformiert (Bild 3).

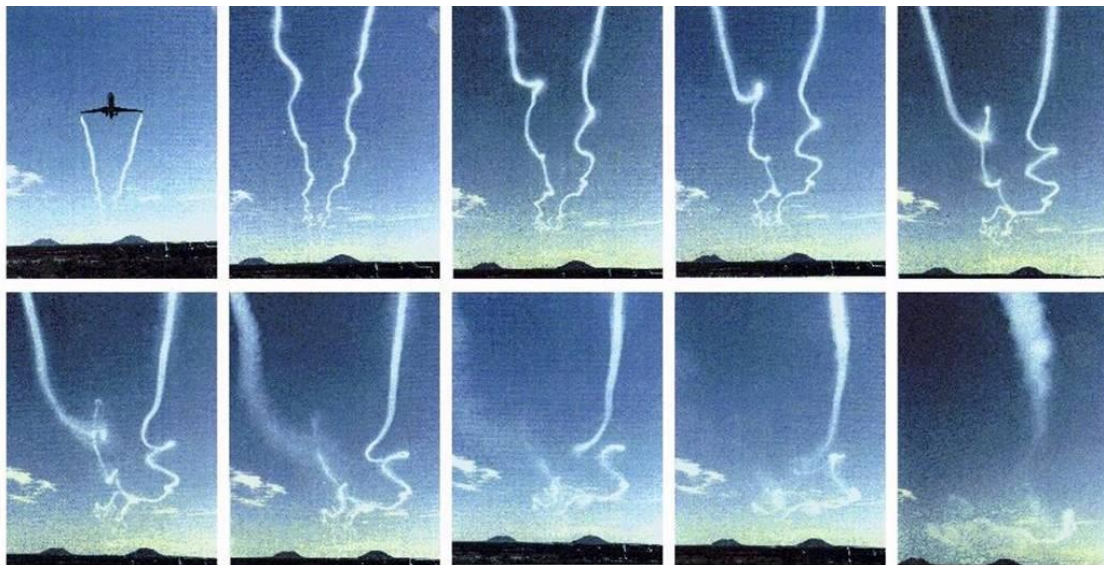


Bild 3. Durch Rauch sichtbar gemachte deformierte Wirbelschleppen (Foto: NASA).

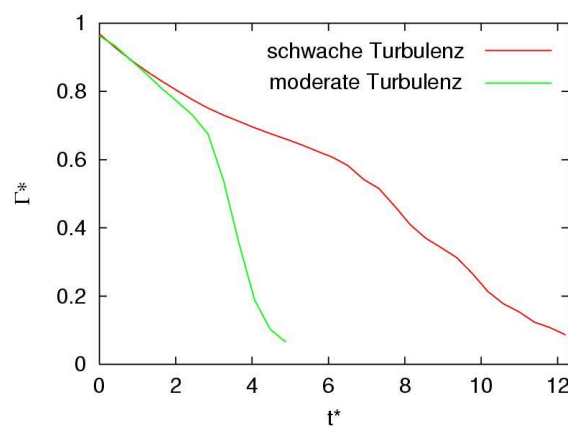


Bild 4. Abnahme der (normierten) Wirbelstärke Γ^* mit der (normierten) Zeit t^* für geringe und moderate Turbulenz.

Die Lebensdauer der Wirbel hängt vor allem von der Turbulenz der Atmosphäre aber auch von der Temperaturverteilung (Schichtung) der umgebenden Luft ab. Bild 4 zeigt die zeitliche Abnahme der Wirbelstärke Γ für verschieden starke Turbulenz der Atmosphäre. Je älter die Wirbel umso mehr geht die in Bildern 1 und 2 gezeigte Struktur verloren: die Geschwindigkeiten werden geringer und zunehmend regellos; am Ende sind sie von atmosphärischer Turbulenz nicht mehr zu unterscheiden.

Der Einfluss des Bodens trägt ebenfalls zum Zerfall bei: In Bodennähe sinken die Wirbelzentren in der Regel bis auf den halben Abstand der Wirbel zum Boden ab und laufen dann seitlich weg. Durch die Wechselwirkung mit dem Boden entstehen zusätzliche kleinere Wirbel, die zum einen zum Wiederaufsteigen der Hauptwirbel führen (Bild 5), zum anderen aber auch den Zerfall beschleunigen.

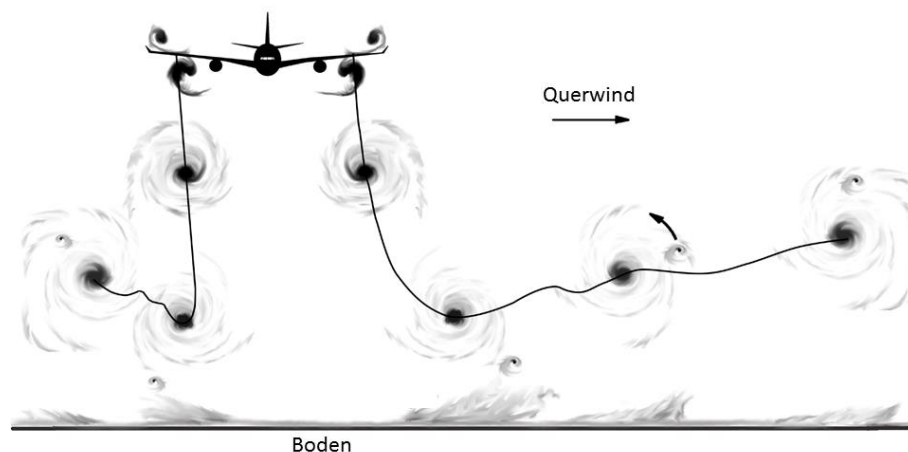


Bild 5. Sequenz des Verhaltens der Wirbelschleppe bei Annäherung an den Boden und Querwind (Quelle: Hallock und Holzäpfel, 2018, Bild 2).

3.2 Die Wirkungen von Wirbelschleppen auf Dacheindeckungen

Die Wirkung von Wirbelschleppen auf Hausdächer wurde von Blackmore (1994) untersucht. Demnach treten Schäden nur an Dächern auf, die mit kleinformatischen Elementen wie dort typischen Ziegeln, Dachschiefer o.ä. gedeckt sind (Bild 6). In Einzelfällen können bis zu 200 Ziegel betroffen sein. Die Schadensfälle lassen erkennen, dass die Ziegel zunächst durch den Unterdruck im Wirbelkern angehoben werden und dann durch die hohen Tangentialgeschwindigkeiten gedreht werden, bevor sie an ihren eigentlichen Platz zurückfallen können.



Bild 6. Von Wirbelschleppen verursachte Dachschäden an Häusern in der Einflugschneise des Flughafens London-Heathrow (aus Präsentation von Blackmore 1994).

Während einer 27-monatigen Beobachtungsperiode an Häusern in der Einflugschneise des Flughafens London Heathrow dokumentiert Blackmore 714 Schäden an Dächern.¹ 70% der Schäden wurden bei Umgebungswindgeschwindigkeiten unter 5 m/s (18 km/h), nur einer bei einem Wind von 10,4 m/s (37 km/h) und darüber überhaupt kein Schaden festgestellt. An einem 1.400 m von der Landebahnschwelle entfernten und nahezu direkt unter dem Flugweg liegenden Testgebäude wurden 1,5 Wirbelschleppen pro Tag gemessen. Bei einem Anflug unter 10.000 Anflügen hatten die Wirbel das Potential Ziegel aus ihrem Verbund zu lösen.

Je größer der Abstand von der Schwelle, umso höher fliegt das LFZ und umso seltener werden die Wirbel tief genug absinken, um Dächer zu erreichen. Deshalb teilt Blackmore (2002) das Einzugsgebiet mit Schäden an Dächern in drei Risikobereiche auf: bis 2 km Abstand von der Landebahnschwelle ist das Risiko hoch, zwischen 2 und 4 km mittel und zwischen 4 und 6 km gering, jenseits von 6 km ist mit keinem Schaden mehr zu rechnen. Die Ausdehnung der Bereiche quer zur Flugrichtung gibt Blackmore mit ± 375 m bei 2 km, ± 750 m bei 4 km und ± 1.125 m bei 6 km Abstand von der Schwelle an.

Weber und Ulken (1982) berichten von Gebäudeschäden im Anflugbereich auf den Flughafen Düsseldorf. Über einen Zeitraum von drei Jahren wurden 42 Gebäude durch Wirbelschleppen beschädigt; die Anzahl der Schadensmeldungen pro 10.000 Bewegungen lag zwischen 0,5 und 2,3. Der maximale Abstand eines beschädigten Gebäudes vom Aufsetzpunkt betrug 4.400 m. Der seitliche Versatz zur Anfluggrundlinie lag bei maximal 270 m.

¹ Gering ist die Häufigkeit der gemeldeten Schäden: Über 3.000 Fälle in einem Zeitraum von 20 Jahren.

3.3 Wirbelschleppen und die induzierten Windgeschwindigkeiten

Für die Ermittlung der von der Wirbelschleppe induzierten Windgeschwindigkeiten als Funktion des Abstands r vom Wirbelzentrum wird das Wirbelmodell nach Oseen und Lamb (s. z.B. Gerz et al. 2002) verwendet,

$$w(r) = \frac{\Gamma}{2\pi r} \left(1 - \exp \frac{-1.257 r^2}{r_c^2} \right). \quad (2)$$

Der Kernradius r_c markiert den Abstand des Geschwindigkeitsmaximums vom Wirbelzentrum. Er skaliert in erster Ordnung mit der Spannweite B und wird in der Literatur für voll entwickelte Wirbelschleppen hinter konventionellen Flugzeugen der zivilen Luftfahrt mit $r_c = 0.05B$ angegeben. Für junge Wirbel kurz nach dem Aufrollvorgang, wie sie in der Studie teilweise betrachtet werden, können Wirbelkerne kompakter sein. Wir berechnen daher den Wirbelkernradius mit $r_c = 0.028B$, wie er für ein Modell des A380 in 6,4 Spannweiten Entfernung gemessen wurde. Wirbelkerne von mittelgroßen LFZ wie die der A320- und B737-Familien haben demnach typische Durchmesser von etwa 2 m.

Um die maximale Geschwindigkeit an einem Objekt am Boden zu induzieren, müssen die Wirbel entsprechend tief absinken. Im Mittel hängt nun die maximale Annäherung des Wirbels an den Boden von der Spannweite des Flugzeuges ab: Je *kürzer* die Spannweite (d.h. i.a. je *kleiner* das Luftfahrzeug, LFZ), desto *näher* können die Wirbel dem Boden kommen und umso wahrscheinlicher können höhere Geschwindigkeiten am Objekt auftreten.

3.4 Unterdrücke im Wirbelkern

Bezüglich der zeitlichen und räumlichen Charakteristik ist eine Wirbelschleppen-Bö einer Wind-Bö ähnlich. Allerdings herrscht -im Zentrum eines Wirbelkerns ein Unterdruck, der den Unterdruck bei weitem übersteigen kann, der durch das schnelle Überströmen z.B. eines Daches erzeugt wird. Unabhängig von der Höhe über Grund und solange der Wirbel ungeschwächt und ungestört ist, kann die Druckdifferenz zwischen Kernzentrum und Umgebung Δp des von uns verwendeten Lamb-Oseen-Wirbels (2) abgeschätzt werden aus

$$\Delta p_{\text{Wirbel}} \approx -0,87 \rho V_{\theta, \text{Rank}, \text{max}}^2, \quad (3)$$

wobei $V_{\theta, Rank, max} = \Gamma/2\pi r_c$ die vom Wirbel induzierte maximale Tangentialgeschwindigkeit bezeichnet.

Für typische Verkehrsflugzeuge schwankt die maximale Druckdifferenz zwischen ungestörtem Wirbelkern und Umgebung gemäß Gl. (3) etwa zwischen -2200 Pa (-0,022 bar) und -2700 Pa (-0,027 bar). Durch gezielte Untersuchungen an einem Hausdach maß Blackmore eine maximale Druckdifferenz von -1190 Pa (-0,0119 bar). Die von uns gefundenen etwa doppelt so hohen Werte erklären sich mit den in Abschätzung (3) eingehenden Geschwindigkeiten des intakten Wirbels, der beim Auftreffen auf ein Hausdach erheblich gestört wird.

Neben dem durch den Wirbelkern am Ziegel erzeugten Unterdruck (Gl. 3) muss auch der Unterdruck berücksichtigt werden, der durch die Sogwirkung des atmosphärischen Windes U , der das Dach überströmt, verursacht wird. Dieser kann gemäß DIN 1055 Teil 4 (März 2005) mit

$$\Delta p_{Wind} \approx -1,2 \frac{\rho}{2} U^2 \quad (4)$$

abgeschätzt werden. Der aerodynamische Kraftbeiwert ist abhängig von der Dachform, Dachneigung, Dachbereich, Lasteinzugsfläche und der Anströmungsrichtung. Aufgrund besonders anfälliger Satteldächer mit relativ steiler Dachneigung wurde der konservative aerodynamische Kraftbeiwert -1,2 gewählt, der bei einer Dachneigung von 45° und einer Anströmrichtung von 90° (entlang des Firsts) im Dachbereich H mit einer Lasteinzugsfläche von 1 m² gilt (DIN 1055 Teil 4, 2005-0).

4. Die konkrete Situation in Dortmund, Datenlage und Methodik

4.1 Die Bebauung und das Gelände nordöstlich des Flughafens

Wir gehen als *worst-case*-Annahme von Dacheindeckungen mit kleinformatischen Ziegeln und großen Dachneigungen aus. Solche Dächer sind im Gebiet nordöstlich des Flughafens Dortmund häufig anzutreffen. Der Grenzünderdruck, ab dem diese Ziegel von Wirbelschleppen angehoben werden können, ist dann $\Delta p_{grenz} = -380$ Pa (-0,0038 bar). Obwohl der Unterdruck im Wirbel vom Zentrum nach außen hin rasch abnimmt, gehen wir dennoch von einem konstanten (und konservativen) Grenzwert aus, da der Druck im Zentrum selbst, d.h. in einem Radius von 20 cm, was in etwa der Ziegelgröße entspricht, nur schwach variiert.

Das Gelände nordöstlich des Flughafens ist orografisch gegliedert: Die Schwelle 24 selbst ist mit 121 m über NN im interessierenden Gebiet am höchsten gelegen, nach Nordosten entlang des Anflugweges fällt das Gelände relativ stetig über Massen (etwa 96 m hoch) bis Unna auf etwa 72 m Höhe ab. Diese Neigung des Geländes in Anflugrichtung wird bei der Berechnung der Anflughöhe berücksichtigt.

4.2 Die untersuchten Flugzeugtypen

Tabelle 1 fasst die untersuchten LFZ-Typen und die Parameter zusammen, die ihre Wirbelschleppe charakterisieren.

Tabelle 1: Die Parameter der untersuchten Flugzeuge und ihrer Wirbelschleppen. Die LFZ-Daten max. Landemasse, Spannweite und Anfluggeschwindigkeit wurden von der PROJECT:airport GmbH zur Verfügung gestellt. Die Luftdichte wurde mit $1,2 \text{ kg/m}^3$ (Standardatmosphäre in 0 m Höhe über Meeresspiegel und Temperatur von $11,5^\circ\text{C}$) angenommen.

LFZ-Typ	Max. Lande- masse <i>M</i> [10^3 kg]	Spann- weite <i>B</i> [m]	Anflug- geschwin- digkeit <i>V</i> [m/s]	Abstand der Wirbel <i>b₀</i> [m]	Zirkulation der Wirbel <i>Γ</i> [m^2/s]	Radius des Wirbelkerns <i>r_c</i> [m]
B737 MAX8	69,3	35,92	73,6	28,2	273	1,01
A321 NEO	79,2	35,80	70,0	28,1	329	1,00

Bild 7 zeigt die typischen Geschwindigkeitssignaturen, wie sie gemäß Gl. (2) von einem Wirbel erzeugt werden, der ungeschwächt bis auf die Hälfte seines anfänglichen Wirbelabstands zum Boden absinkt. Die Asymmetrie in den Geschwindigkeitsfeldern rührt aus der Wechselwirkung des Wirbels mit dem Boden. Beide LFZ induzieren ähnliche Wirbelgeschwindigkeiten, lediglich die Spitzenwerte am Rand des Wirbelkerns 14 und 15 m über dem Boden liegen beim A321 wegen seiner größeren Masse und der etwas geringeren Anfluggeschwindigkeit deutlich über den Werten der B737.

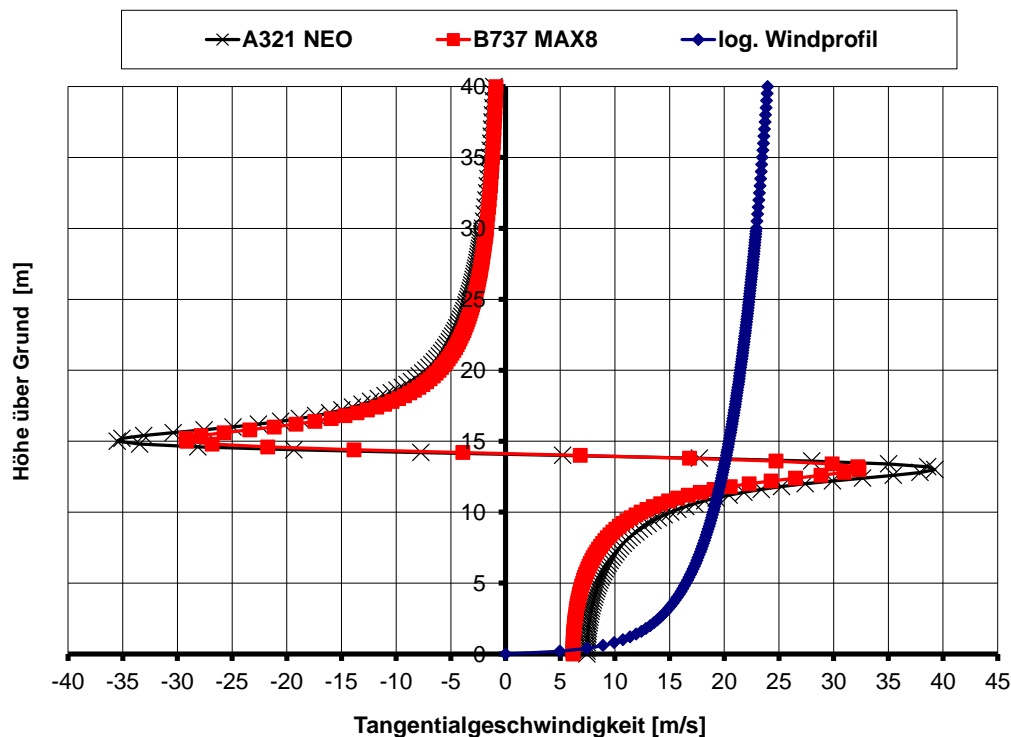


Bild 7. Die von den Wirbeln der Flugzeugtypen A321 NEO und B737 MAX8 induzierten Windgeschwindigkeiten, wenn die Wirbel bis auf eine Höhe des halben anfänglichen Abstands der Wirbel zum Boden abgesunken sind. Zum Vergleich ist auch ein für stürmisches Wetter typisches mittleres atmosphärisches Windprofil gezeigt, bei dem eine Windgeschwindigkeit von 19 m/s (Beaufort 8) in 10 m Höhe angenommen wurde.

4.3 Die meteorologischen Parameter

Für die Windverhältnisse am Flughafen Dortmund wird eine 10-jährige Windstatistik (2009-2018) aus dem etwa 20 km nordöstlich liegenden Werl herangezogen. Es wird ein reduzierter Datensatz benutzt, der nur die Betriebszeiten des Flughafens Dortmund von 06 bis 22 Uhr berücksichtigt². Die zur Verfügung gestellte Statistik enthält die Anzahl der Eintrittsstunden pro Windsektor und Geschwindigkeitsklasse. Um Wahrscheinlichkeiten zu erhalten, wurden die Werte mit der Anzahl der Gesamtstunden (61616 Std) normiert.

Bild 8 zeigt, dass Winde aus SW- und NO-lichen Richtungen dominieren – entsprechend ist die Piste des Flughafens ausgerichtet. Die Windstatistik beruht auf Messungen in 10 m Höhe. Zur Extrapolation der Windgeschwindigkeiten in größere und kleinere Höhen wird das logarithmische Windgesetz

² Die Windstatistiken wurden uns dankenswerterweise vom Ingenieurbüro Dr.-Ing. Dröscher, veranlasst durch PROJECT:airport GmbH, zur Verfügung gestellt.

$$U = (u_* / \kappa) \ln (z / z_0) \quad (5)$$

mit einer Rauigkeitslänge von $z_0 = 5 \text{ cm}$ angewandt, wobei $u_* = 0,0774 U(10 \text{ m})$ die Schubspannungsgeschwindigkeit und $\kappa = 0,41$ die Kármánsche Konstante bezeichnen (siehe z.B. Etling 1996). Diesen mittleren Winden werden die durch Wirbelschleppen induzierten Böen überlagert.

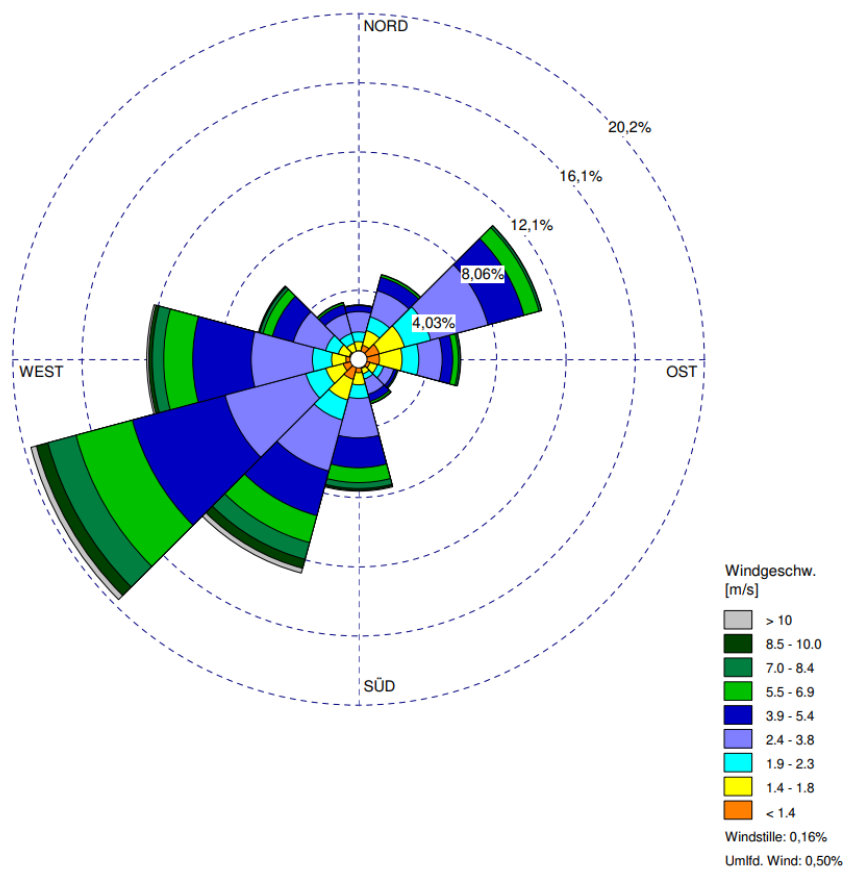


Bild 8. Windstatistik 2009-2018 für den Flughafen Dortmund. Die Windrichtung ist in 12 Segmente zu 30° , der Windgeschwindigkeitsbetrag in 18 Klassen variabler Stärke unterteilt. (In der Abbildung ist der Windbetrag wegen der besseren Lesbarkeit in 9 Klassen eingeteilt.) Nur Winddaten in den Betriebszeiten des Flughafens von 06 bis 22 Uhr wurden berücksichtigt, siehe Fußnote 2.

In Bild 7 ist auch das gemäß Gleichung (5) bestimmte Profil des mittleren Windes bei stürmischem Wetter (mit im Mittel 8 Beaufort in 10 m Höhe) dargestellt: Nur nahe am Wirbelkern, hier also beispielhaft ab einer Höhe von 12 m, liegen die von den Flugzeugwirbeln erzeugten Winde über dem atmosphärischen Wind.

4.4 Die Berechnungen

Zur Ermittlung der Absinkhöhe, des lateralen Transports und des Zerfalls der Wirbelschleppen verwenden wir unser im Rahmen der DLR-Projekte *Wirbelschleppe* und *Wetter & Fliegen* entwickeltes parametrisches Wirbelschleppenmodell D2P (für englisch *Deterministic Two-Phase Wake Vortex Decay and Transport Model*) (Holzäpfel, 2003, Holzäpfel und Robins, 2004, Holzäpfel, 2006, Holzäpfel und Steen, 2007, Frech und Holzäpfel, 2008). D2P berechnet die vertikale und laterale Position sowie die Zirkulation der Flugzeugwirbel unter Berücksichtigung der Flugzeugparameter und der Umgebungsparameter Wind, Turbulenz, Temperaturschichtung und dem Einfluss des Bodens.

Es werden Anflüge aus Nordost (Landung auf Bahn 24) mit einem Gleitpfadwinkel von 3° untersucht. Die Start-/Landebahn hat heute eine Länge von 2000 m, die Schwelle 24 soll innerhalb der befestigten Fläche um 300 m nach NO verlagert werden. Wir gehen bei einem Gleitwinkel von 3° von einer Schwellenüberflughöhe von 15 m aus, wodurch sich ein Aufsetzpunkt von 286 m hinter der Schwelle ergibt. Der Ursprung des verwendeten Koordinatensystems wird auf den heutigen Aufsetzpunkt der Bahn 24 gelegt. Zur Berechnung der Einzugsgebiete bei Anflügen auf die geplante, um 300 m versetzte Schwelle wird an jeder Stützstelle die Anflughöhe um 15,7 m reduziert. Landungen mit Rückenwind gehen nicht in die Berechnungen ein.

Mit D2P werden der Wirbelschleppentransport und -zerfall an 15 Gleitpfadpositionen $(x, z) = (8586 \text{ m}, 450 \text{ m})$ bis $(572 \text{ m}, 30 \text{ m})$ vor dem Aufsetzpunkt im Intervall von $(\Delta x, \Delta z) = (572 \text{ m}, 30 \text{ m})$ berechnet.³ Lateral zu den Gleitpfaden erstreckt sich die Untersuchung auf ein Gebiet zwischen $-4000 \text{ m} \leq y \leq 4000 \text{ m}$ mit einer Schrittweite von $\Delta y = 50 \text{ m}$. Dabei repräsentiert jede Position (x, y) ein Gebiet von $x - 286 \text{ m}$ bis $x + 286 \text{ m}$ und von $y - 25 \text{ m}$ bis $y + 25 \text{ m}$.

Mit dem mittels D2P nach Gleichung (3) errechneten Druckminimum im Wirbelzentrum und der Sogwirkung des atmosphärischen Windes nach Gleichung (4) wird die Druckdifferenz zwischen dem Zentrum des auf dem Dach entlang streichenden Wirbels und dem Außendruck gemäß

$$\Delta p_{ges} \approx \Delta p_{Wirbel} + \Delta p_{Wind} \quad (6)$$

³ Die Zahlenwerte sind auf volle Meter gerundet.

bestimmt und schließlich die Gebiete unter den Anflugsektoren ermittelt, in denen an Dächern der Grenzwert $\Delta p_{\text{grenz}} = -380 \text{ Pa}$ (-0,0038 bar) erreicht oder unterschritten wird. Dabei werden alle Positionen erfasst und berücksichtigt, an denen die Wirbel während ihrer Entwicklung unter eine Höhe von 80% des anfänglichen Wirbelabstandes b_0 absinken. Für die beiden LFZ-Muster ist das eine Höhe von 22,5 m (vgl. Tabelle 1). Das ist konservativ abgeschätzt, da die Wirbel noch tiefer kommen und sich dabei auch so verformen müssen, dass sie Hausdächer treffen können.

Im ungestörten Fall nähern sich die Wirbel zwar bis auf die Hälfte ihres anfänglichen Abstandes dem Boden, aber nur in seltenen Fällen, insbesondere bei Geländeinhomogenitäten und Turbulenz, können ihre Zentren bis auf ein Viertel dieses Abstandes absinken. Dies wird durch die Auswertung der Daten einer Messkampagne am Flughafen Frankfurt bestätigt (Holzäpfel und Steen, 2007), denn 41% der untersuchten Wirbelschleppen sanken dort bis maximal auf ihren halben anfänglichen Abstand zum Boden ab und 0,4% erreichten die minimale Höhe von einem Viertel des anfänglichen Abstands.

Berechnet wird die Häufigkeit, mit der für die gegebene Windstatistik bei einem Anflug der Druck den Grenzdruck an Stützstellen entlang des Anflugweges unterschreitet. Dabei ist es zweckmäßig die Häufigkeiten auf 100% der Landungen pro Anflugrichtung zu beziehen. Dazu müssen die Häufigkeitsverteilungen der Windsektoren aus der Windstatistik korrigiert werden: Anflüge auf die Bahn 24 finden statt, wenn der Wind zwischen einschließlich 150° und 330° , also in 69,8% aller Fälle weht (Korrekturfaktor als Kehrwert 1,43).

Um zu Ergebnissen zu gelangen, die mit der Größe der beobachteten Einzugsgebiete mit Dachschäden in etwa übereinstimmen (vgl. Abschnitt 2.2), kalibrieren wir unsere Berechnungen mit der Häufigkeit der Schadensmeldungen nach Blackmore. Demnach hat an einem Haus, das etwa 1.400 m vor der Schwelle unter dem Gleitpfad steht, 1 von 10.000 Überflügen das Potential Dachziegel herauszulösen. Da wir etwa 1.000 mal häufiger Unterschreitungen des Grenzdrucks in niedrigen Höhen berechnen als Blackmore am Dach gemessen hat, nehmen wir also an, dass 0,1% aller berechneten Unterschreitungen des Grenzdrucks auch in Dachnähe auftreten und somit Ziegel anheben können. Diese Ergebnisse sind für Quoten größer 0,01% graphisch dargestellt.

5. Ergebnisse

5.1 Dachschäden durch Unterdrücke

Die resultierenden Einzugsgebiete für potentielle Dachschäden nordöstlich der Bahn (Anflug 24 und 24 geplant) mit Unterschreitungen des Grenzdrucks sind im Bild 9 und im Anhang für Quoten über 0,01% (1 potentieller Schaden auf 10.000 Anflüge des jeweiligen LFZ-Typs) für die beiden Flugzeugmuster und die beiden Anflugpfade dargestellt.



Bild 9. Wirbelschleppenerwartungsgebiete für die zwei untersuchten Flugzeugmuster bei Anflügen auf die aktuelle und die geplante Schwelle 24.

Die Wirbelschleppen beider untersuchter LFZ (Tabelle 1) können so tief absinken, dass sie prinzipiell Dächer in jeder typischen Höhe in Obermassen nördlich und südlich des Anflugweges treffen und dort Unterdrücke von weniger als -380 Pa (-0,0038 bar) erzeugen können, die Ziegel anheben können. Generell steigt die Wahrscheinlichkeit, dass eine Wirbelschleppe ein Gebäude treffen kann, mit dessen Höhe an. Die Gebiete für die beiden LFZ-Muster bei Landungen auf der **aktuellen Schwelle** unterscheiden sich nur sehr wenig und erstrecken sich nördlich des Anflugweges bis 400 m an der dritten und bis 250 m an der vierten schwarzen Stützstelle. Südlich des Anflugweges werden Abstände bis 350 m bzw. 250 m erreicht.

Bei Nutzung der **geplanten Schwelle** 300 m weiter nordöstlich fliegen die LFZ 15,7 m tiefer an. Das resultierende Einzugsgebiet für die Wirbel der B737 MAX8 bleibt dabei hinsichtlich Lage und Ausdehnung nahezu unverändert, während es für die A321 NEO um eine Stützstelle weiter nach NO reicht, was nun die Siedlung südlich des Anflugweges zwischen der vierten und fünften schwarzen Stützstelle mit einbezieht⁴.

5.2 Abgleich der Lage der bisherigen Schadensfälle mit den Treffergebieten

Acht Wirbelschleppenvorfälle wurden zwischen dem 31.08.2001 und dem 29.11.2008 vom Flughafen registriert. Von diesen wurde einer durch die heute nicht mehr anfliegende B757-200 und drei durch eine B737-800 verursacht; bei den anderen Fällen ist das verursachende LFZ unbekannt. Das daraufhin vom Flughafen ausgewiesene Wirbelschleppenvorsorgegebiet hat in etwa die gleiche Ausdehnung nach NO wie die von uns gefundenen Einzugsgebiete, ist aber in seiner lateralen Erstreckung etwas schmaler.

Am Flughafen Dortmund waren von 2000 bis 2019 insgesamt 180.680 Landungen im Linienverkehr zu verzeichnen, davon ca. 70 %, also etwa 126.500 Anflüge in Hauptrichtung 24. Setzt man die 8 als Wirbelschleppenvorfälle anerkannten Dachschäden mit der Anzahl der Landungen auf Bahn 24 ins Verhältnis, kommt man auf eine Schadenswahrscheinlichkeit von 0,6 pro 10.000 Landungen.

6. *Fazit*

In dem vorliegenden Gutachten wurden die Wirbelschleppenerwartungsgebiete am Flughafen Dortmund für die zwei Luftfahrzeugmuster B737 MAX8 und A321 NEO bei Anflügen auf die bestehende und die geplante, um 300 m nach NO versetzte Schwelle 24 berechnet. Das Wirbelschleppenerwartungsgebiet ist definiert als der Bereich unterhalb und seitlich des Anflugweges, in dem die Wirbel der untersuchten LFZ-Muster tief genug absinken, um in die Nähe von Dächern mit typischen Bebauungshöhen zu gelangen und das Potential haben, einen unbefestigten Dachziegel aus dem Verbund zu lösen. Begrenzt werden die Gebiete durch den Wahrscheinlichkeitswert 0,01% (also 1 von 10.000 Anflügen). Es ist dabei zu beachten,

⁴ Dieser Sprung in der Größe der Einzugsgebiete resultiert daraus, dass die angewandte Methode diskrete Stützstellen und einen festen Grenzwert von 0,01% verwendet. Während dieser Grenzwert bei der A321 NEO an der fünften Stützstelle gerade überschritten wird, wird er von der B737 MAX8 gerade nicht erreicht.

dass generell alle Gebäude in dem Erwartungsgebiet von einer Wirbelschleppe getroffen werden können, wobei die entsprechende Wahrscheinlichkeit mit der Gebäudehöhe ansteigt.

Die angestellten Untersuchungen zeigen, dass sich die Größe der Treffergebiete für die beiden LFZ-Muster bei Landungen auf der aktuellen Schwelle nur sehr wenig unterscheiden. Wird künftig die neue, um 300 m nach NO versetzte Schwelle angeflogen, ändert sich das Einzugsgebiet für die Wirbel der B737 MAX8 nur marginal, während es für die A321 NEO um eine Stützstelle (572 m) weiter nach NO reicht und damit auch die Siedlung südlich des Anflugweges und nördlich der Bahnlinie umfasst.

Es liegt in der Natur der Wirbelschleppen begründet, dass sich ihr Verhalten in der Atmosphäre und die sich daraus eventuell ergebenden Schäden nicht genau vorhersagen lassen. Das trifft insbesondere auch auf die Wechselwirkung der Wirbelschleppe mit Dächern zu. Daher haben wir zum einen einen statistischen Ansatz gewählt, um Wahrscheinlichkeitsaussagen zu möglichen Schäden machen zu können, und andererseits dort eine Reihe konservativer Annahmen getroffen, wo genaue Angaben oder Zusammenhänge nicht bekannt sind.

Wir betonen, dass ein potentieller Schaden bei 10.000 Anflügen nicht bedeutet, dass dann auch Ziegel aus dem Dachverband herausgelöst werden, sondern dass die Wirbelschleppen aus physikalischen und geometrischen Gründen das Potential dazu haben. Ob Ziegel tatsächlich herausgelöst werden, hängt von der Gestalt und Kohärenz des Wirbels, wie er auf das Dach trifft und von der Art und dem Zustand der Dachdeckung ab. Tatsächlich eintretende Dachschräden sind statistisch also noch weniger wahrscheinlich als die hier berechneten potentiellen Schäden. Dies wird durch die Quote anerkannter Wirbelschleppenschäden von 0,6 pro 10.000 Anflügen in Dortmund bestätigt.

7. *Literatur*

Blackmore P.A. 1994: The effect of aircraft trailing vortices on house roofs. J. Wind Engin. Ind. Aerodyn. 52, 155-170.

Blackmore P.A. 2002: Slate and tile roofs: avoiding damage from aircraft wake vortices. Digest 467, 12 pp.

DIN Deutsches Institut für Normung e.V., DIN 1055 Teil 4: Windlasten - März 2005, Beuth Verlag GmbH Berlin.

Etling D. 1996: Theoretische Meteorologie, Vieweg, 318 Seiten.

Frech, M., Holzäpfel, F. 2008: Skill of an Aircraft Wake-Vortex Model using Weather Prediction and Observation, *J. Aircraft* **45** No. 2, 461-470.

Gerz T., Holzäpfel F. & Darracq D. 2002: Commercial aircraft wake vortices. *Progr. Aerosp. Sci.* **38**, 181-208.

Hallock J.N. & Holzäpfel F. 2018: A Review of Recent Wake Vortex Research for Increasing Airport Capacity, *Progress in Aerospace Sciences* **98**, 27-36, <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2018.03.003>.

Holzäpfel F. 2003: Probabilistic Two-Phase Wake Vortex Decay and Transport Model. *J. Aircraft* **40**, No. 2, 323-331.

Holzäpfel F., Robins R.E. 2004: Probabilistic Two-Phase Aircraft Wake-Vortex Model: Application and Assessment. *J. Aircraft* **41** Nr. 5, 1117-1226.

Holzäpfel F. 2006: Probabilistic Two-Phase Aircraft Wake-Vortex Model: Further Development and Assessment, *J. Aircraft* **43** No. 3, 700-708.

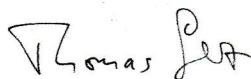
Holzäpfel F., Steen M. 2007: Aircraft Wake-Vortex Evolution in Ground Proximity: Analysis and Parameterization, *AIAA Journal* **45**, No. 1, 218-227.

Peil U., Schänzer G. 2002: Analyse der Wirbelschleppenproblematik im Anflugbereich des Flughafens Dortmund und Erörterung von Maßnahmen zu deren Entschärfung“, 44 Seiten.

Weber O., Ulken R. 1982: Analyse des Einflusses von Wirbelschleppen auf Dachdeckungen im Anflugbereich des Flughafens Düsseldorf, DFVLR-Mitteilung 82-01, 62 Seiten.

Das Gutachten wurde von uns nach bestem Wissen und dem aktuellem Stand der Forschung erstellt. Die Haftung für Schäden, die im Zusammenhang mit den in diesem Gutachten behandelten Wirbelschleppen entstehen könnten, ist grundsätzlich ausgeschlossen.

München und Utting, im April 2020



Dr. Thomas Gerz



Dr.-Ing. habil. Frank Holzäpfel

Anhang:

1 Karte

