

ÖMMES:ECHTZEIT

WIND UND WETTER

Technische Ergänzungs- und Machbarkeitsstudie

Selbstentlastende, luftdurchlässige Projektionsbahnen

Ergänzung zur künstlerisch-technischen Konzept- und Machbarkeitsstudie für die LICHTROUTEN 2027

Autor	Frank Wollenweber
Anschrift	Herzogstraße 11, 58511 Lüdenscheid
Telefon	02351.80729
E-Mail	twerc@twerc.de
Projektort	Rathausbrunnen „Ömmes“, Rathausplatz Lüdenscheid
Festival	LICHTROUTEN 2027, 11.-20.03.2027
Dokumentstand	10.08.2026
Status	Technische Voruntersuchung / Vorbemessung

Orts- und kontextspezifische interaktive Lichtinstallation

Präambel

Die hier untersuchte Konstruktion dient zunächst ÖMMES:ECHTZEIT. Ihre Weiterentwicklung kann für künftige LICHTROUTEN-Projekte von eigenständigem Interesse sein. Modulare, luftdurchlässige und selbstentlastende Projektionsflächen können Projektionen von vorhandenen Fassaden und Baukörpern entkoppeln. Künstlerinnen und Künstler könnten damit temporäre Projektionsflächen frei im Stadtraum definieren, auch an Orten ohne geeignete Hausfassaden. Voraussetzung sind jeweils eine standortbezogene Bemessung, Materialprüfung und betriebliche Freigabe.

Kurzfassung

Die ursprüngliche Machbarkeitsstudie beschreibt acht weiße Projektionsflächen über dem Brunnen: vier längere und vier kürzere Bereiche, deren Oberkanten an Drahtseilen eines temporären zentralen Seiltragpunkts geführt werden. Die Blender-Geometrie arbeitet für die langen und kurzen Richtungen mit äußeren Bezugspunkten von etwa 6,915 m beziehungsweise 2,410 m. [P1] Für die reale Ausführung wird diese Fläche konstruktiv weiterentwickelt. Die Projektionswirkung soll optisch zusammenhängend bleiben, windtechnisch jedoch nicht als eine große, starre Membran wirken. Vorgeschlagen wird deshalb eine Lamellenstruktur aus schmalen Einzelbahnen. Diese können sich bei einer Böe unabhängig voneinander verformen und nach oben aus dem Wind legen. Die Untersuchung verbindet klimatologische Orientierung, normative Randbedingungen, theoretische Vergleichsrechnungen und ein konstruktives Konzept für kleine, unabhängig bewegliche Projektionsbahnen. Der Ansatz kombiniert aerodynamische Entlastung mit einem definierten Last- und Sicherungsweg. Die Tragstruktur wird unabhängig davon für konservative Lastfälle nachgewiesen; Entlastungen aus Porosität oder Auslenkung werden erst nach Materialnachweis oder 1:1-Versuch angesetzt.

Schlüsselwörter: Windlast, Projektionsbahn, luftdurchlässiges Gewebe, passive Windentlastung, elastische Rückstellung, Regen, Frost, 1:1-Prüfung, LICHTROUTEN 2027.

Dokumentationsstand und Abgrenzung

Dieses Papier ist eine nachvollziehbare technische Voruntersuchung. Es ersetzt keine prüffähige Statik, keine Ausführungsplanung und keine Freigabe durch Veranstalter, Tragwerksplanung oder zuständige Stelle. Reduktionen aus Porosität und passiver Auslenkung werden deshalb im Sicherheitsnachweis erst dann angesetzt, wenn Materialdaten oder Versuche sie belegen.

Inhaltsverzeichnis

Präambel.....	2
Kurzfassung.....	2
1 Projektgegenstand, Ziel und Abgrenzung.....	5
1.1 Ausgangslage.....	5
1.2 Konstruktive Zielsetzung.....	5
1.3 Sicherheitsebenen.....	5
1.4 Status der Untersuchung.....	5
2 Wetterlicher Rahmen der LICHTROUTEN 2027.....	5
2.1 Lokale Datenbasis.....	6
2.2 Niederschlag im März.....	6
2.3 Wind im März.....	6
3 Bemessungsrahmen Wind.....	7
3.1 Normativer Rahmen.....	7
3.2 Screening-Gleichung für die Konzeptphase.....	7
3.3 Referenzsegment.....	7
4 Konstruktionsprinzip der selbstentlastenden Bahn.....	8
4.1 Lastpfad im Normalzustand.....	9
4.2 Oberer Tragpunkt und untere Gewichtsleiste.....	9
4.3 Vereinfachtes Gleichgewichtsmodell.....	9
5 Luftdurchlässigkeit, Flattern und Materialwahl.....	10
5.1 Porosität ist kein einfacher Prozentabzug.....	10
5.2 Flattern als eigener Lastfall.....	11
5.3 Vorläufiger Materialkorridor.....	11
6 Regen, Nässe und Frost.....	11
7 Vorgeschlagenes 1:1-Prüfprogramm.....	12
8 Betriebskonzept bei Wind und Wetter.....	12
9 Bewertung und nächste Planungsschritte.....	13
Quellen und Arbeitsgrundlagen.....	14
Anhang A Rechenannahmen und Modellgrenzen.....	15

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildungen

Abbildung 1 Screening-Last einer Referenzbahn 0,90 x 2,70 m.....	8
Abbildung 2 Funktionsprinzip der selbstentlastenden Projektionsbahn.....	9
Abbildung 3 Illustratives Gleichgewichtsmodell der weichen Lagerung.....	10

Tabellen

Tabelle 1 Parameter des Referenzsegments.....	8
Tabelle 2 Theoretische Windkraft auf eine Referenzbahn.....	8
Tabelle 3 Theoretischer Gleichgewichtswinkel im illustrativen Modell.....	10
Tabelle 4 Vorläufiger Materialkorridor.....	11
Tabelle 5 Vorgeschlagenes 1:1-Prüfprogramm.....	12
Tabelle 6 Vorläufiges Betriebskonzept bei Wind und Wetter.....	13
Tabelle A1 Offene Realisierungsparameter.....	15

1 Projektgegenstand, Ziel und Abgrenzung

1.1 Ausgangslage

Die ursprüngliche Machbarkeitsstudie beschreibt acht weiße Projektionsflächen über dem Brunnen: vier längere und vier kürzere Bereiche, deren Oberkanten an Drahtseilen eines temporären zentralen Seiltragpunkts geführt werden. Die Blender-Geometrie arbeitet für die langen und kurzen Richtungen mit äußeren Bezugspunkten von etwa 6,915 m beziehungsweise 2,410 m. [P1]

1.2 Konstruktive Zielsetzung

Für die reale Ausführung wird diese Fläche konstruktiv weiterentwickelt. Die Projektionswirkung soll optisch zusammenhängend bleiben, windtechnisch jedoch nicht als eine große, starre Membran wirken. Vorgeschlagen wird deshalb eine Lamellenstruktur aus schmalen Einzelbahnen. Diese können sich bei einer Böe unabhängig voneinander verformen und nach oben aus dem Wind legen.

Die Projektionsflächen werden nicht als starre, geschlossene Segel ausgebildet. Vorgesehen sind kleine, voneinander unabhängige und luftdurchlässige Textilbahnen. Jede Bahn ist an der oberen Leiste zentral gelagert; eine beschwerte untere Leiste spannt das Textil im Ruhezustand durch Eigengewicht. Weiche elastische Rückstellelemente stabilisieren die Projektionsstellung. Bei Wind darf die untere Leiste nach hinten und oben ausweichen. In starker Auslenkung kann sich die Bahn weitgehend parallel zur Brunnenoberfläche legen und damit ihre frontal wirksame Windfläche reduzieren.

1.3 Sicherheitsebenen

- Porosität: Ein Teil der Strömung kann durch das Textil hindurchtreten. Die tatsächliche Windlastreduktion wird nicht pauschal aus dem Lochanteil abgeleitet, sondern erst nach Materialnachweis oder Test angesetzt.
- Geometrische Selbstentlastung: Unter Winddruck darf die untere Leiste nach hinten und oben steigen. Mit zunehmender Auslenkung wird die Bahn für den Wind aerodynamisch weniger frontal.
- Weiche Rückholung und Fangsicherung: Elastische Elemente halten die Projektionsstellung und holen die Bahn zurück. Nichtelastische Sicherungen begrenzen den Weg und verhindern ein verlorenes oder überschlagendes Segment.

Der Ansatz kombiniert aerodynamische Entlastung mit einem definierten Last- und Sicherungsweg. Die Tragstruktur wird unabhängig davon für konservative Lastfälle nachgewiesen; Entlastungen aus Porosität oder Auslenkung werden erst nach Materialnachweis oder 1:1-Versuch angesetzt.

Kernaussage: *Niederschlag und Frost sind im März als mögliche Betriebszustände zu berücksichtigen. Für Wind sind nicht Monatsmittel, sondern Böen und normative Windwirkungen maßgebend. Das Leinwandssystem wird deshalb modular, luftdurchlässig, kontrolliert nachgiebig und mit separaten Fang- und Sicherungselementen ausgeführt.*

1.4 Status der Untersuchung

Dieses Papier ist eine nachvollziehbare technische Voruntersuchung. Es ersetzt keine prüffähige Statik, keine Ausführungsplanung und keine Freigabe durch Veranstalter, Tragwerksplanung oder zuständige Stelle. Reduktionen aus Porosität und passiver Auslenkung werden deshalb im Sicherheitsnachweis erst dann angesetzt, wenn Materialdaten oder Versuche sie belegen.

2 Wetterlicher Rahmen der LICHTROUTEN 2027

Die LICHTROUTEN 2027 finden offiziell vom 11. bis 20. März 2027 jeweils von 19:00 bis 24:00 Uhr statt. [1] Der Aufbau liegt damit noch in der windreicheren Hälfte des Jahres. Für den Entwurf sind klimatologische Orientierung, normative Windbemessung und die konkrete Vorhersage kurz vor sowie während des Festivals getrennt zu betrachten.

2.1 Lokale Datenbasis

Für die lokale Einordnung werden DWD-Daten aus Lüdenscheid herangezogen. Der DWD unterscheidet die historische Station 03096 „Lüdenscheid (Zeppelin-Gymnasium)“ auf 444 m Höhe von der Station 03098 „Lüdenscheid“ auf rund 387 m Höhe. [2] Die in Abschnitt 2.3 verwendete DWD-Windauswertung bezieht sich auf die Station Lüdenscheid und den Zeitraum 1994-2018. [7] Die Stadt Lüdenscheid nennt auf DWD/LANUV-Basis für den Jahresniederschlag 724 mm im trockenen Jahr 1959 und 1.755 mm im nassen Jahr 2023. [3] Einzeljahre können daher deutlich vom langjährigen Mittel abweichen.

2.2 Niederschlag im März

WetterKontor weist für Lüdenscheid Daten mit Quelle Deutscher Wetterdienst aus. Für März 2026 wurden 74,5 l/m² gemessen; dies entsprach in der Tabelle für die Referenzperiode 1991-2020 rund 81 % des langjährigen Mittels. Daraus ergibt sich rechnerisch ein März-Normalwert von ungefähr 92 l/m². Wegen der gerundeten Prozentangabe ist dieser Wert nur als Näherung zu lesen. [4]

Eine zweite statistische Orientierung liefert WeatherSpark. Dort werden für März im Mittel 8,7 Tage mit mindestens 1 mm Niederschlag ausgewiesen. Die zugrunde liegende Klimatologie ist eine modellgestützte historische Rekonstruktion und bildet lokale Mikroklimata nur begrenzt ab. Sie wird hier ausschließlich für eine überschlägige Häufigkeitsbetrachtung verwendet. [5]

Statistische Einordnung: *Als überschlägige Häufigkeitsrechnung entsprechen 8,7 nasse Tage in 31 Märztagen etwa 28,1 % pro Kalendertag. Für zehn Märztag ergibt sich ein Erwartungswert von rund 2,8 nassen Tagen. Nur unter der stark vereinfachenden Annahme voneinander unabhängiger Tage liegt die rechnerische Wahrscheinlichkeit für mindestens einen nassen Kalendertag bei rund 96,3 %. Das ist keine Festivalprognose. Niederschlagsereignisse treten zeitlich gebündelt auf, und ein nasser Kalendertag bedeutet nicht, dass es zwischen 19:00 und 24:00 Uhr regnet. Für die Konstruktion folgt daraus lediglich, dass wiederholte Nässe als normaler möglicher Betriebszustand berücksichtigt werden muss.*

2.3 Wind im März

Für die Windbetrachtung liegt eine stationsbasierte DWD-Auswertung vor. Für die Station Lüdenscheid weist der DWD im Bezugszeitraum 1994-2018 für März eine mittlere Windgeschwindigkeit von 3,4 m/s (12,2 km/h) aus. Im selben Zeitraum wurde für März eine maximale Böengeschwindigkeit von 31,3 m/s (112,7 km/h) registriert. Im Mittel traten im März 3,0 Tage mit Böen von mindestens 8 Bft ($\geq 17,2$ m/s bzw. rund 61,9 km/h) auf. Die langjährige Windrichtungsverteilung der Station ist überwiegend westsüdwestlich bis westlich geprägt. [7]

Die mittlere Windgeschwindigkeit beschreibt nicht das sicherheitsrelevante Ereignis. Für die Auslegung sind Böen und normative Windwirkungen maßgebend. Der DWD ordnet Sturmböen mit 65-89 km/h ein; schwere Sturmböen beginnen bei 90 km/h. [6] Die DWD-Auswertung dokumentiert für Lüdenscheid im Zeitraum 1994-2018 als höchste Böe 34,8 m/s (rund 125 km/h) am 18.01.2007 während Orkan Kyrill. [7]

Statistische Einordnung: *Im DWD-Bezugszeitraum 1994-2018 traten im März im Mittel 3,0 Tage mit Böen von mindestens 8 Bft auf. Auf einen zufällig gelegenen zehntägigen Märzabschnitt entfallen damit rechnerisch rund 1,0 solcher Tage. Nur unter der vereinfachenden Annahme voneinander unabhängiger Tage ergibt sich für mindestens einen solchen Tag eine Wahrscheinlichkeit von rund 64 %. Diese Zahl ist keine Festivalprognose: Starkwindtage können zeitlich gebündelt auftreten, und die DWD-Tageskennzahl sagt nichts darüber aus, ob die Böe während der Veranstaltungszeit von 19:00 bis 24:00 Uhr auftritt. Für die Tragwerksplanung bleibt die normative Bemessung, für den Betrieb die konkrete DWD-Prognose maßgebend.*

3 Bemessungsrahmen Wind

3.1 Normativer Rahmen

Die Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen Nordrhein-Westfalen verweist für Wind auf DIN EN 1991-1-4 in Verbindung mit dem Nationalen Anhang. In der landesweiten Zuordnung ist der gesamte Märkische Kreis der Windlastzone 1 zugeordnet. [8] Das Deutsche Institut für Bautechnik führt die bundesweite Zuordnung der Windzonen nach Verwaltungsgrenzen als Bemessungsgrundlage nach den Eurocodes. [9]

Der Eurocode-Ansatz unterscheidet klar zwischen Wetterstatistik und Tragwerksbemessung. Die Grundwindgeschwindigkeit ist eine charakteristische 10-Minuten-Mittelgeschwindigkeit unter standardisierten Expositionsbedingungen mit einer jährlichen Überschreitungswahrscheinlichkeit von 0,02, entsprechend ungefähr 50 Jahren Wiederkehrzeit. Die tatsächliche Spitzenwinddruckberechnung berücksichtigt zusätzlich Höhe, Geländerauigkeit, Orographie und Turbulenz. [10][11]

Planerische Konsequenz: Ein „typischer Märzwind“ darf niemals an die Stelle der normativen Windbemessung treten. Die Klimadaten sind für Betriebsplanung und Plausibilität hilfreich. Die Tragstruktur wird konservativ nach dem einschlägigen Regelwerk und der realen Ortsgeometrie bemessen.

3.2 Screening-Gleichung für die Konzeptphase

Um die Wirkung der Segmentierung bereits vor Auswahl eines konkreten Gewebes zu quantifizieren, wird ein bewusst einfaches physikalisches Screening-Modell verwendet. Es ist keine Ersatzrechnung für DIN EN 1991-1-4.

$$q(v) = 1/2 \cdot \rho \cdot v^2 \quad (1)$$

$$F_o = q(v) \cdot c_f \cdot A \cdot \eta_p \quad (2)$$

mit $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$, $c_f = 1,50$ als konservativem Screening-Beiwert und A als Segmentfläche.

Der Faktor η_p beschreibt hier nur eine mögliche aerodynamische Entlastung durch Luftdurchlässigkeit. Für den konservativen Fall gilt $\eta_p = 1,0$. Werte kleiner 1,0 dienen ausschließlich als Sensitivitätsrechnung, solange keine belastbaren Herstellerdaten oder Windversuche vorliegen. Neuere Experimente an porösen Sieben zeigen, dass der Widerstandsbeiwert nicht nur von der Porosität, sondern auch von Geometrie, Faserabmessung, Reynoldszahl und Anstellwinkel abhängt. [12]

3.3 Referenzsegment

Für die theoretische Voruntersuchung wird eine einzelne Bahn von 0,90 m Breite und 2,70 m Höhe angesetzt. Diese Abmessung ist ein Rechenmodell, kein festgelegtes Ausführungsmaß. Die reale Unterteilung wird nach optischem und mechanischem 1:1-Test festgelegt.

Parameter	Ansatz	Bedeutung
Breite b	0,90 m	typische schmale Einzelbahn
Höhe h	2,70 m	Arbeitsannahme für die Projektionshöhe
Fläche A	2,43 m ²	b * h
Luftdichte rho	1,25 kg/m ³	Eurocode-Empfehlungswert für Windberechnungen [11]
Screening-Beiwert c _f	1,50	bewusst vorsichtiger Vergleichswert, nicht objektspezifischer Normbeiwert
Porositätsfaktor eta _p	1,00 / 0,70 / 0,50	1,00 konservativ; kleinere Werte nur Sensitivität

Tabelle 1: Parameter des Referenzsegments.

Böe [km/h]	v [m/s]	q [Pa]	p* [kN/m ²]	F eta=1 [kN]	F eta=.7	F eta=.5
20	5.56	19	0.029	0.070	0.049	0.035
30	8.33	43	0.065	0.158	0.111	0.079
40	11.11	77	0.116	0.281	0.197	0.141
50	13.89	121	0.181	0.439	0.308	0.220
65	18.06	204	0.306	0.743	0.520	0.371
90	25.00	391	0.586	1.424	0.997	0.712

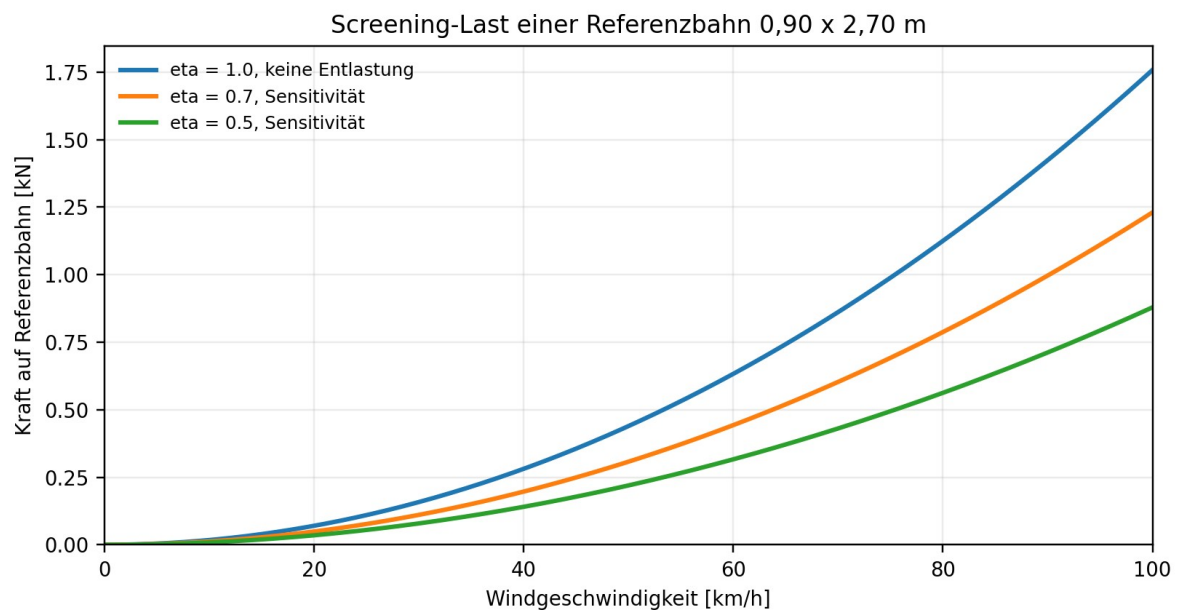
Tabelle 2: Theoretische Windkraft auf eine Referenzbahn. $p = q \cdot 1,50$. Die eta-Werte 0,70 und 0,50 sind keine anerkannten Materialwerte, sondern reine Sensitivitätsfälle.


Abbildung 1: Quadratischer Anstieg der Screening-Last mit der Windgeschwindigkeit. Die Luftdurchlässigkeit kann die Last mindern; ihre Größe muss nachgewiesen werden.

4 Konstruktionsprinzip der selbstentlastenden Bahn

Jede Einzelbahn besteht aus einem luftdurchlässigen Projektionsgewebe sowie einer oberen und einer beschwerten unteren Holzleiste. Die obere Leiste ist an einem zentralen Punkt am Tragbeziehungsweise Drahtseil gelagert. Die untere Leiste spannt das Textil im Ruhezustand ausschließlich durch Eigengewicht; seitliche starre Rahmenteile entfallen. Elastische Rückstellelemente stabilisieren die Projektionsstellung, übernehmen jedoch nicht die primäre Tragfunktion.

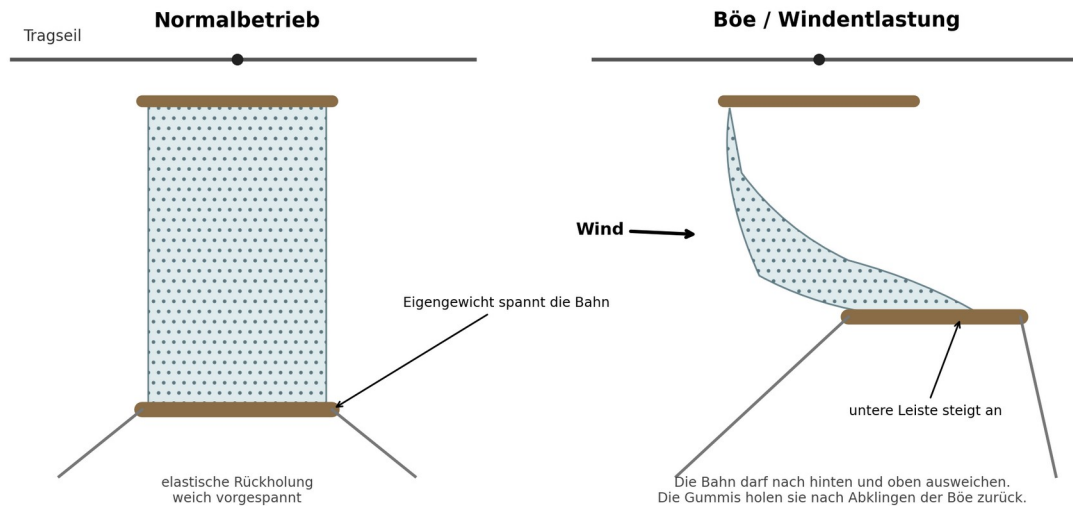


Abbildung 2: Funktionsprinzip der selbstentlastenden Projektionsbahn. Die Zeichnung ist schematisch; Lage und Geometrie der Rückholpunkte werden erst nach dem 1:1-Versuch festgelegt.

4.1 Lastpfad im Normalzustand

- Eigengewicht von Textil und Leisten: über den oberen Punkt in das Tragseil.
- Kleine Windlasten: Die Membran wölbt sich; die untere Leiste darf geringfügig nach hinten und oben ausweichen. Eigengewicht und elastische Rückstellung führen das Segment in die Projektionsstellung zurück.
- Größere Böen: Die untere Leiste darf nach hinten und oben steigen. Dadurch nimmt der Anstellwinkel der Bahn zur Strömung ab.
- Extremstellung: Die Bahn kann sich weitgehend parallel zur Brunnenoberfläche beziehungsweise in Strömungsrichtung legen. Ein nichtelastischer Fangweg verhindert Überschlag, Wickeln um das Tragseil oder Kollision mit Nachbarsegmenten.

4.2 Oberer Tragpunkt und untere Gewichtsleiste

Die elastischen Elemente tragen das Eigengewicht des Segments nicht. Ihre Funktion ist Rückstellung, Beruhigung und Begrenzung der Bewegung. Die beschwerte untere Leiste stellt die Grundspannung des Textils her und liefert bei Auslenkung ein rückstellendes Gewichtsmoment. Bei Ausfall eines elastischen Elements bleibt das Segment am oberen Tragpunkt und an einer separaten Fangsicherung gehalten.

4.3 Vereinfachtes Gleichgewichtsmodell

Für die Konzeptphase wird die flexible Bahn als äquivalente, oben gelagerte Fläche betrachtet. θ bezeichnet den Öffnungswinkel aus der Vertikalen. Für die Sensitivitätsrechnung wird angenommen, dass die normal wirksame Windlast mit $\cos^2(\theta)$ abnimmt. Diese Beziehung ist weder ein Normbeiwert noch eine aeroelastische Simulation. Sie dient ausschließlich dazu, den möglichen geometrischen Selbstentlastungseffekt und die erforderlichen Größenordnungen für den 1:1-Versuch abzuschätzen.

$$M_W(\theta) = F_o \cdot (h/2) \cdot \cos^2(\theta) \quad (3)$$

$$M_G(\theta) = m_b \cdot g \cdot h \cdot \sin(\theta) \quad (4)$$

$$M_E(\theta) \approx k_\theta \cdot \theta \quad (5)$$

$$M_W(\theta) = M_G(\theta) + M_E(\theta) \quad (6)$$

Illustrativer Parameteransatz: äquivalente Masse der unteren Leiste einschließlich Beschlägen und gegebenenfalls Ballast $m_b = 2,0$ kg; linearisierte Rückstellsteifigkeit des gesamten elastischen Systems $k_\theta = 200$ Nm/rad. Die reale Kraft-Dehnungs-Kennlinie der Rückstellelemente ist nicht linear und wird am Prototyp gemessen.

Wind [km/h]	eta=1,00	eta=0,70	eta=0,50
20	19.2°	14.2°	10.4°
30	33.8°	27.1°	21.1°
40	44.6°	38.0°	31.6°
50	52.1°	46.2°	40.0°
65	59.8°	54.7°	49.4°
90	67.4°	63.4°	59.2°

Tabelle 3: Theoretischer Gleichgewichtswinkel im illustrativen Modell. Die Tabelle ist eine Entwurfsrechnung und kein zugesicherter Bewegungsverlauf. Sie zeigt, wie Gewicht, elastische Rückstellung, Porosität und Windgeschwindigkeit zusammenwirken können.

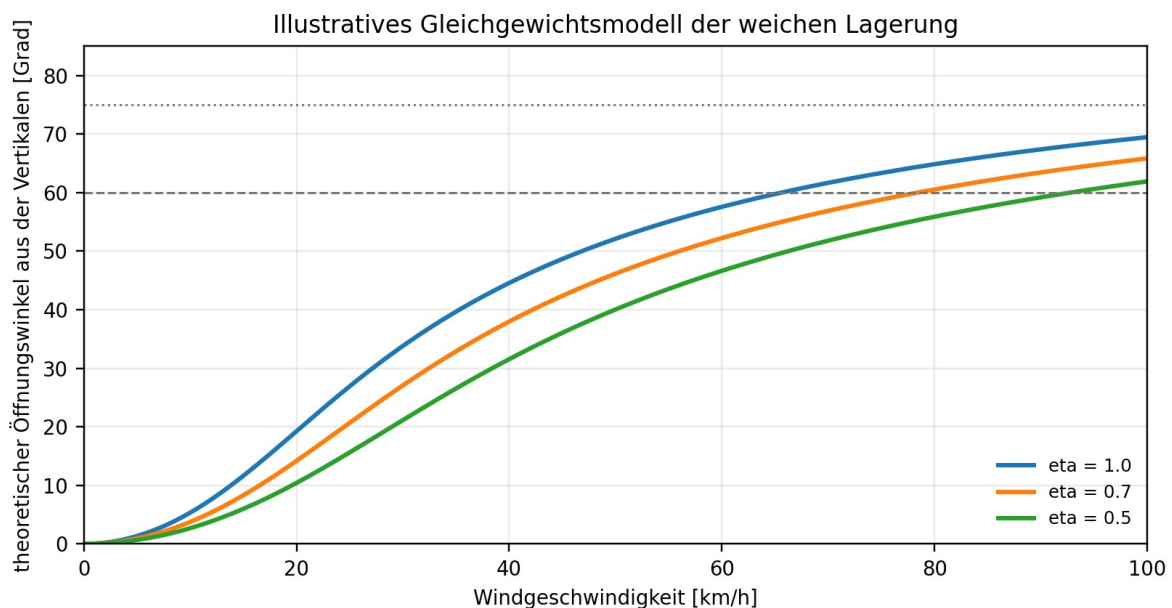


Abbildung 3: Illustratives Gleichgewichtsmodell der weichen Lagerung. Bei höherer Windgeschwindigkeit steigt der theoretische Öffnungswinkel; die Bahn kann dadurch zunehmend aus dem Wind gehen.

Beispielhafte Entlastung durch Lage: Im Ersatzmodell verbleiben bei 60° Auslenkung nur $\cos^2(60^\circ) = 25\%$ der normal angesetzten Last, bei 70° rund 12 %. Diese Werte dürfen nicht als statisch gesicherte Reduktion verwendet werden. Flexible Membranen können flattern und dynamische Spitzen erzeugen. Der Entlastungseffekt muss deshalb am realen Segment getestet werden.

5 Luftdurchlässigkeit, Flattern und Materialwahl

Das Projektionsmaterial soll weiß und für die Gobo-Wirkung ausreichend homogen erscheinen, gleichzeitig aber definierte Luftdurchlässigkeit besitzen. Die Blender-Simulation verwendete weitgehend opake Flächen, um Durchprojektion und Doppelbilder zu vermeiden. Für die Ausführung ist die luftdurchlässige Bahn deshalb eine technische Weiterentwicklung, die optisch gegen die bisherige Simulation geprüft werden muss. [P1]

5.1 Porosität ist kein einfacher Prozentabzug

Die Forschung an porösen Screens zeigt, dass derselbe offene Flächenanteil nicht automatisch denselben Widerstandsbeiwert liefert. Faser- beziehungsweise Lochgeometrie, lokale Reynoldszahl, Anstellwinkel und dreidimensionale Umströmung beeinflussen die Kraft. [12] Für das Projekt folgt daraus eine klare Regel: Eine angegebene „30 % offene Fläche“ darf nicht ungeprüft als „30 % weniger Windlast“ angesetzt werden.

5.2 Flattern als eigener Lastfall

Die gewollte Nachgiebigkeit hat eine Kehrseite. Flexible Platten und Membranen können ab bestimmten Strömungszuständen selbstangeregte Flatterbewegungen entwickeln; Experimente zeigen zudem Hysterese und starke nichtlineare Effekte. [13] Die fast horizontale Stellung eines Segments ist deshalb nicht automatisch lastfrei. Sie ist vielmehr ein Zustand mit kleinerer mittlerer Frontallast, aber möglichen dynamischen Schlägen.

Daraus werden für den Entwurf folgende Anforderungen abgeleitet:

- keine harte Endbegrenzung unmittelbar im normalen Arbeitsbereich;
- weicher elastischer Weg und separate, etwas längere Fangsicherung;
- ausreichender Abstand zwischen Nachbarbahnen und zu Brunnenrand, Wasser und Technik;
- keine scharfen Kanten an Holzleisten oder Beschlägen;
- 1:1-Versuch mit Videoanalyse und Kraftmessung vor Festlegung der endgültigen Rückstellsteifigkeit.

5.3 Vorläufiger Materialkorridor

Eigenschaft	Ziel für die Auswahl	Nachweis
Projektionsseite	weiß, matt, geringe Hotspots	optischer Gobo-Test bei realer Distanz
Luftdurchlässigkeit	definiert und reproduzierbar	Herstellerkennwert / Druckverlustkurve / Test
Wasseraufnahme	möglichst gering, schnell trocknend	Datenblatt + Nassversuch
Formstabilität	kein dauerhaftes Längen nach Nasswerden	Nass-Trocken-Zyklus
Brandverhalten	nach Veranstalter-/Ortsanforderung	geeigneter Materialnachweis
UV/Witterung	mindestens für Festivaldauer sicher	Datenblatt / Musterprüfung
Befestigungsrand	lokal verstärkt, ausreissfest	Zugversuch am realen Saum

Tabelle 4: Vorläufiger Materialkorridor für die Auswahl des Projektionsgewebes und der Randkonstruktion.

6 Regen, Nässe und Frost

Für eine vertikal hängende, luftdurchlässige Bahn ist Regen keine Flächenlast wie bei einem Dach. Wasser soll durch das Gewebe treten oder unmittelbar ablaufen; Taschen und geschlossene Hohlräume sind konstruktiv zu vermeiden. Zu prüfen sind insbesondere Wasseraufnahme des Gewebes, Massenzunahme der Holzleisten, geänderte Reibung in Lagern sowie die Kombination aus Nässe und Wind.

Bei starker Auslenkung kann eine Bahn zeitweise nahezu parallel zur Brunnenoberfläche liegen. In diesem Zustand muss Niederschlag ebenfalls frei ablaufen können. Luftdurchlässigkeit und eine entwässerungsfähige Ausbildung der Säume und Leisten verhindern, dass sich Wasser auf dem Segment sammelt.

Frost ist im März grundsätzlich möglich. Für den Betrieb wird deshalb kein automatischer „Winterausschluss“ angenommen. Nach nasser und kalter Witterung ist vor der Freigabe zu prüfen, ob Gewebe, Lager, Rückstellelemente oder Fangsystem vereist beziehungsweise in ihrer Beweglichkeit eingeschränkt sind.

Planerische Folgerung aus der Regenstatistik: Bei einem statistischen Erwartungswert von grob zwei bis drei nassen Tagen während einer zehntägigen Festivalphase darf „Trockenbetrieb“ nicht die Auslegungsannahme sein. Material, Säume, Holzschutz und Lagerung werden für wiederholte Nass-Trocken-Zyklen ausgelegt.

7 Vorgeschlagenes 1:1-Prüfprogramm

Die theoretische Rechnung ist bewusst so angelegt, dass sie mit einem einfachen realen Prototyp kalibriert werden kann. Ein einziges 0,90 x 2,70 m Segment reicht, um die wichtigsten offenen Parameter vor Bestellung der Gesamtfläche zu bestimmen.

Schritt	Versuch	Ziel / Messgröße
1	Optischer Gobo-Test trocken	Helligkeit, Kontrast, Durchprojektion, Streulicht, sichtbare Mesh-Struktur
2	Statischer Zugtest Rückholung	Kraft-Dehnungs-Kurve beider Gummis, Nullvorspannung, Endweg
3	Manueller Auslenktest	Winkel, Rückkehrverhalten, Kollisionsfreiheit, Fangweg
4	Wind-/Gebläsetest trocken	Öffnungswinkel gegen Windgeschwindigkeit, Spitzenkraft am Aufhängepunkt
5	Nassversuch	Massenzunahme, Ablaufen, Rückkehr, optische Veränderung
6	Windtest nass	Flattern und Spitzenkräfte im ungünstigen Kombinationszustand
7	Fehlerfall	ein Gummi gelöst/gerissen, Fangsicherung aktiv, Segment darf nicht verloren gehen
8	Dauerversuch	mehrere hundert Auslenkzyklen ohne Saum-, Lager- oder Gummischaden

Tabelle 5: Vorgeschlagenes 1:1-Prüfprogramm für ein Referenzsegment.

Messmittel können bewusst einfach bleiben: Kraftmessdose beziehungsweise Zugkraftmesser am oberen Punkt, Winkelmessung aus Video, definierter Ventilator-/Gebläseabstand und Dokumentation der realen Windgeschwindigkeit mit Anemometer. Für eine spätere prüffähige Statik können diese Versuchswerte als Projektgrundlage bereitgestellt werden.

8 Betriebskonzept bei Wind und Wetter

Das passive Ausweichen ersetzt kein Wettermanagement. Für eine Publikumsinstallation im Stadtraum wird zusätzlich ein einfaches betriebliches Schema empfohlen. Die Grenzwerte sind in dieser Phase bewusst vorläufig; sie werden nach Prototypversuch und statischer Prüfung festgelegt.

Situation	Vorläufige Reaktion
Normalwetter / leichte Böen	Betrieb; Sichtkontrolle der Segmente und Rückholungen vor Öffnung
zunehmender Wind	häufigere Sichtkontrolle; Verhalten der Bahnen beobachten; keine manuelle Nachspannung
DWD-Windwarnung / Böen >50 km/h [6]	vorläufige Aufmerksamkeits- und Entscheidungsschwelle: Betrieb prüfen; gegebenenfalls Projektion aussetzen und Segmente in die festgelegte Park- oder Sicherungsstellung bringen
Sturmböen 65-89 km/h [6]	kein regulärer Projektionsbetrieb; Segmente nach festgelegtem Sturmplan sichern oder entfernen
Gewitter / extreme Böen / unklarer Zustand	Installation außer Betrieb, Gefahrenbereich sichern, Freigabe erst nach Kontrolle
Regen ohne kritischen Wind	grundsätzlich möglicher Betrieb, sofern Material/Elektrik freigegeben; Zustand des Gewebes beobachten

Situation	Vorläufige Reaktion
Eis / festgefrorene Bahn	kein Betrieb bis Beweglichkeit und Fangsicherung wieder voll gegeben sind

Tabelle 6: Vorläufiges Betriebskonzept bei Wind und Wetter. Die Grenzwerte sind vorläufig und werden nach Prototypversuch und statischer Prüfung festgelegt.

Die Schwelle von 50 km/h wird in diesem Papier nicht als Tragfähigkeitsgrenze verwendet, sondern als konservative betriebliche Aufmerksamkeits- und Entscheidungsschwelle in Anlehnung an die DWD-Warnkriterien. Die endgültigen Betriebsgrenzen werden erst nach Prototypversuch, realer Geometrie und statischer Prüfung festgelegt.

9 Bewertung und nächste Planungsschritte

Die vorgeschlagene Leinwandkonstruktion adressiert Projektionswirkung, Windentlastung und Regenverträglichkeit in einem modularen System. Viele kleine, unabhängig bewegliche Bahnen ersetzen eine großflächige starre Membran. Die Konstruktion lässt definierte Verformung zu; die verbleibenden Kräfte werden über Tragpunkt, Trageil und Sicherungssystem abgeführt.

Für die Jury kann der Ansatz als technisch begründete Machbarkeitsstrategie dargestellt werden. Für eine Ausführung bleiben folgende Parameter durch Materialauswahl, 1:1-Versuch und Tragwerksplanung festzulegen:

- endgültige Bahnbreite und Zwischenraum;
- konkretes Projektionsmesh und dessen Druckverlust-/Widerstandskennwerte;
- Maße und Querschnitt der unteren Holzleiste;
- Geometrie und Kraft-Dehnungs-Kennlinie der Rückholgummis;
- maximal erlaubter Öffnungswinkel und Fangweg;
- Kräfte an oberem Punkt, Trageil, Mast und äußeren Anschlagpunkten;
- betriebliche Windgrenzen nach 1:1-Test und statischer Prüfung.

Technisches Fazit: Das Leinwandssystem wird als nachgiebige, modular gesicherte Konstruktion weiterentwickelt. Luftdurchlässigkeit, kontrollierte Auslenkung, elastische Rückstellung und ein separater Fangweg können Windwirkungen reduzieren oder begrenzen. Aerodynamische Entlastungen werden erst nach Materialdaten und 1:1-Versuch angesetzt. Die Tragstruktur wird unabhängig davon konservativ bemessen. Damit ist der Ansatz für eine temporäre Projektionsinstallation technisch prüfbar und schrittweise bis zur Ausführungsreife weiterentwickelbar.

Quellen und Arbeitsgrundlagen

- [P1] ÖMMES:ECHTZEIT - Künstlerisch-technische Konzept- und Machbarkeitsstudie für die LICHTROUTEN 2027, Frank Wollenweber, Dokumentstand 09.08.2026. Projektinterne Grundlage.
- [1] LICHTROUTEN Lüdenschied, offizielle Festivalwebsite. Termin 11.-20.03.2027, 19:00-24:00 Uhr. <https://lichtrouten.de/>
- [2] Deutscher Wetterdienst, Climate Data Center / Stationsmetadaten: Station 03096 Lüdenschied (Zeppelin-Gymnasium), 444 m; Station 03098 Lüdenschied, rund 387 m.
https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/help/Sonnenscheindauer_1961-1990_Stationsliste_aktStandort.txt
https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/climate/daily/kl/historical/KL_Tageswerte_Beschreibung_Stationen.txt
- [3] Stadt Lüdenschied, Klima-/Wetterdaten; Quelle dort: Deutscher Wetterdienst, bearbeitet durch LANUV NRW.
<https://www.luedenschied.de/stadtentwicklung-und-wirtschaft/umwelt-klimaschutz/klimaschutz-und-nachhaltigkeit/klima-/wetterdaten>
- [4] WetterKontor, Monats- und Jahreswerte für Lüdenschied; Datenquelle laut Seite: Deutscher Wetterdienst. Abruf 10.08.2026. <https://www.wetterkontor.de/de/wetter/deutschland/monatswerte-station.asp?id=10418>
- [5] WeatherSpark, Klimatologie Lüdenschied; hier ausschließlich zur überschlägigen Einordnung nasser März Tage verwendet. Für März werden im Mittel 8,7 Tage mit mindestens 1 mm Niederschlag angegeben.
<https://de.weatherspark.com/y/58206/Durchschnittswetter-in-L%C3%BCdenscheid-Nordrhein-Westfalen-Deutschland-das-ganze-Jahr-%C3%BCber>
<https://de.weatherspark.com/y/58206/Durchschnittswetter-in-L%C3%BCdenscheid-Nordrhein-Westfalen-Deutschland-das-ganze-Jahr-%C3%BCber>
- [6] Deutscher Wetterdienst, Warnkriterien für Wind: Windböen >50 km/h; Sturmböen 65-89 km/h; schwere Sturmböen ab 90 km/h. https://www.dwd.de/DE/wetter/warnungen_aktuell/kriterien/warnkriterien.html
- [7] Deutscher Wetterdienst, Regionales Klimabüro Essen: Bericht zu Klima und Klimaentwicklung bis Ende des Jahrhunderts für Wuppertal, darin stationsbasierte Winddaten für Lüdenschied, Bezugszeitraum 1994-2018, insbesondere Tabelle 2-2: Monatsmittel, maximale Böen und Tage mit Böen ≥ 8 Bft. <https://www.wuppertal.de/microsite/hitzeportal/Gutachten-des-DWD-1.pdf>
- [8] Land Nordrhein-Westfalen, Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen NRW, Anlage zu DIN EN 1991-1-4/NA: Märkischer Kreis Windlastzone 1. Fassung 2026. <https://recht.nrw.de/system/files/VA/17529-30688-anlage.pdf>
- [9] Deutsches Institut für Bautechnik, Zuordnung der Windzonen nach Verwaltungsgrenzen, Stand 02.06.2022.
<https://www.dibt.de/de/wir-bieten/technische-baubestimmungen>
- [10] European Commission, Joint Research Centre, EN 1991-1-4: Wind actions - Eurocode training material; charakteristische Grundwindgeschwindigkeit und Überschreitungswahrscheinlichkeit.
https://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2023-10/1.3_N-Malakatas.pdf
- [11] European Commission, Joint Research Centre, Worked examples on wind actions; Spitzenwinddruck, Turbulenz, Rauigkeit, Luftdichte 1,25 kg/m³. <https://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2022-06/D1.7Malakatas.pdf>
- [12] Marchand, O. C. et al. (2024): Three-dimensional flow around and through a porous screen. Journal of Fluid Mechanics 987, A20. <https://doi.org/10.1017/jfm.2024.372>
- [13] Eloy, C.; Kofman, N.; Schouveiler, L. (2012): The origin of hysteresis in the flag instability. Journal of Fluid Mechanics 691, 583-593. <https://doi.org/10.1017/jfm.2011.494>

Anhang A Rechenannahmen und Modellgrenzen

A.1 Rechenhinweise

- Umrechnung: $1 \text{ km/h} = 1/3,6 \text{ m/s}$; $1 \text{ l/m}^2 \text{ Niederschlag} = 1 \text{ mm Niederschlag}$.
- Die Regenwahrscheinlichkeit ist ein vereinfachtes Binomialmodell auf Basis der modellierten mittleren Zahl nasser Märztag. Wassertage sind in der Realität nicht unabhängig; Fronten erzeugen zeitliche Cluster.
- Die Windwahrscheinlichkeit ist ebenfalls nur eine vereinfachte Häufigkeitsrechnung: 3,0 Tage mit Böen $\geq 8 \text{ Bft}$ pro März ergeben für zehn zufällige Märztag einen Erwartungswert von rund 1,0 Tag. Die rund 64 % für mindestens einen solchen Tag setzen unabhängige und gleichverteilte Tage voraus; reale Sturmereignisse sind zeitlich korreliert und die Tageskennzahl ist nicht auf die Festivalstunden 19:00-24:00 Uhr übertragbar.
- Der aerodynamische Beiwert $c_f = 1,50$ wurde nur als konservativer Screening-Wert für Vergleichsrechnungen gewählt. Er ist kein aus DIN EN 1991-1-4 für diese spezielle flexible Bahn abgelesener Endbeiwert.
- $\eta_{p,0.70}$ beziehungsweise 0,50 sind Sensitivitätsfälle, keine Materialfreigaben. Im konservativen Nachweis ist $\eta_{p,1.00}$ zu verwenden, bis Versuch oder belastbare Produktdaten eine Reduktion rechtfertigen.
- Das Gleichgewichtsmodell behandelt die flexible Bahn als äquivalente oben gelagerte Fläche. Es dient der Dimensionierung des 1:1-Versuchs und ersetzt keine aeroelastische Berechnung.

A.2 Offene Realisierungsparameter

Parameter	Status / nächster Nachweis
Bahnbreite und Zwischenraum	Festlegung nach optischem und mechanischem 1:1-Versuch
Projektionsmesh und aerodynamische Kennwerte	Herstellerdaten, Druckverlust-/Widerstandskennwerte und Versuch
Untere Holzleiste	Masse, Querschnitt und Feuchteverhalten am Prototyp festlegen
Elastische Rückholung	Geometrie sowie reale Kraft-Dehnungs-Kennlinie messen
Öffnungswinkel und Fangweg	Kollisionsfrei und mit separater Fangsicherung definieren
Tragstruktur	Kräfte an Tragpunkt, Drahtseil, Mast und äußeren Anschlagpunkten statisch nachweisen
Betriebsgrenzen	Nach 1:1-Test, Wetterkonzept und statischer Prüfung festlegen

Tabelle A1: Offene Realisierungsparameter für die Weiterentwicklung bis zur Ausführungsreife.