TECHNISCHE FORSCHUNG · GRENZBEREICH DER STRÖMUNGSMECHANIK

Blow-up bei Navier–Stokes: Hält die Ventilator-CFD noch stand?

Der Wandel von 2026 ist kein Zusammenbruch der CFD: Er sagt genauer, wo den Gleichungen zu trauen ist und wo Ingenieure auf Messdaten bauen müssen.

Technische Studie · SUNXFAN-Redaktionsteam · 2026-11

Web: https://en.sunxfan.com/de/blog/navier-stokes-blowup-cfd-fan-engineering/

Auf dem Feld der Ventilatoren verhandeln wir täglich mit der Luft. Jeder Bogen eines Laufrads und jede Kurve der Spirale stehen auf demselben Gleichungssatz: Navier–Stokes. Er beschreibt, wie sich ein viskoses Fluid bewegt – das mathematische Fundament unter Wettervorhersage, Flugzeugentwurf und der Aerodynamik jedes Radial- und Axialventilators, den wir bauen.

Seit mehr als zwei Jahrzehnten liegt eine Frage über diesem Fundament: Bleibt die Lösung in drei Dimensionen bei glatten Anfangsdaten für immer glatt, oder kann sie in endlicher Zeit „durchgehen" und Geschwindigkeit oder Wirbelstärke ins Unendliche treiben?

2026 hat sich diese Frage tatsächlich gewendet. Nicht weil sie gelöst wurde, sondern weil die mathematische Gemeinschaft begann, eine lange abgewehrte Möglichkeit ernst zu nehmen: dass der Blow-up das intrinsische Verhalten eines Fluids unter extremen Bedingungen ist und dass Glattheit der Fall ist, der eine zusätzliche Erklärung verlangt.

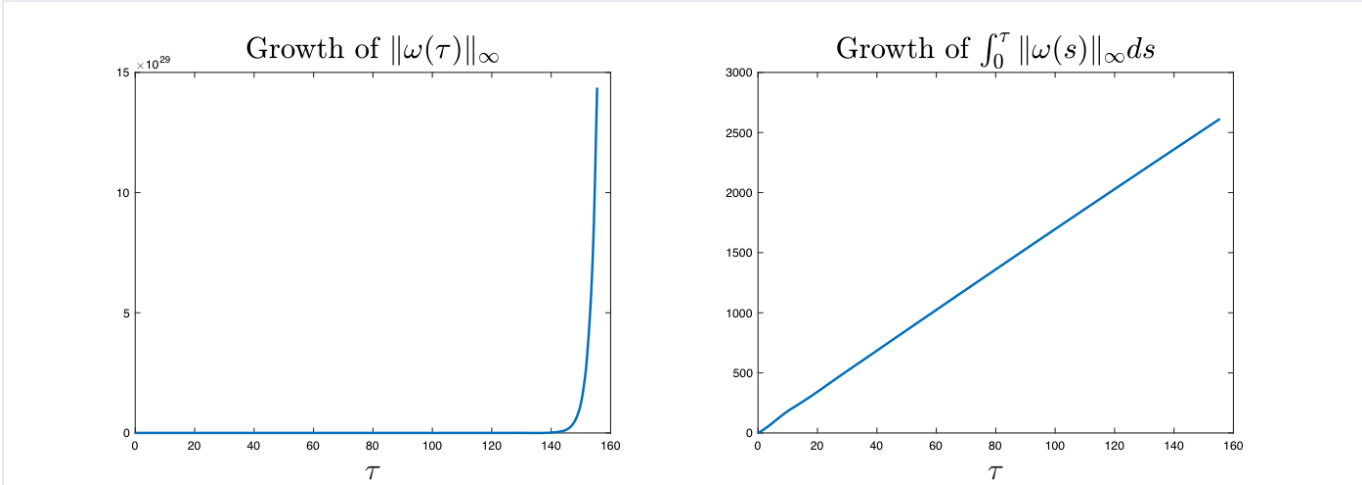


Fig. 15 Growth of maximum vorticity for the rescaled Navier-Stokes model. Left plot: the amplification of

Abbildung 1 — Entwicklung der Wirbelstärke für die 3D-Navier–Stokes-Gleichungen in einem verallgemeinerten axisymmetrischen Ansatz. Die Spitzenwirbelstärke wächst in endlicher Zeit steil an, und die integrierte Wirbelstärke verletzt das Beale–Kato–Majda-Kriterium – genau die numerische Signatur, die eine Singularität in endlicher Zeit hinterließe. Originalabbildung: Referenz 1 (Hou, J. FoCM 2026, Abb. 15/16).

1. Die Wende von 2026: drei Beweislinien, die in dieselbe Richtung zeigen

1.1 OpenAIs erzwungener Blow-up: ein Schock für das Feld, kein Urteil

Am 8. September 2026 meldete OpenAI, ein Multiagentensystem habe in rund 88 Stunden einen Blow-up in endlicher Zeit für die 3D-inkompressiblen Navier–Stokes-Gleichungen konstruiert, angetrieben von einem glatten Kraftterm mit kompaktem Träger und in Lean 4 verifiziert. Liest man nur die Schlagzeile, wirkt das wie eine direkte Antwort auf das Millennium-Problem.

Die Prüfung folgte schnell. Ein unabhängiges Lean-Audit ergab, dass die kompilierte Formalisierung das Manuskript in natürlicher Sprache nicht getreu übersetzte: Lemma 8.6 beansprucht die Kontrolle des inversen Operators mit m+4 Ableitungen, während der Lean-Code m+5 verlangt. Der tiefergehende Einwand betrifft die Problemstellung selbst. Die Millennium-Version ist unerzwungen und energiefinit; die OpenAI-

Konstruktion stützt sich auf eine eigens konstruierte glatte Kraft, die Enstrophie fortlaufend in hohe Wellenzahlen pumpt. Ob ein erzwungener Blow-up eine unerzwungene Frage beantwortet, ist alles andere als geklärt. Das Clay Mathematics Institute hat nichts anerkannt, und OpenAI erklärte selbst, den Preis nicht zu beanspruchen.

1.2 Das PINN aus Caltech: ein selbstähnliches Profil in einer unerzwungenen Welt

Den Gegenpol zu OpenAIs erzwungenem Weg bildet die Konstruktion eines selbstähnlichen Blow-up-Profils für die 3D-Euler-Gleichungen mit einem physikinformierten neuronalen Netz eines Caltech-Teams – unerzwungen, unbeschränkt, im freien Raum. Terence Tao hat diese Herangehensweise am Abend vor OpenAIs Ankündigung öffentlich unterstützt. Ihre Bedeutung ist methodisch: Von außen wird nichts eingebracht; die Gleichungen dürfen ihre eigene Singularität entwickeln, was dem Bild einer intrinsischen hydrodynamischen Instabilität näher kommt.

1.3 Der Konsensus verschiebt sich: von „Glattheit beweisen“ zu „Blow-up verstehen“

Wichtiger als jeder einzelne Beweis ist, dass sich der Konsensus selbst bewegt. 2026 stellte Tao klar fest, das Denken des Feldes habe sich verschoben und die Regularitätsvermutung gelte inzwischen weithin als falsch – bestimmte Anfangsdaten würden in endlicher Zeit durchgehen. Über 2025–2026 hinweg meldeten unabhängige Gruppen Konstruktionen oder starke Evidenz aus verketteter Wirbelrohrstreckung, topologischer Verriegelung und Kaskadenmechanismen. Die gemeinsame Anstrengung wandert davon ab, zu beweisen, dass Lösungen glatt bleiben, und hin dazu, zu beschreiben, wann und auf welche Weise sie es nicht tun.

2. Die Geometrie hinter dem Blow-up: eine Rückkopplungsschleife der Wirbelstreckung

Dass Navier–Stokes durchgehen kann, liegt an einem geometrischen Mechanismus, dem dreidimensionale Strömung nicht entkommt: der Wirbelstreckung. Wird ein Wirbelrohr entlang seiner Achse gestreckt, erzwingt die Drehimpulserhaltung, dass es schneller und dünner rotiert; schnelleres Rotieren verstärkt die Streckung weiter. Das ist eine positive Rückkopplungsschleife. Die mathematische Frage ist, ob die viskose Dissipation immer stark genug ist, um sie niederzuhalten.

Caltechs Numerik zeigt die Folge deutlich: In den verallgemeinerten axisymmetrischen Gleichungen wächst die Spitzenwirbelstärke in endlicher Zeit wie $O(1/(T-t))$, und die integrierte Wirbelstärke verletzt das Beale–Kato–Majda-Kriterium, was die Bildung einer Singularität in endlicher Zeit markiert. Die Viskosität spielt hier eine kontraintuitive Rolle. Weil viskose Regularisierung die Lösung glatter und stabiler macht, kann sie die nichtlineare Ausrichtung, die die Wirbelstreckung treibt, sogar verstärken statt dämpfen.

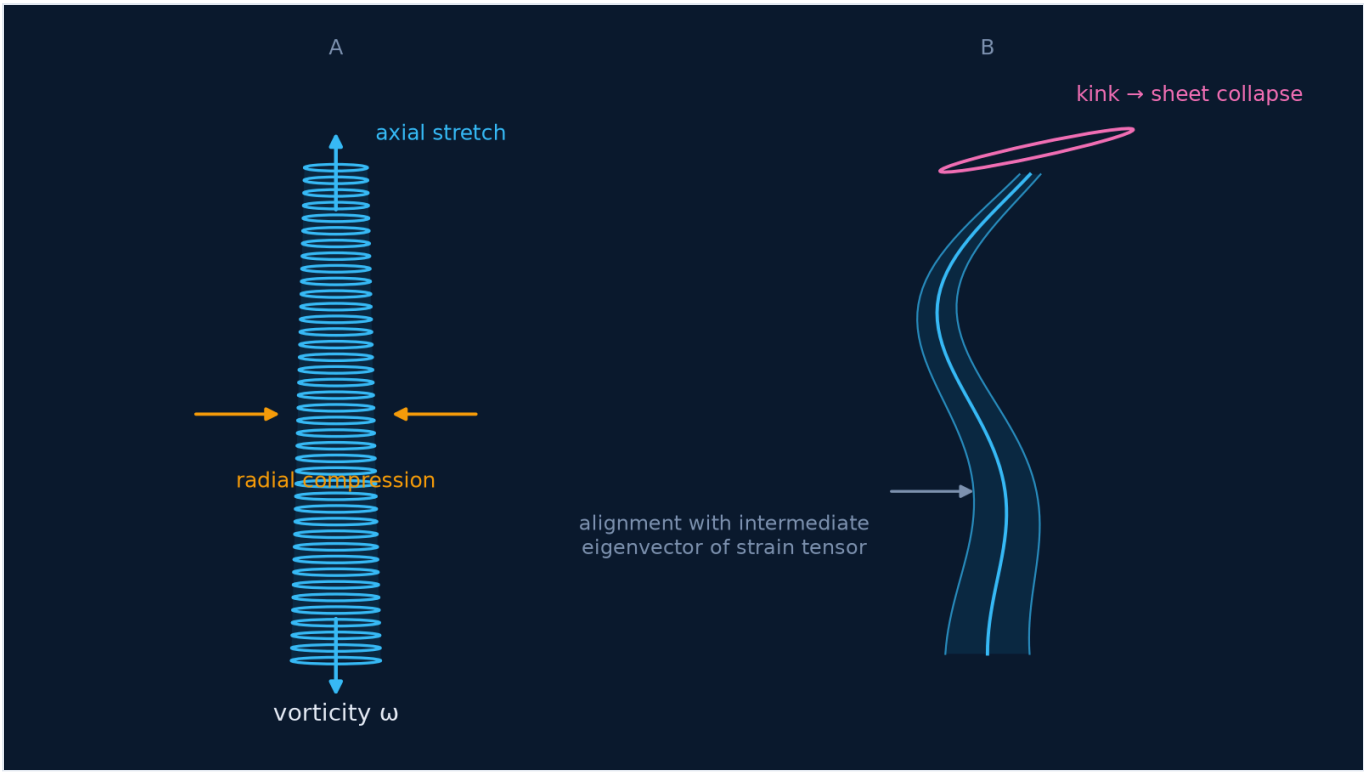


Abbildung 2 — Schema der Streckung eines Wirbelrohrs. Wird das Rohr axial gestreckt und radial komprimiert, richtet sich die Wirbelstärke tendenziell am mittleren Eigenvektor des Dehnungsratentensors aus, und das Rohr knickt schließlich ein und kollabiert zu Schichten. Das ist die Geometrie des Streckungsterms selbst. Originalabbildung: Referenz 2 (Ruhr-Universität Bochum, Abb. 2.3); für mehr Klarheit hier neu gezeichnet.

3. Was das für Ventilatoren-Ingenieure bedeutet: eine häufig falsch gelesene Schlussfolgerung

Die verbreitete Fehldeutung lautet: Wenn Navier–Stokes durchgehen kann, dann sind CFD und der darauf aufbauende Ventilatorentwurf ungültig.

Das Gegenteil trifft zu. Der Blow-up ist eine Aussage über ein Kontinuumsmodell bei unendlicher Auflösung unter extremen Bedingungen. Die technische CFD löst dieses Problem nie. Sie löst eine gezähmte Version: begrenzte Geometrie, ein diskretes Netz, einen RANS- oder LES-Turbulenzabschluss und ein Ziel, das über die mittlere Strömung definiert ist. Was Ingenieure täglich bekämpfen, ist keine ins Unendliche laufende Wirbelstärke, sondern steile Gradienten, zu grob aufgelöste Wirbel, Ablösung und Abschlüsse, die in bestimmten Betriebsbereichen stillschweigend aufhören zu funktionieren.

Eine Large-Eddy-Simulation axialer Elektronikkühlungsventilatoren aus dem Jahr 2025 macht diese „technische Nichtglattheit“ sichtbar. Bei normalen Gegendrücken (0 und 6 mmH_2O) bleibt die Strömung auf der Saugseite anliegend, gepaarte Einlasswirbelrohre treten mit guter Kohärenz auf, und Spaltwirbel an der Schaufelspitze sind klar ausgeprägt. Bei 12 mmH_2O erscheint eine Ablösezone an der Vorderkante, und der abgelöste Wirbel spiralisiert zur Spitze hin aus. Im Stallzustand bei 18 mmH_2O verschwinden die Einlasswirbelrohre vollständig und werden durch chaotische, diffus verteilte großskalige Turbulenz ersetzt, während sich die Ablösezone auf der Saugseite auf rund 80 % der Schaufelhöhe und 20 % der Sehnenlänge ausdehnt. In diesem Bild taucht

nirgends eine Singularität auf – wohl aber ein Fakt: Turbulenzabschlüsse halten bei anliegender Strömung und verlieren ihre Glaubwürdigkeit bei ausgedehnter Ablösung und Stall.

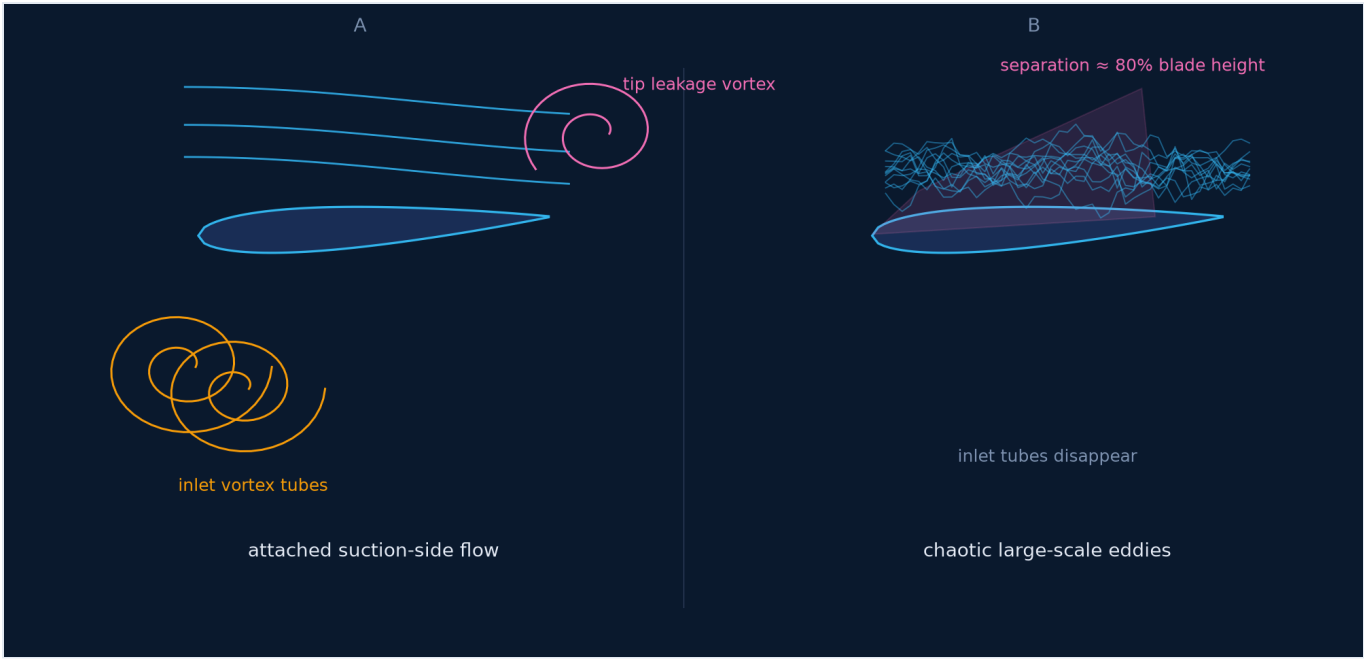


Abbildung 3 — Strömungsstruktur eines Axialventilators, Normalbetrieb gegen Stall. Links anliegende Strömung auf der Saugseite mit kohärenten Einlasswirbelrohren und klar definierten Spaltwirbeln; rechts sind die Einlassrohre verschwunden, großskalige Turbulenz dominiert und die Ablösezone breitet sich über die Schaufel aus. Das ist die nicht glatte Realität, die die technische CFD täglich behandelt, und sie markiert die Gültigkeitsgrenze des Abschlusses. Originalabbildungen: Referenz 3 (Applied Acoustics 2025, Abb. 15–18); Schema hier neu gezeichnet.

4. Die SUNXFAN-Sicht: ein genaues Modell ist eine Effizienz- und Geräuschvariable

Eine leicht unterschätzte Tatsache in der Ventilatorenindustrie: Jeder Punkt aerodynamischer Effizienz und jedes Dezibel Geräuschminderung stammt letztlich aus einer genaueren Beschreibung der Strömungsstruktur.

Ob ein EC-Radialventilator sein Hochwirkungsgradplateau bei Teillast hält, hängt davon ab, ob Sekundärströmung und Ablösewirbel im Laufrad innerhalb des vorgesehenen Bereichs bleiben. Eine CFD-Studie an einem vorwärtsgekrümmten Mehrblatt-Radialventilator fand eine große Rezirkulationszone im Krümmer am Laufradeintritt, eine ausgeprägte, an der Schaufelvorderkante ausgelöste Ablösung und eine Strahl-Nachlauf-Wechselwirkung zwischen Spiralzunge und Laufradnachlauf – eine wesentliche Quelle von Instationarität und diskretem Geräusch. Eine separate Studie zur Innenströmung von Mehrblatt-Radialventilatoren beobachtete ebenfalls Rezirkulation und große Wirbel in den Schaufelkanälen, selbst am Punkt besten Wirkungsgrads. Nichts davon ist eine mathematische Singularität, aber alles davon ist dieselbe Navier–Stokes-Gleichung, ausgedrückt im ingenieurtechnischen Maßstab.

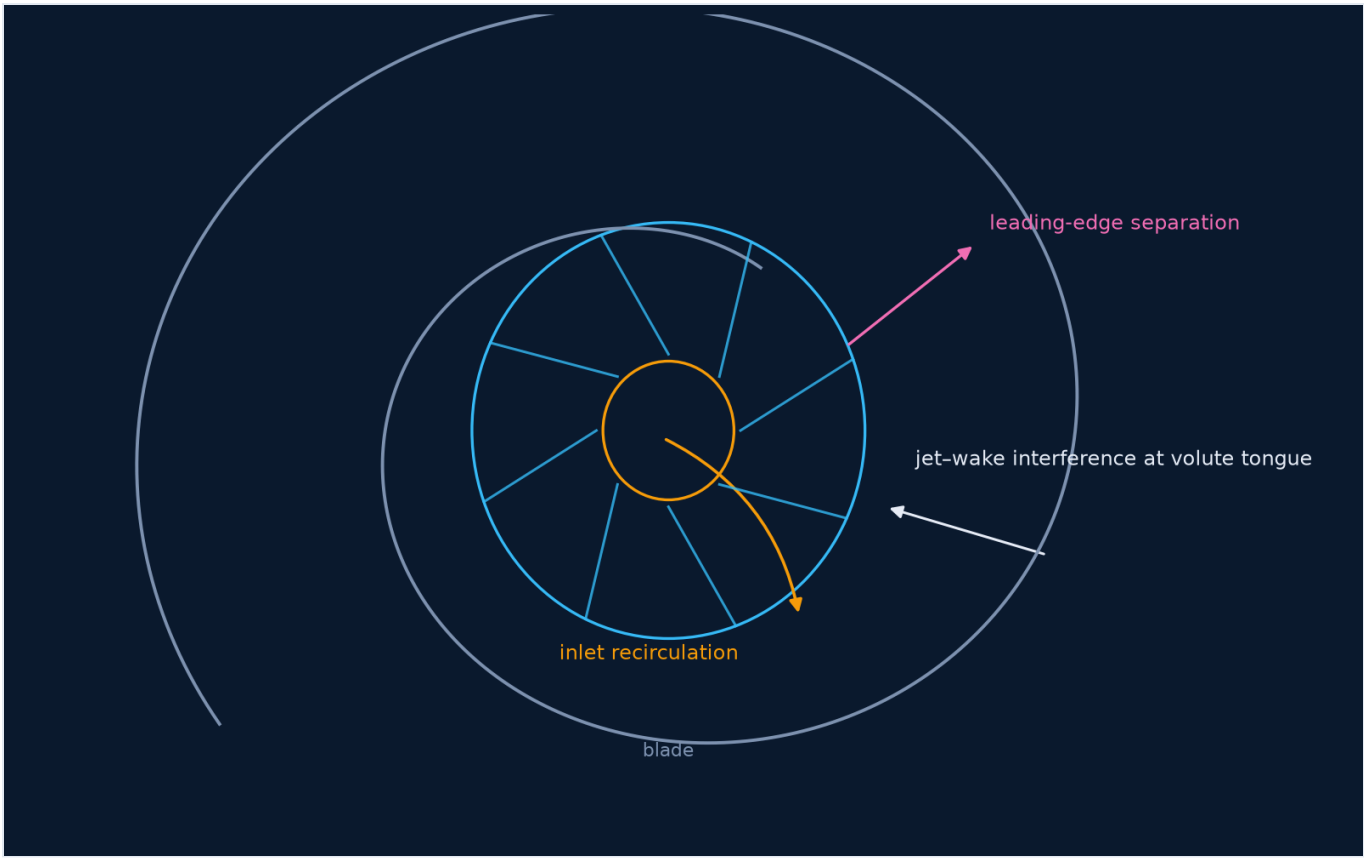


Abbildung 4 — Stromlinien und Geschwindigkeitsfeld im Inneren eines Radiallaufrads. Einlassrezirkulation, Vorderkantenablösung und Strahl-Nachlauf-Interferenz nahe der Spiralzunge sind die Kernquellen von Wirkungsgradverlust und diskretem Geräusch. Keine Singularität ist im Spiel, und dennoch ist dies die Navier–Stokes-Gleichung im ingenieurtechnischen Maßstab. Originalabbildungen: Referenz 4 (TU Darmstadt, Abb. 9/12); Schema hier neu gezeichnet.

Der praktische Wert der mathematischen Grenzlinie von 2026 liegt nicht im Blow-up-Beweis selbst. Er liegt in der Simulationskultur, die sie fördert: validitätsbewusste CFD, bei der man weiß, welche Betriebspunkte das Modell tragen kann und welche lokale Verfeinerung, einen anderen Abschluss oder eine Rückkehr zum physikalischen Versuch brauchen. Für die HVAC-, Rechenzentrums- und Energiespeicherkühlung, die Reinluftanwendungen und die 800V-HVDC-Architekturen, die SUNXFAN bedient, heißt das, klarer zu beurteilen, welche aerodynamischen Entscheidungen man der CFD überlassen kann und welche auf Messdaten gründen müssen.

5. Schluss: Die Mathematik gibt zu, dass das Fluid durchgehen kann; die Technik lernt, damit zu leben

In 2026 ist das Existenz- und Glattheitsproblem für Navier–Stokes weit von einer Lösung entfernt. OpenAIs Ergebnis ist umstritten, Caltechs Konstruktion braucht noch eine unabhängige Prüfung, und die Million des Clay Institute ist weiterhin unbeansprucht. Was sich geändert hat, ist die Voreinstellung: Globale Glattheit gilt nicht mehr als selbstverständlich, und Struktur, Bedingungen und Folgen des Blow-up sind nun ein legitimes Forschungsziel.

Für die Ingenieure hinter einem Ventilator ist das eine vertraute Haltung. Wir haben nie eine dauerhaft glatte Strömungswelt besessen. Wir besitzen Ablösung, Mischung, Instationarität und Grenzschichten, die sich gegen einen adversen Druckgradienten stemmen. Die Grenze hat sich verschoben, weil die Mathematik endlich in ihrer strengsten Sprache zugab, was der Ingenieur täglich vorfindet: Luft verhält sich nicht immer brav. Echte Ingenieursarbeit bleibt, dort einen effizienten, leisen und zuverlässigen Ventilator zu liefern, wo sie sich nicht brav verhält.

References

1. Hou, T. Y. *J. FoCM* (2026): schnelles Wachstum der maximalen Wirbelstärke und das BKM-Blow-up-Kriterium in den verallgemeinerten axisymmetrischen Navier–Stokes-Gleichungen.
2. Ruhr-Universität Bochum, Dissertation, Abbildung 2.3: Streckung von Wirbelrohren und schalenförmiger Kollaps.
3. *Applied Acoustics* (2025): LES axialer Elektronikkühlungsventilatoren bei Normalbetrieb und Stall, Abb. 15–18.
4. TU Darmstadt: CFD-Analyse eines Radialventilators, Geschwindigkeiten und Stromlinien, Abb. 9–12.
5. Zenodo, „A Structural Dismantling of OpenAI's ‘Finite-Time blowup for Navier–Stokes’“, September 2026.
6. Zenodo, „Navier–Stokes Lost in Translation“, Oktober 2026: zur Lean-Formalisierungsabweichung und zur Unterscheidung erzwungener und unerzwungener Problemstellungen.
7. Terence Tao, öffentliche Äußerungen zum Wandel des Regularitätskonsenses bei Navier–Stokes, 2026.

Über SUNXFAN®: SUNXFAN fertigt industrielle EC-, DC- und AC-Radial- und Axialventilatoren für HVAC, das thermische Management von Rechenzentren und Energiespeichern sowie Reinluftanwendungen, einschließlich Ventilatoreinheiten für 800V-HVDC-Architekturen. Wir sind überzeugt, dass anhaltende Aufmerksamkeit für die grundlegendsten Fragen der Strömungsmechanik Ventilatorsysteme langfristig effizient und zuverlässig hält.