

**Ermittlung von Anforderungen
zur Prüfung der Dauerhaftigkeit
von Klebeverbindungen bei
Anschlüssen und Verbindungen
der Luftdichtheitsschicht**

T 3324

T 3324

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2015

ISBN 978-3-8167-9611-4

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00

Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

Schlussbericht zum Forschungsvorhaben

**Ermittlung von Anforderungen zur Prüfung der Dauerhaftigkeit von Klebe-
verbindungen bei Anschlüssen und Verbindungen der Luftdichtheitsschicht**

Durchführung der Untersuchungen im Auftrag des
Steinbeis-Transferzentrums Wasser und Infrastruktur, Minden

gefördert durch das
Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin

Geschäftszeichen
ZP 52-5- 5.93-1329/09

Forschungsvorhaben

Ermittlung von Anforderungen zur Prüfung der Dauerhaftigkeit von Klebeverbindungen bei Anschlüssen und Verbindungen der Luftdichtheitsschicht

Geschäftszeichen
ZP 52-5- 5.93-1329/09

Forschende Stelle und Auftraggeber:

Steinbeis-Transferzentrum Wasser und Infrastruktur
Artilleriestraße 9
32427 Minden

Der Bericht umfasst: 56 Seiten Text
 3 Anhänge

Für die Bearbeitung:

Minden, den 28. April 2015

Prof. Dr.-Ing. Thomas Ackermann

Ermittlung von Anforderungen zur Prüfung der Dauerhaftigkeit von Klebeverbindungen bei Anschlüssen und Verbindungen der Luftdichtheitsschicht

von

Prof. Dr.-Ing. Thomas Ackermann

Kurzfassung: Im Zuge der Energieeinsparung bei Gebäuden und zur Vermeidung von Bauschäden durch Tauwasser in Bauteilen soll die Gebäudehülle dauerhaft luftdicht sein, ein Anspruch, der während der gesamten Nutzungsdauer eines Gebäudes oder Bauteils gelten muss. Diese Maßgabe bezieht sich jedoch nicht nur auf Bauteile und Bauteilschichten, die Luftdichtheit gewährleisten, sondern auch auf Klebemittel als Verbindung verschiedener Elemente, wie z. B. den Bahnen der Dampfsperre.

Die Lasten, die solche Klebeverbindungen beanspruchen, sind im Wesentlichen auf die Einwirkung durch Wind zurückzuführen und stellen keine gleichbleibende, sondern eine in ihrer Stärke ständig schwankende Kraft dar. Es war daher notwendig, zur Prüfung der Dauerhaftigkeit von Klebemitteln ein Verfahren zu entwickeln, mit dessen Hilfe die Wirkung alternierender Lasten auf Verbindungsmittel in der luftdichten Hülle von Gebäuden simuliert werden kann. Die Kräfte, die bei einer solchen Prüfung anzusetzen sind, wurden aus Festlegungen in den baurechtlich eingeführten Normen DIN EN 1990:2012-08, DIN EN 1991-1-4:2012-08 und DIN EN 1991-1-4/NA:2012-08 entwickelt und stellen mittlere und maximale Lasten aus Wind während der prognostizierten Nutzungsdauer eines Bauteils oder Gebäudes von 50 Jahren dar. Die erforderlichen Belastungswechsel und Zyklen zur Simulation des Ermüdungsversagens wurden einer britischen Studie entnommen und um die Lasteinwirkung aus Böen ergänzt. Der Alterung der verwendeten Materialien während der geplanten Nutzungszeit von 50 Jahren wird durch die Lagerung der Probekörper während einer Dauer von 120 Tagen bei einer Temperatur von $\theta = 65 \text{ °C}$ und einer relativen Feuchte von $\phi = 80 \text{ %}$ simuliert. Mithilfe einer

Prüfapparatur, die speziell für die Messung nach dem Wechsellastverfahren entwickelt wurde, kann das Ermüdungsverhalten der zu untersuchenden Klebmittel während der vorgesehenen Nutzungsdauer und deren Widerstandsfähigkeit bei der Einwirkung von extremen Böen getestet werden. Aufgrund dieser Vorgehensweise lässt sich unter Verwendung realitätsnaher Verhältnisse eine Aussage darüber machen, ob Klebmittel während der zu erwartenden Nutzungsdauer eines Bauwerks oder Bauteils der Anforderung, luftdicht zu sein, genügen oder nicht.

Inhalt

1. Einleitung
2. Anforderungen an die Dauerhaftigkeit gemäß E DIN 4108-11
3. Wechsellastverfahren zur Prüfung der Dauerhaftigkeit
4. Lasten beim Wechsellastverfahren
5. Windlasten beim Wechsellastverfahren
6. Lastszenarien aus Windeinwirkung
 - 6.1 Allgemeines
 - 6.2 Nennwert der Windgeschwindigkeit bei der Ermüdungsprüfung
 - 6.2.1 Untersuchungen zur Bestimmung der Basiswindgeschwindigkeit unter Verwendung ausgewählter Wetterstationen
 - 6.2.2 Untersuchungen zur Bestimmung des Grundwerts der Basiswindgeschwindigkeit gemäß den allgemein anerkannten Regeln der Technik
 - 6.2.3 Vergleich des Grundwerts der Basiswindgeschwindigkeit aus eigenen Untersuchungen mit denen der allgemein anerkannten Regeln der Technik
 - 6.3 Nennwert der Böen- oder Spitzenwindgeschwindigkeit
 - 6.3.1 Untersuchungen zur Bestimmung des Böengeschwindigkeitsdrucks unter Verwendung ausgewählter Wetterstationen
 - 6.3.2 Untersuchungen zur Bestimmung des Böengeschwindigkeitsdrucks gemäß den allgemein anerkannten Regeln der Technik
 - 6.3.3 Vergleich des Böengeschwindigkeitsdrucks aus eigenen Untersuchungen mit denen der allgemein anerkannten Regeln der Technik
7. Winddruck auf Oberflächen
 - 7.1 Allgemeines
 - 7.2 Bestimmung des Winddrucks
 - 7.2.1 Winddruck in der Ermüdungsprüfung
 - 7.2.2 Winddruck in der Prüfung der Böenlast

- 8 Anteilige Lasteinwirkung auf Bauteil-Innenoberflächen aus Wind

- 9 Grundlagen der Tragwerksplanung
 - 9.1 Allgemeines
 - 9.2 Nachweise für Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit
 - 9.3 Bemessungswerte der Einwirkung
 - 9.3.1 Bemessungswerte der Einwirkung $F_{d,b}$ bei der Ermüdungsprüfung
 - 9.3.2 Bemessungswerte der Einwirkung $F_{d,p}$ bei Böenbelastung
 - 9.4 Bemessungswert E_d der Auswirkungen von Einwirkungen
 - 9.4.1 Allgemein
 - 9.4.2 Bemessungswert E_d der Auswirkungen von Einwirkungen für einen bestimmten Lastfall
 - 9.4.3 Bemessungswert E_d der Auswirkungen von Einwirkungen für Lastkombinationen

- 10 Bemessungswert C_d für das Gebrauchstauglichkeitskriterium

- 11 Einwirkungen auf Klebeverbindungen
 - 11.1 Allgemeines
 - 11.2 Statisches System
 - 11.3 Folieneigenschaften
 - 11.4 Ermittlung der Lasten in der Simulation
 - 11.5 Parameterstudie zur Abschätzung der Prüflast S_p
 - 11.5.1 Berechnungen mit isotropen Folien
 - 11.5.2 Berechnungen mit anisotropen Folien

- 12 Lastzyklen zur Simulation der Dauerhaftigkeit

- 13 Durchführung der Prüfung beim Wechsellastverfahren
 - 13.1 Probenkonfiguration und Untergründe
 - 13.1.1 Referenzfallprüfung
 - 13.1.2 Systemprüfung
 - 13.2 Künstliche Alterung
 - 13.3 Probenvorbereitung und Probenherstellung

- 14 Prüfung nach dem Wechsellastverfahren
 - 14.1 Allgemeines
 - 14.2 Ermüdungsprüfung
 - 14.3 Prüfung der Böeneinwirkung
 - 14.4 Kriterium zum Bestehen des Wechsellastverfahrens

- 15 Zusammenfassung

Anhang A: Bestimmung der Windgeschwindigkeiten

Anhang B: Ergebnisse aus Simulationsrechnungen

Anhang C: Auszug aus dem Fraunhoferbericht

Literatur

1 Einleitung

Die fortlaufenden Verschärfungen der Anforderungen an die Energieeinsparung im Gebäudebereich zum einen, zum anderen aber auch das Verhindern von Schäden in Bauteilen durch Korrosion oder Fäulnis, hervorgerufen durch das Eindringen warmer und feuchter Raumluft in das Bauteilinnere, erfordern es, dass die Gebäudehülle hinreichend luftdicht ist. Da dieser Anspruch während der gesamten Nutzungsdauer eines Gebäudes oder Bauteils gelten muss, war und ist in den Regelwerken zum hygienischen und energiesparenden Wärmeschutz festgeschrieben, dass Bauteile – und insbesondere Fugen in der Gebäudehülle – dauerhaft und luftundurchlässig abgedichtet sein müssen. Nachdem in DIN 4108-7 dargestellt wurde, wie Bauteile und deren Anschlüsse an angrenzende Konstruktionen luftundurchlässig ausgebildet werden können, war die sich daran anschließende Frage, wie die Dauerhaftigkeit von Komponenten der luftdichten Hülle geprüft werden kann. Das besondere Augenmerk lag dabei auf den Klebemitteln – Klebmassen und Klebebänder –, mit deren Hilfe verschiedene Elemente der luftdichten Hülle verbunden werden. Um auch für dieses Problem eine den Regeln der Technik entsprechende Lösung anbieten zu können, wurde vom Normenausschuss „Luftdichtheit“ des Deutschen Instituts für Normung im Jahr 2008 beschlossen, in der Normenreihe DIN 4108 mit DIN 4108-11 „Dauerhaftigkeit von Klebemitteln“ ein Regelwerk zu erarbeiten, das dazu dient, die Dauerhaftigkeit von Klebemitteln zu überprüfen. Mit dieser Norm soll erreicht werden, dass nicht qualifizierte Produkte auf den Baustellen nicht zum Einsatz kommen und dass es für Unternehmen, die die Arbeiten zur Luftdichtheit ausführen, Angaben gibt, welche Klebemittel – im Sinne der normativen Festlegungen – als dauerhaft angesehen werden können.

2 Anforderungen an die Dauerhaftigkeit gemäß E DIN 4108-11

Der Entwurf zu DIN 4108-11 vom Dezember 2014 enthält hinsichtlich der Prüfung der Dauerhaftigkeit von Klebemitteln zwei Anforderungen und damit verbunden zwei Prüfmethoden:

- Bei der ersten Variante werden Streifen einer Referenzfolie mit Klebemitteln verklebt. Im Anschluss werden Probekörper bei einer Temperatur von $\theta = 65$ °C und einer relativen Feuchte von $\phi = 80$ % über eine Zeitdauer von 120 Ta-

gen in einem Klimaschrank gelagert, was eine beschleunigte künstliche Alterung bewirken soll. Nach der künstlichen Alterung erfolgt eine statische Festigkeitsprüfung durch Scher- und Schältests. Aus den Aufzeichnungen des Kraft-Weg-Diagramms oder dem Spannungs-Dehnungs-Diagramm dieser Versuche kann man sowohl eine mittlere Kraft $F_{s,m}$ als auch die maximal aufnehmbare Kraft $F_{s,max}$ ablesen. Als Anforderung wurde in E DIN 4108-11 für beide Kräfte ein Wert festgelegt, der aus der Analyse einer Vielzahl von Versuchen resultiert und die nicht geringer ist als ein bestimmter prozentualer Anteil (zurzeit 20 %) aller untersuchten Proben. Der so definierte Grenzwert basiert somit nicht auf einer ingenieurmäßigen Analyse, sondern ist eine rein statistische Festlegung auf der Basis von Zugversuchen.

- Bei der zweiten Variante, dem Wechsellastverfahren, erfolgte die Entwicklung des Prüfmodus und seiner Grenzwerte aus der ingenieurmäßigen Untersuchung der Frage, welche Kräfte auf die zu untersuchenden Klebemittel einwirken und wie diese Belastung – unter Berücksichtigung der Lebensdauer eines Gebäudes oder Bauteils – simuliert werden kann.

Die weiteren Ausführungen in diesem Forschungsbericht beziehen sich auf die Herleitung des Wechsellastverfahrens und die Dokumentation der Randbedingungen.

3 Wechsellastverfahren zur Prüfung der Dauerhaftigkeit

Das Ziel von DIN 4108-11 ist – wie oben bereits dargelegt – die Prüfung der Dauerhaftigkeit von Klebemitteln. Im Gegensatz zu der in weiten Bereichen zur Prüfung der Standsicherheit von Gebäuden oder Bauteilen üblichen Vorgehensweise, bei der von stationären Lasten (Eigengewicht, Verkehrslast, Schneelast, Windlast) ausgegangen wird, zielt das Wechsellastverfahren darauf ab, das „Tragverhalten“ von Klebemitteln unter alternierenden Lasten zu untersuchen. Verfahren dieser Art sind nicht nur aus anderen Sparten bekannt, z. B. der Fahrzeugindustrie oder der Möbelindustrie; auch im Bereich der statisch konstruktiven Nachweise wird zum Teil auf die Auswirkung zeitlich veränderlicher Einwirkungen eingegangen. Als Beispiel sei hier der Nachweis der Standsicherheit bei schwingungsanfälligen Konstruktionen genannt (Brücken, Masten), aber auch bei Verbindungen im Stahlbau ist man sich des Problems bewusst, dass Anschlüsse unter wechselnder Belastung versagen können, bevor im Querschnitt die Fließgrenze des Materials er-

reicht wird. Bei der Belastung des Baustoffs Stahl durch zeitlich veränderliche Kräfte kann es dazu kommen, dass im Randbereich eines Bauteils oder im Randbereich der Verbindungsstelle von Bauteilen die Fließgrenze des Materials überschritten wird, ohne dass der gesamte Querschnitt durchplastiziert. Treten die Lasten, die zur Plastifizierung des Randbereiches führen, wiederholt auf, dann breitet sich der Bereich des „aufgeweichten“ Materials vom Rand zur Mitte des Querschnitts hin aus und es kommt – nach einer ausreichenden Zahl von Lastwechseln – zu einem Versagen im Bauteil oder im Anschluss, bevor die statische Fließgrenze erreicht wird. Man spricht vom Ermüdungsversagen oder Ermüdungsbruch.

Da es sich – wie bereits eingangs erwähnt – bei dem anstehenden Problem um die Prüfung der Dauerhaftigkeit handelt, genügt es nicht, die Qualität von Klebmitteln durch eine einzige Krafteinwirkung bzw. die Festlegung einer (willkürlich) gewählten Belastungsgrenze aus aufnehmbaren Kräften festzulegen. Der Begriff der Dauerhaftigkeit impliziert, dass die zu untersuchenden Klebmittel bei alternierenden Lasten während eines hinreichend langen Zeitraums ihrer Aufgabe – nämlich der Luftdichtheit – gerecht werden. Zu diesem Zweck ist das Ermüdungsverhalten von Verbindungen der luftundurchlässigen Hülle zu prüfen. Diese Qualitätsprüfung erfolgt mit dem Wechsellastverfahren. Zur Umsetzung des Wechsellastverfahrens sind folgende Punkte zu untersuchen:

- Festlegung über Bemessungslasten zur Durchführung der Prüfungen
- Darstellung der anteiligen Lasten aus Wind auf Bauteil-Innenoberflächen
- Eine Angabe über die Anzahl der Lastwechsel
- Ein Verfahren zur künstlichen Alterung der Materialien
- Angaben zu statistischen Methoden und Teilsicherheitsfaktoren, mit denen die Streubreite von Einflüssen auf die Prüfung erfasst werden kann
- Ein Gerät zur Prüfung der Dauerhaftigkeit von Klebmitteln nach dem Wechsellastverfahren

4 Lasten beim Wechsellastverfahren

Betrachtet man die luftdichte Hülle eines Gebäudes oder Bauteils, so grenzt diese in der Regel beheizte Räume von der Außenluft ab. Es handelt sich dabei meist um Außenwände, Dächer, Decken oder Wände, die beheizte Räume von unbe-

heizten Bereichen (Spitzboden, Raum hinter Abseitenwänden, Technikräume usw.) oder die Außenluft abgrenzen. Massive Bauteile wie z. B. verputzte Außenwände weisen hinsichtlich der Luftdichtheit normalerweise keine Probleme auf. Anders geartet ist die Situation hingegen bei leichten Außenbauteilen wie Holzständerwänden oder Dächern. Bei diesen Bauteilen wird auf der Raumseite eine Bauteilschicht aufgebracht, die die Funktion der Luftdichtheit – häufig in Verbindung mit der Dampfdichtheit – übernimmt. Die hierfür verwendeten Materialien wie Platten oder Bahnen sind in der Fläche luftdicht, jedoch müssen die Stöße und Übergänge zu angrenzenden Konstruktionselementen luftdicht verklebt werden. Da diese Schichten ein Teil des Bauteils sind, üben auch die Lasten, die auf das Bauteil einwirken, Kräfte auf die Luftdichtheitsschicht und damit auf die Verklebungen, d. h. auf die Klebemittel aus. Folgende Lasten sind dabei zu betrachten:

- Eigengewicht
- Verkehrslast
- Schneelast
- Windlast

Das Gewicht der Luftdichtheitsschicht – meist Kunststofffolien – wird im Folgenden vernachlässigt. Dies gilt auch für das Gewicht von Dämmstoffen, die möglicherweise eine Flächenbelastung auf die Luftdichtheitsschicht und damit auf die Verbindungsstellen darstellen. Die bei Dächern anfallenden Schneelasten werden über den Dachdeckstoff an die darunter liegende Tragkonstruktion des Daches weitergeleitet und führen daher auch zu keiner Belastung der Luftdichtheitsschicht. Im Gegensatz zu Eigengewicht, Verkehr und Schnee wirken jedoch Windlasten auf die Luftdichtheitsschicht ein.

5 Windlasten beim Wechsellastverfahren

Hinsichtlich der Festlegung der Kräfte, die aus Windlasten auf die Luftdichtheitsschicht einwirken, ist beim Wechsellastverfahren zwischen folgenden Fragestellungen zu unterscheiden, nämlich

- wie groß beim Wechsellastverfahren der Bemessungswert der Windgeschwindigkeit bzw. des daraus resultierenden Winddrucks ist, der auf die Außenoberfläche eines Bauteils einwirkt,

- welche Kräfte aus Wind beim Wechsellastverfahren als Bemessungslasten anzusetzen sind,
- welcher Anteil der auf die Außenoberfläche eines Bauteils der luftdichten Hülle einwirkenden Windlasten auf die raumseitig angeordnete Luftdichtheitsschicht einwirkt.

6 Lastszenarien aus Windeinwirkung

6.1 Allgemeines

Windlasten werden – im Gegensatz zu den anderen im Bauwesen gebräuchlichen Lasten wie z. B. Eigengewicht, Verkehr und Schnee – nicht direkt, sondern über die Windgeschwindigkeit bestimmt. Trifft eine Windböe auf ein Bauteil oder eine Konstruktion, dann führt die damit verbundene Druckwelle zu einer Belastung. Hieraus folgt: Je höher die Windgeschwindigkeit ist, die an einem Bauteil anliegt, umso größer ist der daraus resultierende Druck; d. h., um den aus der Einwirkung des Windes auf ein Gebäude bzw. seine Bauteile resultieren Bemessungswert der Windlasten bestimmen zu können, ist zunächst der Bemessungswert der Windgeschwindigkeit v zu ermitteln, damit man dann – unter Ansatz der Berechnungsverfahren und Parameter aus DIN EN 1991-1-4 [1] – den Bemessungswert des Winddrucks q berechnen kann.

Für die Überprüfung der Dauerhaftigkeit von Klebemitteln sind zwei weitere Aspekte aus der Windeinwirkung zu betrachten:

- Versagen der Klebeverbindung durch Ermüdung
- Versagen durch die Einwirkung einer Spitzenlast

Da das Versagen durch Ermüdung auf die Nutzungsdauer eines Gebäudes oder Bauteils abzielt, werden die in diesem Zusammenhang zu verwendenden Lasten aus dem Mittelwert eines ausgewählten Referenzzeitraums bestimmt. Neben diesen während der Lebensdauer einer Verklebung einwirkenden Kräften muss aber auch der Lastfall eines Extremereignisses untersucht werden, das einmalig während der betrachteten Nutzungsdauer auftritt und aus Böen mit extremen Windgeschwindigkeiten resultiert.

Da es beim Wechsellastverfahren bislang keine Festlegungen zu Bemessungswerten der Windgeschwindigkeiten gab, wurden hierfür folgende zwei Varianten untersucht:

- Untersuchungen auf der Basis ausgewählter Wetterstationen des Deutschen Wetterdienstes
- Analyse der Bemessungswerte von Windgeschwindigkeiten gemäß den allgemein anerkannten Regeln der Technik

Da in den Bemessungswerten der Lasten auch Zuschläge für Unwägbarkeiten der Ausführung bzw. Zuschläge zur Berücksichtigung statistischer Verteilungen der Einwirkung enthalten sind – sogenannte Teilsicherheitsbeiwerte –, erfolgt die Bestimmung der maßgeblichen Lasten zunächst durch die Betrachtung ihrer Nennwerte. Durch den Ansatz von Teilsicherheitsbeiwerten werden dann aus den Nennwerten die Bemessungswerte der Lasten.

6.2 Nennwert der Windgeschwindigkeit bei der Ermüdungsprüfung

Im Gegensatz zu einem Gebäude, bei dem – mit Ausnahme von Fertighäusern – der Aufstellungsort bekannt und damit dessen Eingliederung in eine Windlastzone möglich ist, können die zu prüfenden Klebmittel an jedem Standort in der Bundesrepublik verbaut werden. Eine ortsspezifische Angabe zur Windlast ist daher nicht möglich. Stattdessen muss als Bemessungswert der Windlast und damit als Bemessungswert der Windgeschwindigkeit ein Wert festgelegt werden, der den ungünstigsten Standort und damit die ungünstigsten Verhältnisse im Bundesgebiet widerspiegelt.

Analog zu der Bezeichnung in DIN EN 1991-1-4:2010-12 wird der Nennwert der Windgeschwindigkeit im Weiteren als Grundwert $v_{b,0}$ der Basiswindgeschwindigkeit bezeichnet.

6.2.1 Untersuchungen zur Bestimmung der Basiswindgeschwindigkeit unter Verwendung ausgewählter Wetterstationen

Zur Bestimmung des Grundwerts der Basiswindgeschwindigkeit $v_{b,0}$ wurde zunächst eine statistische Auswertung von Daten an ausgewählten Orten durchgeführt, die sich auf 33 Stationen, verteilt über das gesamte Bundesgebiet, bezog. Der Betrachtungszeitraum, der dabei angesetzt wurde, sollte in Zusammenhang mit der Nutzungsdauer von Gebäuden oder Bauteilen und den Festlegungen in den allgemein anerkannten Regeln der Technik stehen. Für Gebäude gilt eine statistische Nutzungsdauer von 50 Jahren (siehe DIN EN 1990:2010-12 Tabelle 2.1).

Dementsprechend wurde den Untersuchungen zum Grundwert der Basiswindgeschwindigkeit mit den Jahren 1955 bis 2005 ein Zeitraum von 50 Jahren zugrunde gelegt. Diese Betrachtungsweise steht im Einklang mit DIN EN 1991-1-4:2010-12, in deren Abschnitt 3.4 festgelegt ist: „Die Basiswerte sind charakteristische Größen mit einer jährlichen Überschreitenswahrscheinlichkeit von 2 %, die einer mittleren Wiederkehrperiode von 50 Jahren entspricht“ außerdem mit DIN EN 1990:2010-12 wo es in Abschnitt 4.1.2 Anmerkung 2 heißt: „Der charakteristische Wert der klimatischen Einwirkungen beruht auf der 98 %-Überschreitungsfraktile der Extremwertverteilung der wesentlichen zeitveränderlichen Basisvariablen für einen Bezugszeitraum von 1 Jahr. Dies entspricht einer mittleren Wiederkehrperiode dieser Basisvariablen von 50 Jahren.“ Als Extremwertverteilung wurde für die vorliegende Untersuchung eine Gumbel-Extremalverteilung [3] mit folgendem Ansatz gewählt:

$$F_y(y) = \exp\{-e^{-y}\} \quad (1)$$

Es wurde zunächst aus den Werten der mittleren täglichen Windgeschwindigkeit der Mittelwert eines Jahres bestimmt, um dann mit Hilfe der Gumbelverteilung den Wert zu berechnen, der einmal in 50 Jahren überschritten wird. Obwohl es zur statistischen Auswertung von Daten noch weitere Ansätze gibt – z. B. Weibullverteilung oder Poissonverteilung –, wurde zur Analyse der Extremwerte von Windgeschwindigkeiten im vorliegenden Fall die Gumbel-Extremwertverteilung verwendet, da Berechnungen mit dieser statistischen Methode zeigten, dass sie sich besonders gut für die Auswertung klimatischer Ereignisse eignet.

Als Zeitintervall zur Angabe der mittleren Windgeschwindigkeiten wurde eine Stunde gewählt, da bei einem Untersuchungszeitraum von 50 Jahren der Aufwand der Ausarbeitungen noch überschaubar war. Die Ergebnisse der Auswertung der mittleren täglichen Windgeschwindigkeit geben somit den über 24 Stunden gemittelten Wert aus allen in diesem Zeitraum aufgetretenen Windgeschwindigkeiten wieder.

Da die Daten der mittleren täglichen Windgeschwindigkeiten, herausgegeben vom Deutschen Wetterdienst (DWD), auf der Einheit der Beaufort-Skala basieren (v_{Bft}), erfolgte die Umrechnung dieser Angaben in die SI-Einheit m/s mit folgendem Algorithmus [4], auf dessen Angaben auch die Angaben des DWD [5] beruhen:

$$v = v_{\text{Bft}}^{3/2} + 0,07 \quad [\text{m/s}] \quad (2)$$

Die Zusammenstellung der Basiswindgeschwindigkeit als Ergebnis der 98 %-Fraktile von Windgeschwindigkeiten, basierend auf den täglichen Mittelwerten an den der Untersuchung zugrunde liegenden Stationen, ist Anlage A Tabelle A.1 zu entnehmen.

Die Umrechnung des Grundwerts der Basiswindgeschwindigkeit $v_{b,0}$ in den zugehörigen Basiswindgeschwindigkeitsdruck $q_{b,0}$ erfolgt nach DIN EN 1991-1-4 Abschnitt 4.5 Gleichung 4.10 und lautet wie folgt:

$$q_{b,0} = \frac{v_{b,0}^2}{1600} \quad (3)$$

Die Basiswindgeschwindigkeitsdrücke $q_{b,0}$, die sich aus dem Grundwert der Basiswindgeschwindigkeiten $v_{b,0}$ an den untersuchten Standorten ergeben, sind gleichfalls in Anhang A Tabelle A.1 aufgelistet.

Wie der Tabelle A.1 in Anhang A zu entnehmen ist, beinhalten die ausgewählten Stationen mit dem Feldberg, dem Fichtelberg und der Zugspitze auch geografische Spitzenlagen, die dementsprechend zu Extremwerten der Windgeschwindigkeit führen. Diese Stationen wurden in die Zusammenstellung einbezogen, um zu zeigen, dass es – in windexponierten Lagen – durchaus zu höheren Windgeschwindigkeiten kommen kann. Da Gebäude an solchen Positionen jedoch eher die Ausnahme sind, wurden diese Extrembeispiele bei der Wahl der Repräsentanzstation ausgeschlossen. Als Repräsentanzstationen wurden nach der oben beschriebenen Auswertung der Winddaten an den 33 Standorten Helgoland und Arkona mit einem Grundwert der Basiswindgeschwindigkeit von $v_{b,0} = 19,08$ m/s bzw. $19,12$ m/s und einem Basiswindgeschwindigkeitsdruck – in beiden Fällen – von $q_{b,0} = 0,23$ kN/m² festgelegt.

6.2.2 Untersuchungen zur Bestimmung des Grundwerts der Basiswindgeschwindigkeit gemäß den allgemein anerkannten Regeln der Technik

Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung des Grundwerts der Basiswindgeschwindigkeit $v_{b,0}$, sind die Festlegungen in den allgemein anerkannten Regeln der Technik, im vorliegenden Fall in DIN EN 1991-1-4:2010-12 bzw. in DIN EN 1991-1-4/NA:2010-12 [6]. Hierzu ist in DIN EN 1991-1-4 Abschnitt 4.2 Ziffer 1 festgelegt: „Der Grundwert $v_{b,0}$ der Basiswindgeschwindigkeit ist der charakteristische Wert der mittleren 10-Minuten-Windgeschwindigkeit. Sie ist unabhängig von Windrichtung und Jahreszeit

und ist bezogen auf 10 m Höhe über Boden in ebenem, offenem Gelände mit niedriger Vegetation.“

Da sich die auf diese Art ermittelten Grundwerte der Basiswindgeschwindigkeit $v_{b,0}$ und die daraus resultierenden Basiswindgeschwindigkeitsdrücke $q_{b,0}$ im Wesentlichen auf die Nachweise der Standsicherheit und damit auf örtlich zuzuordnende Gebäude beziehen, zeigt DIN EN 1991-1-4/NA Anhang NA.A Bild A.1 eine Karte zur Einordnung von Standorten und für jede der dort aufgeführten vier Windlastzonen die zugehörigen Werte des Grundwerts der Basiswindgeschwindigkeit $v_{b,0}$ und des Basiswindgeschwindigkeitsdrucks $q_{b,0}$.

Tabelle 1: Basiswindgeschwindigkeit und Basiswindgeschwindigkeitsdruck [6]

	Windzone	$v_{b,0}$	$q_{b,0}$
	WZ 1	22,5 m/s	0,32 kN/m ²
	WZ 2	25,0 m/s	0,39 kN/m ²
	WZ 3	27,5 m/s	0,47 kN/m ²
	WZ 4	30,0 m/s	0,56 kN/m ²

6.2.3 Vergleich des Grundwerts der Basiswindgeschwindigkeit aus eigenen Untersuchungen mit denen der allgemein anerkannten Regeln der Technik

Vergleicht man den Grundwert der Basiswindgeschwindigkeit $v_{b,0}$ und den Basiswindgeschwindigkeitsdruck $q_{b,0}$ an den verschiedenen Standorten nach Kapitel 6.2.1 mit den Werten aus DIN EN 1991-14/NA:2010-12 Bild NA.A.1 (Tabelle 2), so werden einige Unterschiede sichtbar.

Tabelle 2: Basiswindgeschwindigkeit und Basiswindgeschwindigkeitsdruck

	Basiswind- geschwindigkeit $v_{b,0}$ [m/s]	Basiswind- geschwindigkeitsdruck $q_{b,0}$ [KN/m ²]
Aus Kapitel 6.2.1	19,12	0,23
Aus Kapitel 6.2.2	30,00	0,56

Die Abweichungen des Grundwerts der Basiswindgeschwindigkeit und des Basiswindgeschwindigkeitsdrucks resultieren bei den beiden Auswertungsverfahren aus den unterschiedlichen Zeitfenstern bei der Ermittlung der mittleren Windgeschwindigkeit. Bezieht man die mittlere Windgeschwindigkeit auf ein kürzeres Zeitintervall, dann fließen auch Windspitzen in die Mittelwertbildung ein, die – aufgrund des vergleichsweise seltenen Auftretens – bei längeren Zeitabschnitten egalisiert werden; d. h., während sich die Auswertungen zu Kapitel 5.2.1 auf eine Zeiteinheit der mittleren Windgeschwindigkeit von einem Tag bezogen, erstreckt sich das Zeitintervall gemäß DIN EN 1991-1-4:2010-12 und damit auch DIN EN 191-1-4/NA:2010-12 über 10 Minuten und führt dadurch zu höheren Grundwerten der Basiswindgeschwindigkeit $v_{b,0}$ und des Basiswindgeschwindigkeitsdrucks $q_{b,0}$.

6.3 Nennwert der Böen- oder Spitzenwindgeschwindigkeit

Wie bereits in Kapitel 5.1 dargelegt, wird die Dauerhaftigkeit einer Klebeverbindung und damit die eines Klebemittels nicht nur durch die Ermüdungsbelastung gekennzeichnet, sondern auch durch die Tauglichkeit bei extremen Einwirkungen. Untersuchungen zur Ermüdung sind gekennzeichnet durch die Simulation wiederkehrender mittlerer Belastungen während der Nutzungsdauer eines Bauteils oder Gebäudes, wohingegen die Extremsituation das einmalige Auftreten einer maximalen Belastung in dieser Zeit widerspiegelt. Auch für dieses Lastszenario wurden Untersuchungen zur Bestimmung des Nennwertes der Windgeschwindigkeit und des Windgeschwindigkeitsdrucks an den ausgewählten Stationen bzw. gemäß der allgemein anerkannten Regeln der Technik durchgeführt.

6.3.1 Untersuchungen zur Bestimmung des Böengeschwindigkeitsdrucks unter Verwendung ausgewählter Wetterstationen

Analog zum Grundwert der Basiswindgeschwindigkeit $v_{b,0}$ und dem daraus abgeleiteten Basiswindgeschwindigkeitsdruck $q_{b,0}$, wurden die Daten der ausgewählten 33 Stationen auch daraufhin untersucht, welche maximale Böengeschwindigkeit sich aus den Werten der Jahre 1955 bis 2005, also dem anzusetzenden Zeitraum der Nutzungsdauer von 50 Jahren, ablesen lässt. Es handelt sich bei diesen Angaben nicht um zeitlich gemittelte Werte, sondern um die Böengeschwindigkeiten, die der Deutsche Wetterdienst an den betrachteten Stationen gemessen hat. Im Gegensatz zur Berechnung des Grundwerts der Basiswindgeschwindigkeit, bei der durch die Mittelung der Windgeschwindigkeiten über einen Zeitraum von einem Tag die in diesem Zeitraum aufgetretenen Windspitzen im Mittelwert nicht mehr erkennbar waren, geben die Böenwindgeschwindigkeiten den tatsächlichen Sachverhalt wieder. Die Kammlagen von Bergen, die bereits bei den Untersuchungen zur Basiswindgeschwindigkeit nicht weiter verfolgt wurden, entfallen auch bei der Betrachtung der Böen- oder Spitzenwindgeschwindigkeiten. Die maximale Böengeschwindigkeit, die in den zugrunde liegenden 50 Jahren an den ausgewählten Stationen gemessen wurde, lag in List auf Sylt bei $v_p = 51$ m/s. Unter Verwendung von Gleichung 3 erhält man an diesem Standort damit einen Böengeschwindigkeitsdruck von $q_p = 1,63$ kN/m².

6.3.2 Untersuchungen zur Bestimmung des Böengeschwindigkeitsdrucks gemäß den allgemein anerkannten Regeln der Technik

Zur Bestimmung des Böengeschwindigkeitsdrucks q_p macht DIN EN 1991-1-4/NA in Abschnitt NA.B.3.1 folgende Vorgabe: „Den Regelungen für den Geschwindigkeitsdruck, der bei nicht schwingungsanfälligen Konstruktionen angewendet wird, liegt eine Böengeschwindigkeit zu Grunde, die über eine Böendauer von 2 s bis 4 s gemittelt ist.“ Angaben zum Böengeschwindigkeitsdruck q_p sind, für Gebäude mit einer Höhe bis 25 m über Grund entsprechend ihrer regionalen Position DIN EN 1991-1-4/NA Tabelle NA.B.3 zu entnehmen.

Tabelle 2: Böengeschwindigkeitsdruck

Windzone		Geschwindigkeitsdruck q_p in kN/m^2 bei einer Gebäudehöhe h in den Grenzen von		
		$h \leq 10\text{m}$	$10\text{ m} < h \leq 18\text{ m}$	$18\text{ m} < h \leq 25\text{ m}$
1	Binnenland	0,50	0,65	0,75
2	Binnenland	0,65	0,80	0,90
	Küste und Inseln der Ostsee	0,85	1,00	1,10
3	Binnenland	0,80	0,95	1,10
	Küste und Inseln der Ostsee	1,05	1,20	1,30
4	Binnenland	0,95	1,15	1,30
	Küste der Nord- und Ostsee und Inseln der Ostsee	1,25	1,40	1,55
	Inseln der Nordsee	1,40	—	—

Für Gebäude auf den Inseln der Nordsee wird in DIN EN 1991-1-4/NA:2010-12 festgelegt, dass sie nur eine Höhe von weniger als 10 m haben.

6.3.3 Vergleich des Böengeschwindigkeitsdrucks aus eigenen Untersuchungen mit denen der allgemein anerkannten Regeln der Technik

Auch bei den Grundwerten der Böenwindgeschwindigkeit v_p und dem Böenwindgeschwindigkeitsdruck q_p zeigt ein Vergleich der Werte aus Kapitel 6.3.1 mit den Angaben nach DIN EN 1991-1-4/NA:2010-12 Unterschiede. Jedoch sind die Abweichungen in diesem Fall vernachlässigbar klein. Dies ist auf den Umstand zurückzuführen, dass in Kapitel 6.3.1 die Spitzenböen ausgewertet wurden und sich die Angaben in DIN EN 1991-1-4/NA:2010-12 auf den Mittelwert aus Böen mit einer Andauer von 2 s bis 4 s bezogen, d. h. in beiden Fällen wurden Windspitzen untersucht. Abweichungen in einem so geringen Ausmaß können sich alleine schon aus den Berechnungen ergeben.

Tabelle 3: Böenwindgeschwindigkeit v_p und Böenwindgeschwindigkeitsdruck q_p

	Böenwindgeschwindigkeit v_p [m/s]	Böenwindgeschwindigkeitsdruck q_p [KN/m^2]
Aus Kapitel 6.3.1	51,00	1,63
Aus Kapitel 6.3.2	-	1,55

7. Winddruck auf Oberflächen

7.1 Allgemeines

Wie der Titel der Norm E DIN 4108-11 besagt, geht es dabei um die Prüfung der Dauerhaftigkeit von Klebemitteln, während die Normen der Reihe DIN EN 1991-1 auf die Standsicherheit abheben. Zur Bemessung der Standsicherheit sind die einwirkenden Lasten so zu wählen, dass das beaufschlagte Bauteil oder Gebäude deren Auftreten schadensfrei übersteht, auch wenn das Ereignis nur mit der Wahrscheinlichkeit einer 98 %-Fraktile – also statistisch gesehen einmal in 50 Jahren – auftritt. Anders verhält sich dagegen die oben erwähnte Dauerhaftigkeit. Hierbei geht es um die Beständigkeit von Bauteilen oder Baustoffen in Hinblick auf eine große Anzahl von Lastwechseln. Es steht also nicht ein herausragendes Einzelereignis im Vordergrund der Untersuchung, sondern alternierende Lastwechsel. Unter diesem Gesichtspunkt ist es bei der Ermüdungsprüfung auch nur erforderlich, einen Bruchteil des Extremwertes der Belastung anzusetzen. Um dieser verminderten Last Rechnung zu tragen, wurde bei der Herleitung des Lastszenarios für die Ermüdungsprüfung im Rahmen von E DIN 4108-11 auch die mittlere tägliche Windgeschwindigkeit, die an den Standorten einmal in 50 Jahren überschritten wird, herangezogen. Gleichwohl kann auch ein Bauteil und damit ein Klebemittel durch die nach DIN EN 1991-1-4:2010-12 ermittelte, statistisch gesehen einmal in 50 Jahren auftretende Böe beaufschlagt werden. In E DIN 4108-11 wird daher zwischen der Ermüdungsprüfung und der Prüfung der Böenlasten unterschieden. Daher ist es auch erforderlich, den Winddruck dieser beiden Lastszenarien zu bestimmen. Bei der Wahl des im Folgenden bestimmten ermittelten Winddrucks in der Ermüdungsprüfung und dem Winddruck in der Prüfung der Böenlast war zu berücksichtigen, dass es sich bei E DIN 4108-11 zwar um eine nationale Norm handelt, dass diese Norm jedoch auch auf internationaler Ebene angesiedelt werden soll. Da die Dimensionierung von Lasten in Normen auf CEN oder ISO-Ebene in den Zuständigkeitsbereich der jeweiligen nationalen Normungsinstitution fällt, wurden die Fundstellen für Lastannahmen in E DIN 4108-11 so gewählt, dass sie mit europäisch harmonisierten Normen übereinstimmen, d. h., bei der Angabe, wie die entsprechenden Windlasten zu berechnen sind, wurde auf die europäisch harmonisierten Normen DIN EN 1990 und DIN EN 1991-1-4:2010-12 Bezug genommen. Festlegungen zu den Grundwerten der Basiswind-

geschwindigkeit $v_{b,0}$ und zur Böengeschwindigkeit v_p bzw. dem Böengeschwindigkeitsdruck q_b können daher in den nationalen Anhängen erfolgen.

Die Lasten zur Prüfung des Ermüdungsversagens bzw. der Einwirkung von Böen beziehen sich auf Standorte mit einer Lage der Geländeoberkante von maximal 800 m über dem Meeresspiegel und einer Einbausituationen in einer Höhe von maximal 25 m über Oberkante Erdreich. Für Klebmittel, die in einem Bauteil verwendet werden, das von diesen Randbedingungen abweicht, sind die zu verwendenden Prüflasten entsprechend der vorhandenen Lage gemäß DIN EN 1991-1-4:2010-12 zu bestimmen.

7.2 Bestimmung des Winddrucks

Da die Windgeschwindigkeit üblicherweise in einer Höhe von 10 m über Grund in freiem Gelände gemessen wird, gehen in die Bestimmung des Winddrucks, der auf ein Bauteil oder ein Gebäude einwirkt, nach DIN EN 1991-1-4:2010-12 und DIN EN 1991-1-4/NA:2010-12 noch weitere Faktoren wie beispielsweise der aerodynamische Beiwert c_p ein. Für den Winddruck w_e auf die Außenseite eines Bauteils gilt:

$$w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe} \quad (4)$$

mit: $q_p(z_e)$: Höhenabhängiger Böenwindgeschwindigkeitsdruck

c_{pe} : Aerodynamischer Beiwert für den Außendruck

Zur Berücksichtigung der ungünstigsten Verhältnisse, die bei der Einwirkung von Wind auftreten können, wurde bei der Festlegung des aerodynamischen Beiwerts c_{pe} auf die Außenoberfläche eines Bauteils davon ausgegangen, dass die Richtung des Windes lotrecht auf das zu untersuchende Bauteil steht. Hieraus resultiert ein aerodynamischer Beiwert für den Außendruck von $c_{pe} = 1,0$.

7.2.1 Winddruck in der Ermüdungsprüfung

Verwendet man zur Berechnung des auf die Außenoberfläche eines Bauteils einwirkenden Winddrucks w_e nach Gleichung 4 den Basiswindgeschwindigkeitsdruck q_b aus DIN EN 1991-1-4/NA:2010-12 Bild NA:A.1 (siehe Tabelle 1 und Tabelle 2), dann erhält man für die Ermüdungsprüfung folgenden Wert:

$$w_{e,b} = 0,56 \cdot 1,0 = 0,56 \text{ kN/m}^2$$

7.2.2 Winddruck in der Prüfung der Böenlast

Analog zur Vorgehensweise in Kapitel 7.2.1 kann der Winddruck auf die Außenseite eines Bauteils zur Prüfung der Einwirkung von Böen nach Gleichung 4 unter Zuhilfenahme von DIN EN 1991-1-4/NA:2010-12 Tabelle NA.B.3 wie folgt berechnet werden:

$$w_{e,p} = 1,55 \cdot 1,0 = 1,55 \text{ kN/m}^2$$

8 Anteilige Lasteinwirkung auf Bauteil-Innenoberflächen aus Wind

Betrachtet man die Lasteinwirkung aus Wind auf die Außenoberfläche eines Bauteils dann stellt sich die Frage, ob – und wenn ja mit welcher Intensität – die außen anliegenden Windkräfte auf die Innenoberfläche einwirken. Die Annahme, dass Windböen die Außenwand oder Dachkonstruktion durchdringen, trifft in diesem Zusammenhang nicht zu. Moderne Dächer weisen in der Regel unter dem Dachdeckstoff eine Unterdeck-/Unterspannbahn auf, die dafür sorgt, dass eine Durchströmung des Dachaufbaus vermieden wird. Außerdem würde eine Durchströmung des Dachaufbaus oder einer Außenwand dazu führen, dass die im Dämmstoff eingelagerte (ruhende) Luft durch kalte Außenluft verdrängt wird, womit das Prinzip der Wärmedämmung nicht mehr funktionieren würde. Zum Verständnis des Problems, dass Kräfte die auf die Außenoberfläche eines Bauteils einwirken, bis zur inneren Schicht/Schale übertragen werden, sei hier auf die Analogie zum Schallschutz bzw. der Schallübertragung hingewiesen. Schall ist, vereinfacht formuliert, nichts anderes als eine Druckwelle, die sich in der Luft oder einem anderen Material ausbreitet. Betrachtet man jedoch einen Raum, der vollkommen luftdicht ist und der von außen beschallt wird, dann ist eine Ausbreitung des Schalldrucks über die Luft nicht möglich. Trotzdem sind – insbesondere bei leichten Bauteilen – die Geräusche von außen im Inneren zu hören. Auch in diesem Zusammenhang ist es so, dass eine Schalldruckwelle das Bauteil nicht durchdringt, sondern dass durch diese Einwirkung die verschiedenen Schichten eines Außenbauteils zum Schwingen angeregt werden und sich so die Druckwelle – in schwächer werdender Form – durch ein Bauteil hindurch fortpflanzt. Diesen Sachverhalt, der aus der Akustik bekannt ist, kann man auch auf Windkräfte übertragen, die auf die Außenoberflächen von Bauteilen einwirken. Wie eine Auswertung der Windgeschwindigkeiten über die Zeit zeigt, stellen Windlasten kein stationäres, sondern ein instationäres Phänomen dar; d. h., die Windgeschwindigkeit

ist eine zeitlich veränderliche Größe. Dabei ist es egal, ob es sich um ein laues Lüftchen oder um einen Sturm handelt. Ähnlich wie bei einer oszillierenden Schalldruckwelle schwillt somit auch der Winddruck auf eine Bauteilaußenoberfläche als Funktion der Zeit an und ab, woraus folgt, dass auch bei diesem Problem die Schichten eines Bauteils zum Schwingen angeregt werden und sich eine Druckwelle durch das Bauteil hindurch fortpflanzt. Aus einem Forschungsbericht des Fraunhofer-Instituts Holzkirchen [7] geht hervor, dass bei einer im Freilandversuch gemessenen Dachkonstruktion ca. 33 % der auf den Dachdeckstoff einwirkenden Windkräfte auch auf der Dampfsperrbahn zu verzeichnen waren. Da der Bericht auf Produkte und deren Eigenschaften verweist, ist er nach der Festlegung des Auftraggebers nicht öffentlich zugänglich. Um die für das Wechsellastverfahren relevanten Angaben aus diesem Bericht der Fachöffentlichkeit zugänglich zu machen, wurde mit Genehmigung der Fa. Weiss Chemie ein Auszug aus dem Untersuchungsbericht erstellt, der diesem Forschungsbericht als Anhang C beigelegt ist. Die Ermittlung der maßgeblichen Windkräfte erfolgte im Rahmen der Ausarbeitungen zu E DIN 4108-11 mit dem Ansatz, dass 33 % der auf die Außenoberfläche einwirkenden Kräfte auch die Dampfsperre belasten; d. h., zur Bestimmung der Kräfte aus Windeinwirkung, die auf die Bauteilschicht der luftundurchlässigen Hülle raumseitig eines Bauteils einwirken, sind die in Kapitel 7.2.1 und Kapitel 7.2.2 ermittelten Winddrücke mit einem Reduktionsfaktor $f_R = 0,33$ zu multiplizieren.

9 Grundlagen der Tragwerksplanung

9.1 Allgemeines

Die Entwicklung des Wechsellastverfahrens und des damit verbundenen Nachweises der Dauerhaftigkeit von Klebemitteln zielt auf die Planungs- und Nutzungssicherheit von Bauteilen und Gebäuden. Dementsprechend sind auch die allgemein anerkannten Regeln der Technik, in denen diese Probleme abgehandelt werden, auf das Prüfverfahren anzuwenden. Die Vorgehensweise, die bei der Planung von Bauteilen und Gebäuden anzuwenden ist, ist DIN EN 1990:2010-12, dem „Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung“, zu entnehmen. Diese Norm zielt darauf ab, Unwägbarkeiten, die die Planung eines Bauteils oder Gebäude beeinflussen, zu erfassen. Die Bestimmung der Lasten bzw. der einzuhaltenden Grenzwerte ist in den Eurocodes 1 bis 9 (DIN EN 1991 bis DIN EN 1999) geregelt.

Für die beim Wechsellastverfahren maßgebenden Windkräfte wurde diese Analyse bereits in den voranstehenden Kapiteln durchgeführt.

Vor der Anwendung des Eurocodes: Grundlagen der Tragwerksplanung ist jedoch die Frage zu klären, ob es sich bei dem zu betrachtenden Problem um einen

- Nachweis des Grenzzustandes der Tragfähigkeit oder um einen
- Nachweis des Grenzzustandes der Gebrauchstauglichkeit handelt.

Der Grenzzustand der Tragfähigkeit zielt auf die Anforderungen in der Musterbauordnung der Bundesländer ab, wo es in § 3 Absatz 1 heißt: „Anlagen sind so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und instand zu halten, dass die öffentliche Sicherheit und Ordnung, insbesondere Leben, Gesundheit und die natürlichen Lebensgrundlagen, nicht gefährdet werden“; d. h. wenn handelt es sich bei einem Nachweisverfahren um ein Problem handelt, das

- die Sicherheit von Personen und/oder
- die Sicherheit des Tragwerks betrifft,

dann gelten die Grenzzustände der Tragfähigkeit.

Wirken sich die Ergebnisse des Nachweise dagegen auf

- die Funktion des Tragwerks oder eines seiner Teile unter normalen Gebrauchsbedingungen oder
- das Wohlbefinden der Nutzer oder
- das Erscheinungsbild des Bauwerks

aus, dann sind diese als Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit einzustufen.

Die Dauerhaftigkeit – das Ziel des Wechsellastverfahrens – kann als Kriterium zur Klärung der Frage, ob es sich um ein Problem der Tragfähigkeit oder Gebrauchstauglichkeit handelt, nicht herangezogen werden, da der Nachweis der Dauerhaftigkeit in beiden Fällen auftreten kann. Wie in Kapitel 3 dargelegt, können alternierende Lasten beispielsweise bei Stahlverbindungen zu einem Versagen der Konstruktion führen, bevor die Fließgrenze des Materials erreicht wurde. Es handelt sich also um eine Frage der Tragfähigkeit. Sollte dagegen die Klebeverbindung der luftundurchlässigen Hülle versagen, ist damit nur indirekt eine Beeinträchtigung der Nutzer verbunden. Falls durch offene Klebenähte warme und feuchte Raumluft ins Inne-

re eines Bauteils gelangt, dann kann es dort zum Tauwasserausfall kommen. Die damit verbundene Durchfeuchtung von Dämmstoffen verursacht eine verminderte Dämmwirkung, die wiederum zur Bildung von Schimmelpilzen auf Bauteil-Innenoberflächen führen kann. Gleichzeitig kann es durch das ausfallende Tauwasser auch zur Fäulnis von Holzbauteilen bzw. zur Korrosion von Metallelementen – und damit zu einer Beeinträchtigung der Tragfähigkeit – kommen, jedoch sind sowohl die Schimmelpilzbildung als auch die verminderte Tragfähigkeit Ereignisse, die sich nur schleichend entwickeln und damit nicht zu einem plötzlichen Versagen des Bauteils oder Gebäudes führen.

Unter Berücksichtigung dieser Aspekte beziehen sich die Prüfungen beim Wechsel- lastverfahren zum Nachweis der Dauerhaftigkeit von Klebemitteln nach E DIN 4108-11 auf die Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit.

9,2 Nachweise für Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit

Gemäß DIN EN 1990:2010-12 ist bei den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit nachzuweisen, dass gilt:

$$E_d \leq C_d \quad (5)$$

Dabei ist:

C_d der Bemessungswert der Grenze für das maßgebende Gebrauchstauglichkeitskriterium

E_d der Bemessungswert der Auswirkung der Einwirkungen in der Dimension des Gebrauchstauglichkeitskriteriums aufgrund der maßgebenden Einwirkungskombination

9.3 Bemessungswerte der Einwirkung

Um den Bemessungswert der Auswirkung der Einwirkung E_d berechnen zu können, muss zunächst festgelegt werden, wie der Bemessungswert der Einwirkung F_d zu bestimmen ist. Gemäß DIN EN 1990:2010-12 Abschnitt 6.3.1 wird der Bemessungswert F_d einer Einwirkung F wie folgt berechnet:

$$F_d = \gamma_f \cdot F_{rep} \quad (6)$$

mit $F_{rep} = \psi \cdot F_k \quad (7)$

F_k	Charakteristischer Wert der Einwirkung
F_{rep}	Maßgeblicher repräsentativer Wert der Einwirkung
γ_f	Teilsicherheitsbeiwert für Einwirkungen, der die Möglichkeit einer ungünstigen Abweichung der Einwirkungen gegenüber den repräsentativen Werten berücksichtigt
ψ	Entweder der Wert 1,00 oder ψ_0 , ψ_1 oder ψ_2

Da die Einwirkung, also der Winddruck w_e , gemäß den statistischen Vorgaben von DIN 1991-1-4:2010-12 und DIN EN 1991-1-4/NA:2010-12 ermittelt wurde, ist nicht mit einer ungünstigen Abweichung der Einwirkungen gegenüber den repräsentativen Werten zu rechnen. Der Teilsicherheitsbeiwert γ_f wird daher mit 1,0 angesetzt. Auch für den Teilsicherheitsbeiwert ψ gilt ein Wert von 1,0. Daraus folgt, dass der Bemessungswert F_d gleich dem charakteristischen Wert der Einwirkung F_k ist.

9.3.1 Bemessungswerte der Einwirkung $F_{d,b}$ bei der Ermüdungsprüfung

Der Bemessungswert der Einwirkung setzt sich im Fall des Wechsellastverfahrens bei der Prüfung des Ermüdungsversagens von Klebemitten in der luftundurchlässigen Gebäudehülle aus dem Produkt des Winddrucks w_e nach Kapitel 7.2.1 und dem Reduktionsfaktor f_R zur Berücksichtigung der Abminderung des Winddrucks durch ein Bauteil nach Kapitel 8 zusammen. Es gilt:

$$F_{d,b} = w_e \cdot f_R = 0,56 \cdot 0,33 = 0,18667 \text{ kN/m}^2 \quad (8)$$

9.3.2 Bemessungswerte der Einwirkung $F_{d,p}$ bei Böenbelastung

Analog zur Bestimmung des Bemessungswertes der Einwirkung bei der Ermüdungsprüfung wird auch der Bemessungswert der Einwirkung bei der Böenbelastung aus dem Winddruck w_e , in diesem Fall jedoch nach Kapitel 7.2.2, und dem Reduktionsfaktor f_R nach Kapitel 8 wie folgt berechnet:

$$F_{d,p} = w_{e,p} \cdot f_R = 1,55 \cdot 0,33 = 0,51667 \text{ kN/m}^2 \quad (9)$$

9.4 Bemessungswert E_d der Auswirkungen von Einwirkungen

9.4.1 Allgemein

Neben einer Analyse der Frage, welche Einwirkungen bei einem Bauteil oder Gebäude anzusetzen sind, ist auch dem Problem nachzugehen, welche „Reaktionen“, z. B. als Normalkräfte, Querkräfte, Scherkräfte oder Momente, diese Einwirkungen hervorrufen. Neben dem Bemessungswert der Einwirkungen F_d fließen in diese Betrachtungen auch weitere Unwägbarkeiten in Form von Teilsicherheitsbeiwerten ein.

9.4.2 Bemessungswert E_d der Auswirkungen von Einwirkungen für einen bestimmten Lastfall

Für einen bestimmten Lastfall können die Bemessungswerte der Auswirkung E_d von Einwirkungen allgemein, d. h. unabhängig vom Sicherheitskonzept – also von der Frage, ob die Tragfähigkeit oder die Gebrauchstauglichkeit untersucht wird – nach DIN EN 1990:2010-12 mit folgendem rechnerischen Ansatz bestimmt werden:

$$E_d = E \{ \gamma_{sd} \cdot \gamma_{f,i} \cdot F_{rep,i}; a_d \} \quad (10)$$

mit:

- γ_f : Teilsicherheitsbeiwert für Einwirkungen, der die Möglichkeit einer ungünstigen Abweichung der Einwirkungen gegenüber den repräsentativen Werten berücksichtigt
- γ_{sd} Teilsicherheitsbeiwert zur Berücksichtigung von Unsicherheiten:
 - im Berechnungsmodell der Auswirkungen
 - im Berechnungsmodell der Einwirkungen
- F_{rep} Maßgeblicher repräsentativer Wert der Einwirkung
- a_d Bemessungswerte der geometrischen Größen

Geometrische Abweichungen, z. B. durch Imperfektion von Bauteilen oder Auflagerpunkten, können im vorliegenden Fall ausgeschlossen werden. Für a_d ist daher ein Wert von 1,0 anzusetzen. Angaben zum maßgeblichen repräsentativen Wert der Einwirkung F_{rep} sind Kapitel 9.3 zu entnehmen. In diesem Kapitel wird ebenfalls dargestellt, dass und warum γ_f , der Teilsicherheitsbeiwert für die Einwirkung, der die Möglichkeit ungünstiger Größenabweichungen der Einwirkung berücksichtigt, beim

Wechselastverfahren mit einem Wert von 1,0 angesetzt wird. Wie den folgenden Kapiteln zu entnehmen ist, wurden beim Wechselastverfahren zur Analyse von Auswirkungen keine Modelle entwickelt. Die Prüfungen erfolgen im vorliegenden Fall auf rein empirischer Basis. Hinsichtlich der Einwirkungen wurde, wie bereits ausgeführt, auf die Berechnungsmodelle aus DIN EN 1991-1-4:2010-12 und DIN EN 1991-1-4/NA:2010-12 zurückgegriffen. Auch hier ist nicht mit Unsicherheiten bei den Berechnungsmodellen zu rechnen. Für den Teilsicherheitsbeiwert γ_{sd} wird daher im Nachweisverfahren der Wechselasten ein Wert von 1,0 angesetzt.

9.4.3 Bemessungswert E_d der Auswirkungen von Einwirkungen für Lastkombinationen

Beim Nachweis von Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit, die sich auf die Auswirkung aus der Kombination von Einwirkungen beziehen, gelten für E_d die Ansätze aus DIN EN 1990:2010-12 Abschnitt 6.5.3. Zur Beurteilung von Einwirkungen, die zu einer nicht umkehrbaren Auswirkung am Tragwerk führen, wird die charakteristische Kombination herangezogen. Es gilt:

$$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P_k + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (11)$$

mit

- G_k Charakteristischer Wert einer ständigen Einwirkung
- P_k Charakteristischer Wert einer Vorspannkraft
- Q_{k1} Charakteristischer Wert einer maßgebenden veränderlichen Einwirkung
- $Q_{k,j}$ Charakteristischer Wert einer nicht maßgebenden veränderlichen Einwirkung j (Begleiteinwirkung)

Bereits in Kapitel 4 wurde darauf hingewiesen, dass beim Wechselastverfahren weder das Gewicht der luftundurchlässigen Schicht, z. B. einer Folie, noch das Gewicht von darauf aufliegenden Dämmstoffen berücksichtigt wird. Ständige Einwirkungen G_k können daher ausgeschlossen werden. Vorspannungen sind im vorliegenden Fall ebenfalls nicht gegeben, sodass auch diese Einwirkung entfällt. Das Vorhandensein von nicht maßgebenden veränderlichen Einwirkungen, sogenannten Begleiteinwirkungen, kann ebenfalls ausgeschlossen werden. Damit entfällt auch $Q_{k,j}$.

Hinsichtlich der zu verwendenden Teilsicherheitsbeiwerte beim Nachweis der Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit aus Lastkombinationen enthält die Anmerkung

in DIN EN 1990:2010-12 Abschnitt 6.5.3 Absatz (2) die Festlegung, dass alle Teilsicherheitsbeiwerte zu 1,0 angenommen werden.

10 Bemessungswert C_d für das Gebrauchstauglichkeitskriterium

Bei der Festlegung eines Bemessungswertes des Gebrauchstauglichkeitskriteriums C_d stellt sich im beim Wechsellastverfahren das Problem, dass es sich bei der Prüfung der Dauerhaftigkeit von Klebmitteln um das Versagen durch Ermüdung bei alternierenden Lasten handelt und dass diese Problemstellung in DIN EN 1990:2010-12 nicht explizit erfasst ist. Während für die Auswirkung der Einwirkungen – also der Aktionsseite – auf die europäisch harmonisierte Norm zurückgegriffen werden kann, ist es bei der Festlegung des Gebrauchstauglichkeitskriteriums, d. h. auf der Reaktionsseite, zwar möglich, auf Teile aus dieser Norm zurückzugreifen, normativ nicht geregelte Punkte müssen jedoch durch eigene Festlegungen und Prüfmethoden ergänzt werden.

Wie bei vielen Problemen – auch im Bereich des Bauingenieurwesens –, bei denen es um instationäre Einwirkungen geht, ist es nicht oder nur schwer möglich, Anforderungen (Gebrauchstauglichkeitskriterien) festzulegen. Die klassische Nachweismethode geht von stationären Randbedingungen aus, für die ein Einzelwert als Anforderung definiert werden kann. Bei vielen instationären Problemen kommt eine Lösung dadurch zustande, dass Modelle entwickelt werden, mit deren Hilfe instationäre Vorgänge in stationäre umgewandelt werden und so durch eine „Abschätzung auf der sicheren Seite“ ein Grenzwert definiert wird.

Bei der Prüfung der Dauerhaftigkeit von Klebmitteln wurde mit dem Wechsellastverfahren ein anderer Weg eingeschlagen. Mit Hilfe dieses Verfahrens und der solcherart simulierten Windeinwirkung während einer Nutzungsdauer von 50 Jahren soll untersucht werden, ob Klebmittel während dieses Zeitraums tauglich sind. Eine Einzahlangabe, mit der nachgewiesen werden kann, ob die Klebmittel bestimmungsgemäß funktionieren, gibt es aufgrund der instationären Lasteinwirkung nicht. Es wurde daher – einmal mehr – ein Modell geschaffen, mit dessen Hilfe Lasteinwirkungen und die daraus resultierenden Reaktionen, die sich über einen sehr langen Zeitraum erstrecken, quasi im Zeitraffer simuliert werden sollen. Anders als bei stationären Prüfungen, bei denen den Auswirkungen aus Einwirkungen eine zulässige Größe auf der Materialseite – das Gebrauchstauglichkeitskriterium, z. B. als zulässige Spannung, Schiefstellung o. Ä. – gegenübersteht, weist die Prüfung nach

dem Wechsellastverfahren am Ende nur ein Ergebnis auf: Das Klebemittel hat die Prüfung bestanden, d. h., die geprüfte Klebeverbindung genügt dem Kriterium, dauerhaft luftundurchlässig zu sein, oder die Probe hat versagt und eine Luftundurchlässigkeit ist nicht mehr gegeben. Nach Art des Binärcodes gibt es also nur 1 oder 0. Trotzdem sind auch Bestandteile aus DIN EN 1990:2010-12 auf der Seite des Gebrauchstauglichkeitskriteriums zu berücksichtigen. Bezieht sich die Norm auf Baustoffe oder auf Bauteile aus mehreren Baustoffen, dann kommt folgender Ansatz zum Tragen:

$$X_d = \eta \cdot \frac{X_k}{\gamma_m} \quad (12)$$

Dabei bedeutet:

X_k Charakteristischer Wert einer Baustoff- oder Produkteigenschaft

η Umrechnungsbeiwert zwischen Probeneigenschaften und maßgebenden Eigenschaften im Bauteil, der die Auswirkung von

- Volumen- und Maßstabeffekten,
- Feuchtigkeits- und Temperatureinflüssen und
- anderen maßgebenden Parameter im Mittel berücksichtigt

γ_m Teilsicherheitsbeiwert für die Baustoff- oder Produkteigenschaft, der Folgendes abdeckt:

- Möglichkeit ungünstiger Abweichungen der Baustoff- oder Produkteigenschaft vom charakteristischen Wert,
- Streuung des Umrechnungsbeiwertes η

Während in DIN EN 1990:2010-12 Abschnitt 6.5.4 zwar festgelegt ist, dass für Gebrauchstauglichkeitsnachweise die Teilsicherheitsbeiwerte γ_M bei Baustoff-, Bauprodukt- und Bauteileigenschaften mit 1,0 anzunehmen sind, bleibt die Einstufung des Umrechnungsbeiwertes η offen. Ähnlich wie bei der Untersuchung anderer Materialproben ist auch bei der Prüfung der Dauerhaftigkeit von Klebemitteln durch das Wechsellastverfahren zu beachten, dass die dabei vorhandenen Laborbedingungen von den realen Verhältnissen deutlich abweichen. Während die Prüfungen im Labor unter klar festgelegten Vorgaben hinsichtlich der Temperatur und relativen Feuchte durchgeführt werden, sind die Einbaubedingungen auf Baustellen den tagesaktuellen Werten unterworfen. Auch die im Labor praktizierte Sauberkeit und die Anforderungen an die Probenherstellung entsprechen nicht den Bedingungen in der Wirklichkeit.

Da solche Abweichungen zwischen Labor- und Baustellenbedingungen die Verlässlichkeit der Prüfung hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit in die Realität einschränken, sind diese Aspekte bei der Wahl von Teilsicherheitswerten bzw. im vorliegenden Fall bei der Wahl des Umrechnungsfaktors η , zu berücksichtigen. Durch den Umrechnungsfaktor η ist also entweder der Bemessungswert C_d der Gebrauchstauglichkeit zu vermindern oder die Einwirkungen E_d auf die Auswirkungen sind zu erhöhen. Da es, wie oben ausgeführt, beim Wechsellastverfahren keinen Bemessungswert C_d der Gebrauchstauglichkeit gibt, wird der Umrechnungsfaktor η zur Erhöhung der Einwirkungen auf die Auswirkung verwendet. Aus der Erfahrung und aus dem Vergleich mit anderen normativen Festlegungen wird η als Faktor bei den Einwirkungen auf die Auswirkung mit einem Wert von $\eta = 1,20$ abgeschätzt.

Während sich jedoch die bisherigen in DIN 1990:2010-12 aufgeführten Teilsicherheitsbeiwerte γ auf die Einwirkungen bezogen, zielt der Umrechnungsfaktor η bei der Gebrauchstauglichkeit auf die „Materialseite“ ab. η wird daher nicht bei den auf die Außenoberflächen eines Bauteils oder einer Baukonstruktion anzusetzenden Lasten, d. h. dem Winddruck, in Ansatz gebracht, sondern erst bei der Festlegung der Kräfte, die auf die Klebeverbindungen, also auf die Klebemittel, einwirken.

11 Einwirkungen auf Klebeverbindungen

11.1 Allgemeines

Die Ausführungen der vorstehenden Kapitel bezogen sich jeweils auf die Darstellung von Auswirkungen der Einwirkungen bei flächigen Lasten. Beim anstehenden Problem, der Dauerhaftigkeit von Klebemitteln, erfolgt zwar der Lasteintrag über die Fläche der luftundurchlässigen Bauteilschichten, die Kraftübertragung zwischen den einzelnen Teilabschnitten dieser Elemente, z. B. zwischen einzelnen Folienbahnen, findet jedoch über die Klebemittel statt. Diese werden entlang der zu verbindenden Ränder angeordnet. Bei Klebebändern erfolgt die Verklebung über Materialien mit einer definierten Dicke und Breite, bei Klebmassen ist dagegen die Dicke und Breite des Klebematerials im Baustellenbetrieb abhängig von der Menge, die aufgetragen wurde, und dem Anpressdruck, mit dem die beiden Elemente verbunden werden. Trotzdem liegt bei beiden Materialgruppen gleichermaßen der Sachverhalt vor, dass Kräfte aus einer Flächenbelastung über linienförmige Verbindungsstellen übertragen werden.

11.2 Statisches System

Wie bereits zu Beginn dargestellt, ist das Problem der Luftundurchlässigkeit bei massiven Konstruktionen in der Fläche von untergeordneter Bedeutung. Hier stellen Anschlüsse, z. B. von Fenstern an die massive Laibung, das entscheidende Problem dar. Demgegenüber ist die luftundurchlässige Ausführung bei leichten Konstruktionen, wie etwa Holzständerbauweisen oder Dächern, auch in der Fläche zu beachten und wurde als Basis für die folgenden Ausarbeitungen verwendet. Um die Krafteinleitung aus Flächenlasten in die linienförmige Anordnung der Klebemittel analysieren zu können, beziehen sich die weiteren Betrachtungen auf den Fall zweier parallel verlaufender Auflager, z. B. zwei Sparren, und einer darauf angeordneten Flächenabdeckung, beispielsweise einer Folie. Es wird davon ausgegangen, dass die Folie über den Auflagern (Langseite) eingespannt, an den kurzen Seiten jedoch nicht fixiert ist bzw. durch eine sogenannte Schlaufenbildung über soviel Spielraum verfügt, dass keine Krafteinleitung erfolgt. Die Ausbildung einer Schlaufe, etwa an First und Traufe als Materialreserve, erfolgt analog zu DIN 4108-7 [8].

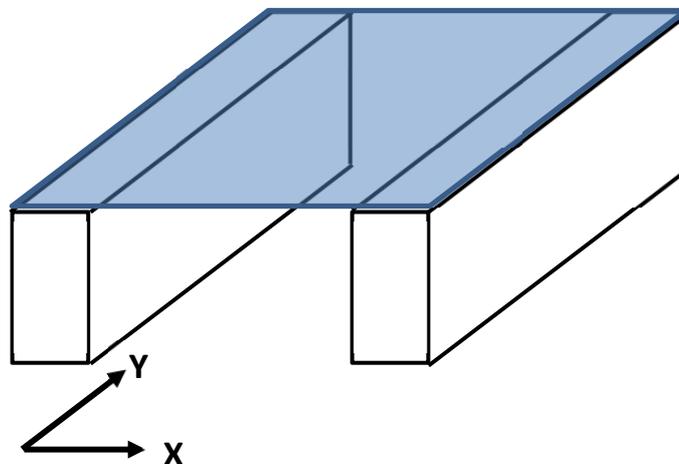


Bild 1: Systemdarstellung der Auflagerung

Als Flächenlast wurde bei der Untersuchung des Ermüdungsversagens der Bemessungswert der Einwirkung $F_{d,b}$ aus Kapitel 9.3.1 und bei den Auswirkungen aus Böen der Bemessungswert der Einwirkung $F_{d,p}$ aus Kapitel 9.3.2 angesetzt. Nach Abstimmung mit dem Zentralverband des Deutschen Dachdeckerhandwerks kann der lichte Auflager(sparren)abstand im Mittel mit $e = 0,80$ m angesetzt werden. Dies entspricht einem in der Bundesrepublik weit verbreiteten Maß für lichte Sparrenabstände. Je nach Region kann dieser Wert jedoch zwischen $e = 0,70$ m und $e = 1,0$ m schwan-

ken. Da das betrachtete Folienmaterial keine Steifigkeit wie z. B. eine (Stahlbeton-)Platte aufweist, können die Kräfte in der Folie analog den Betrachtungen der Kräfte in einem Seil ermittelt werden. Die Kraft im Seil ergibt sich aus der Auflagerkraft A und dem Winkel α der Tangenten an das Seil im Auflagerpunkt. Vereinfachend kann der Winkel α aus dem halben lichten Abstand der Auflager und dem doppelten Betrag des Durchhangs berechnet werden. Die Kraft im Seil kann daher wie folgt berechnet werden:

$$S = \frac{A}{\sin \alpha} \quad (12)$$

$$\tan \alpha = \frac{2 \cdot h}{e/2} \quad (13)$$

Die einzige unbekannte Größe in dieser Betrachtung ist somit der Durchhang der Folie in Feldmitte.

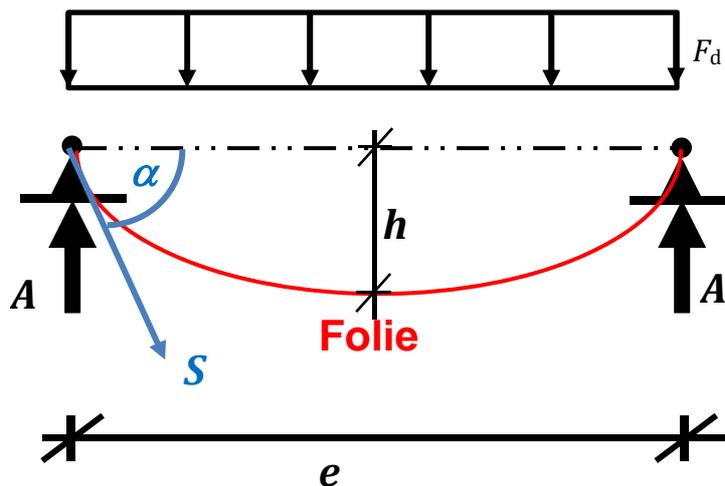


Bild 2: Systemdarstellung zur Seilkraftermittlung

Da es sich bei einer Folie im Gegensatz zu einem Seil um ein dreidimensionales Problem handelt, erfolgte die Berechnung des Durchhangs der Folie in Feldmitte (Feldmitte sowohl in X- als auch in Y-Richtung) mittels eines Programms der Finiten-Elemente. Angewendet wurde das Programm RFEM der Firma Dlubal.

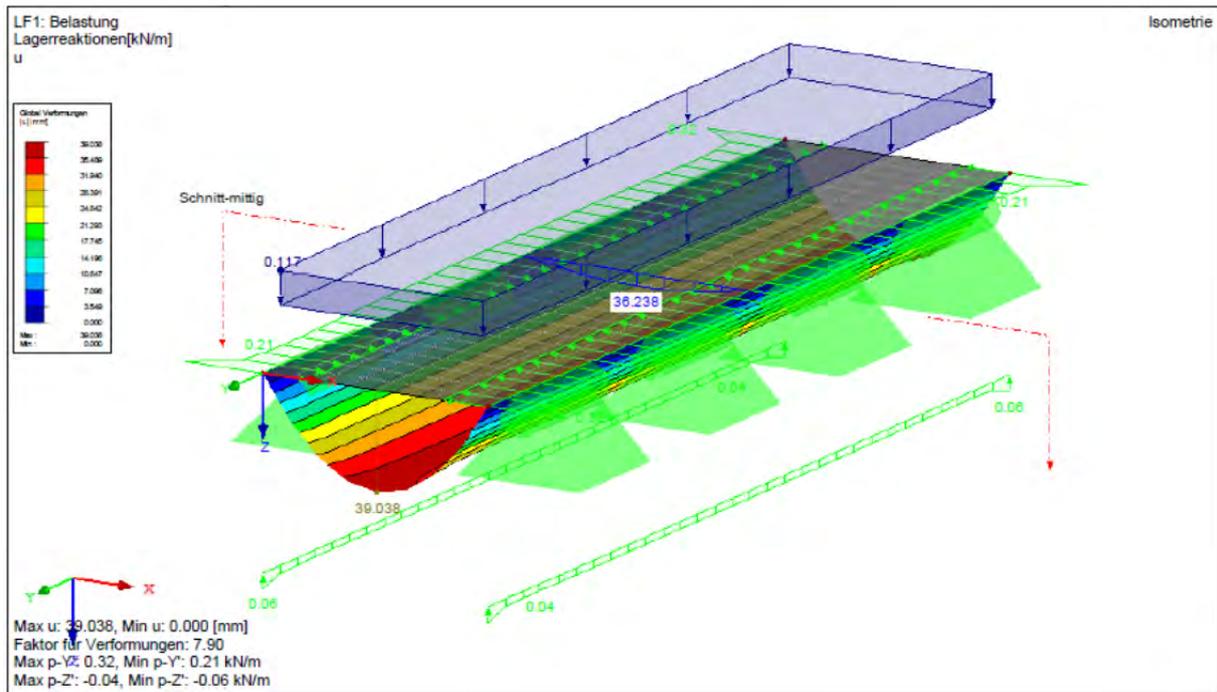


Bild 3: Auszug aus den Berechnungen mit einem FEM-Programm

11.3 Folieneigenschaften

Neben den einwirkenden Lasten stellt der Elastizitätsmodul (E -Modul) der Folie eine der wesentlichen Einflussgrößen bei der Berechnung des Durchhangs dar. In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass der E -Modul von Kunststofffolien innerhalb einer sehr großen Bandbreite schwanken kann. Zu unterscheiden ist, dass

- verschiedene Folienmaterialien zum Einsatz kommen,
- die Angaben zum E -Modul in den einzelnen Materialgruppen starken Schwankungen unterliegen,
- bei einem bestimmten Material die Werte von Proben einer einzelnen Rolle (ein Herstellungszyklus) deutlich von einander abweichen können,
- es sich bei den Folien um anisotrope Werkstoffe mit unterschiedlichen Stoffkennwerten in X- und Y-Richtung handelt.

Als Materialien für luftundurchlässige Schichten kommen Folien aus

- PA (Polyamid),
- PET (Polyethylenterephthalat),
- PP (Polypropylen),
- PE (Polyethylen),

infrage, wobei innerhalb der Materialgruppen weitere Spezifizierungen vorkommen. Erschwerend kommt außerdem hinzu, dass die Angaben zum *E*-Modul auch innerhalb der einzelnen Materialgruppen – je nach Fundstelle – stark schwanken können. Eine Zusammenstellung von *E*-Modulen unterschiedlicher Folien und aus unterschiedlichen Fundstellen – die jedoch nicht den Anspruch auf Vollständigkeit erhebt – ist Tabelle 4 zu entnehmen.

Tabelle 4: Übersicht von *E*-Modulen unterschiedlicher Materialien und Fundstellen

Material	<i>E</i> -Modul [N/mm ²]	
	Fundstelle 1	Fundstelle 2
PA	600 - 2800	460 - 700
PET	2100 - 3500	2750 - 3750
PP	1300 - 1800	-
PEHD (hohe Dichte)	600 - 1400	-
PELD (geringe Dichte)	200 - 400	280 - 490

Wie die Auswertung von Messungen zum *E*-Modul an vier verschiedenen Folien eines namhaften Herstellers zeigte, schwanken – herstellungsbedingt – nicht nur die *E*-Module in den einzelnen Materialgruppen, sondern – aufgrund der Anisotropie – auch bei einer Prüfung in X- und Y-Richtung. Der in Tabelle 5 dargestellten Analyse lagen vier Folien mit jeweils fünf Proben für jede Richtung zugrunde. Bei den einzelnen Folien wurden die Proben der gleichen Rolle entnommen, sie stammten also aus der gleichen Charge, d. h. dem gleichen Herstellungszyklus.

Tabelle 5: Abweichungen des *E*-Moduls bei gleichen Folien

	Folienrichtung					
	Längs			Quer		
	min <i>E</i> [N/mm ²]	max <i>E</i> [N/mm ²]	Abweichung [%]	min <i>E</i> [N/mm ²]	max <i>E</i> [N/mm ²]	Abweichung [%]
Folie 1	187	382	51	217	444	51
Folie 2	247	344	28	301	377	20
Folie 3	181	355	49	218	375	42
Folie 4	476	538	12	370	555	33

Kombiniert man die Schwankungsbreite des E -Moduls unterschiedlicher Materialien mit den richtungsabhängigen Unterschieden und den Abweichungen, die sich aus dem Herstellungsprozess ergeben, dann wird deutlich, dass auch bei der Berechnung des Durchhangs eine große Streubreite der Ergebnisse zu erwarten ist. Für die Berechnung des Durchhangs der Folien ergibt sich aus dem Umstand, dass zwischen dem E -Modul und der Foliendicke ein Zusammenhang besteht, eine gewisse Entschärfung dieser Unsicherheit. Bei den meisten Folien ist festzustellen, dass Produkte mit einem vergleichsweise hohen E -Modul eine geringere Dicke aufweisen als Folien mit einem niedrigeren E -Modul; d. h., das Produkt aus E -Modul und Dicke, das auch in die Berechnung des Durchhangs eingeht, liegt innerhalb eines vergleichbar kleinen Bereichs.

11.4 Ermittlung der Lasten in der Simulation

Aus den Ergebnissen von Kapitel 10 und Kapitel 11.2 können nunmehr die für die Simulation maßgeblichen Lasteinwirkungen bestimmt werden. Wie in den Bildern 1 und 3 dargestellt, handelt es sich bei der Windlast um eine Flächenlast und bei der Last, die an den Stößen der luftdichten Schicht auf die Klebemittel wirkt, um eine Linienlast. Da die Länge der Klebeverbindungen, die zur Lastübertragung dient, sehr unterschiedlich sein kann und größere Längen labortechnisch nicht zu realisieren sind, wurde für die Simulation der Lasteinwirkung beim Wechsellastverfahren eine standardisierte Breite von 25 mm gewählt. Die mittels der Finite-Element-Methode berechneten Auflagerkräfte A , deren Werte in kN/m angegeben werden, sind somit auf eine Probenbreite von 25 mm (entspricht 0,025 m) umzurechnen. Außerdem müssen die Angaben der Seilkräfte, die in der Einheit kN angegeben werden, in die Einheit g umgewandelt werden. Darüber hinaus sind die resultierenden Kräfte im Seil – gemäß Kapitel 10 – zur Berücksichtigung der Unterschiede zwischen der Situation im Labor und der Situation auf der Baustelle mit einem Sicherheitszuschlag von 20 % zu beaufschlagen, d. h., die aus den Seilkräften zu berechnenden Prüflasten werden um einen Faktor 1,20 erhöht. Die Prüflast S_p in g wird beim Wechsellastverfahren somit aus der Seilkraft S nach Gleichung 12 wie folgt berechnet:

$$S_p = S \cdot 0,025 \cdot 1000 \cdot 100 \cdot 1,20 \quad [g] \quad (14)$$

11.5 Parameterstudie zur Abschätzung der Prüflast S_P

Um eine Aussage über die Wirkung unterschiedlicher E -Module der Folie und unterschiedlicher Abstände e der Auflager auf den Durchhang von Folien unter Flächenlasten und damit auf die Prüflast S_P machen zu können, wurde eine Parameterstudie mit diesen beiden Faktoren durchgeführt. Der E -Modul wurde dabei in den Grenzen zwischen 50 N/mm² und 500 N/mm² in Schritten von 50 N/mm² erhöht. Ergänzend erfolgte die Berechnung mit E -Modulen von 1000 N/mm² und 2000 N/mm². Hinsichtlich des Auflagerabstandes begannen die Berechnungen bei $e = 0,50$ m und wurden in einer Schrittweite von $\Delta e = 0,05$ m bis zu einem Maximalwert von $e = 1,0$ m ausgedehnt. Als Flächenlasten wurde bei der Ermüdung die Einwirkung $F_{d,b}$ und bei der Einwirkung aus Böen die Einwirkung $F_{d,p}$ angesetzt.

11.5.1 Berechnungen mit isotropen Folien

Um die wesentlichen Auswirkungen unterschiedlicher E -Module auf den Durchhang h und die Prüflast S_P aufzuzeigen, wurde zunächst davon ausgegangen, dass der E -Modul der Folien in X- und Y-Richtung jeweils gleich ist, d. h., den Untersuchungen lag die Annahme zugrunde, dass es sich um isotrope Materialien handelt. Die Ergebnisse zum Durchhang h und den Prüflasten S_P , die sich aus den Simulationen ergaben, sind in Anhang B zusammengestellt. Die Bilder 4 und 5 zeigen – exemplarisch für einen Auflagerabstand von $e = 0,75$ m –, wie sich die Modifizierung des E -Moduls auf den Durchhang und damit die Prüflast S_P auswirkt. In Bild 4 ist der Zusammenhang zwischen E -Modul und Durchhang, in Bild 5 der Zusammenhang zwischen E -Modul und Prüflast S_P dargestellt. In beiden Bildern ist jeweils die Auswirkung aus dem Bemessungswert der Einwirkung $F_{d,b}$ bei der Ermüdung und dem Bemessungswert der Einwirkung $F_{d,p}$ bei der Untersuchung von Böenlasten dargestellt. Wie zu erwarten war, ist der Durchhang bei „weichen“ Folien, d. h. bei Folien mit einem niedrigen E -Modul groß, und bei „steifen“ Folien, also Folien mit einem hohen E -Modul, gering. Aus dem Zusammenhang zwischen der Seilkraft S und dem Durchhang h gemäß den Gleichungen 12 und 13 wird deutlich, dass bei einem großen Durchhang geringe Seilkräfte wirken und bei straff gespannten Folien, also bei Folien mit einem geringen Durchhang, vergleichsweise hohe Seilkräfte zu verzeichnen sind. In Bild 4 ist zu sehen, dass – bei gleich bleibender Belastung – der Durchhang h zunächst hoch ist, die Neigung der Kurve ab einem E -Modul von ca. 500 N/mm² sich jedoch deutlich abflacht. Dazu passen auch die Kurvenverläufe in Bild 5. Während bei einem

kleinen E-Modul nur geringe Prüflasten auftreten, steigen diese anfänglich stark an, um dann – ab den bereits zitierten 500 N/mm² – wesentlich langsamer anzusteigen.

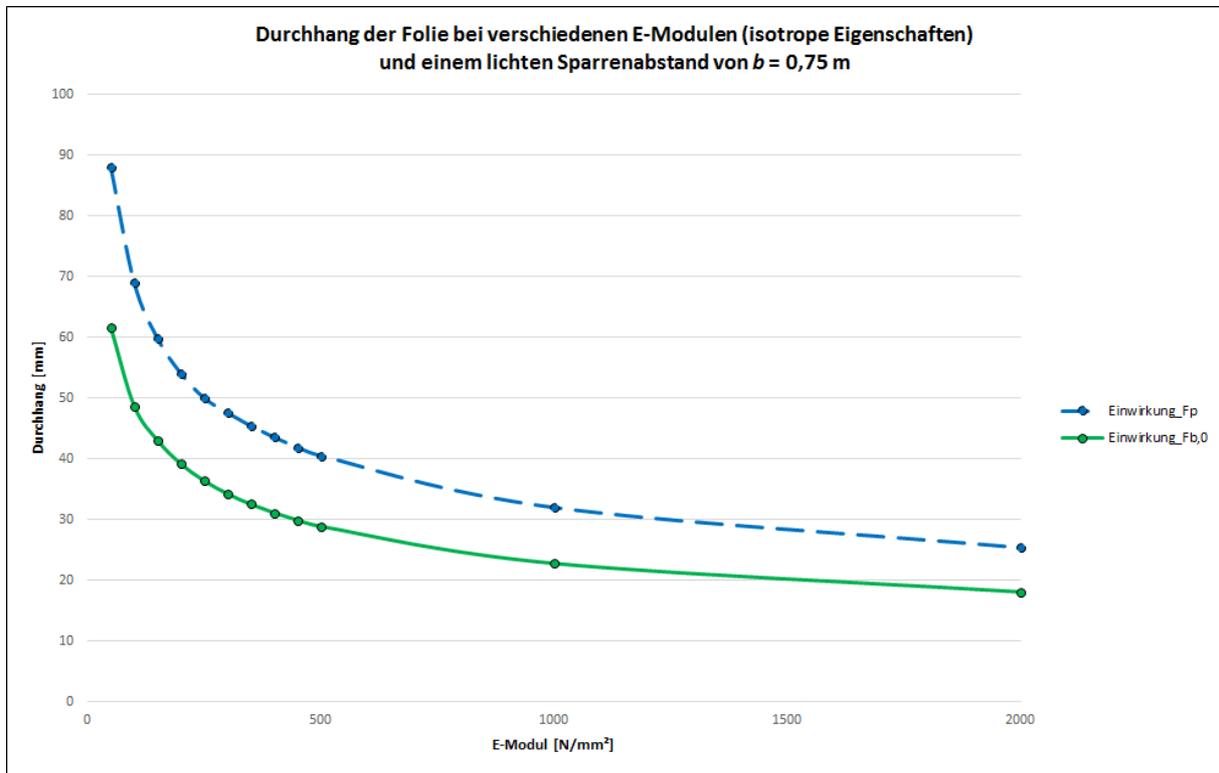


Bild 4: Darstellung des Durchhangs h in Abhängigkeit vom E-Modul der Folie

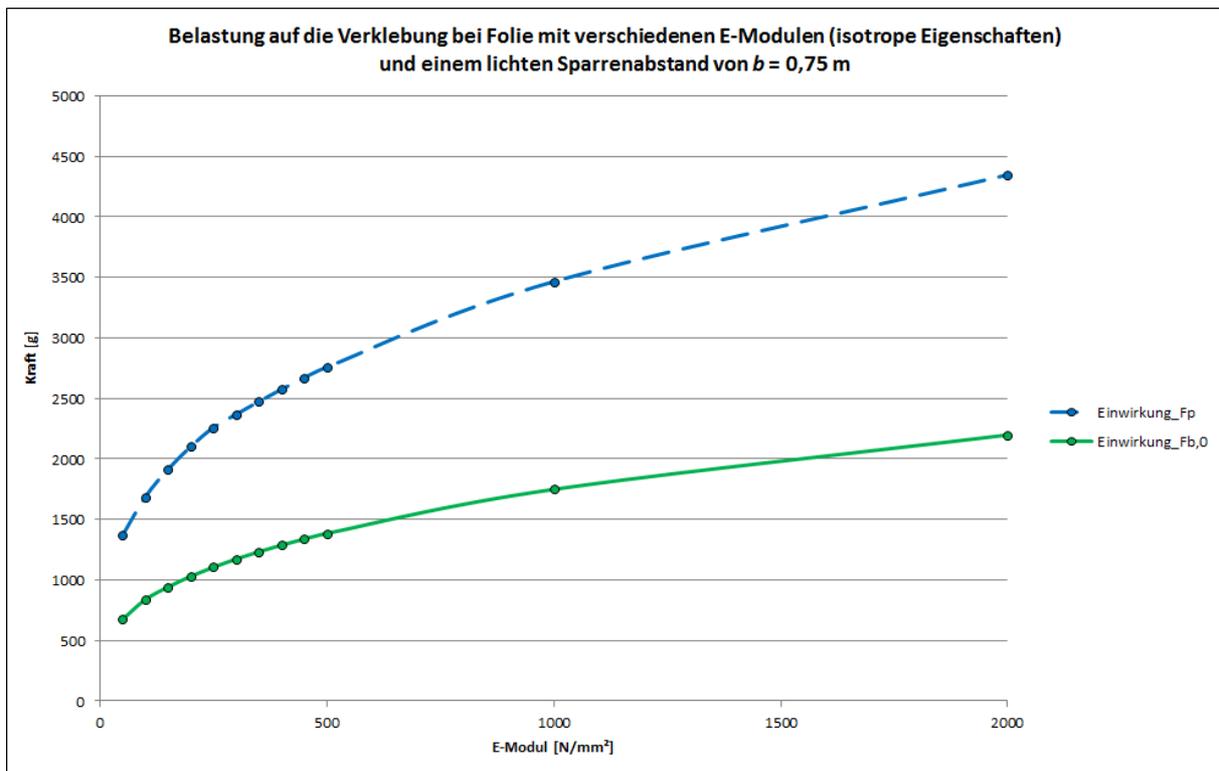


Bild 5: Darstellung der Prüflast S_P in Abhängigkeit vom E-Modul der Folie

Fasst man die Bandbreite, die sich aus den verschiedenen Einflussgrößen ergibt, zusammen, so erhält man aus den vorliegenden Untersuchungen und Berechnungen folgende Werte der Prüflasten S_P als sinnvolle Angaben:

- Ermüdungsuntersuchung: $S_{P,b} = 1300 \text{ g}$
- Einwirkung von Böen: $S_{P,p} = 2500 \text{ g}$

11.5.2 Berechnungen mit anisotropen Folien

Aufgrund der Anisotropie der Folien genügt es nicht, nur den Fall zu untersuchen, bei dem die verwendeten Folien den gleichen E -Modul in X - und Y -Richtung aufweisen, sondern es ist auch zu untersuchen, welche Auswirkungen die Abweichungen des E -Moduls in Abhängigkeit von der Verlegerichtung haben. Wie Tabelle 5 zu entnehmen ist, sind die E -Module in Längsrichtung in der Regel kleiner als die Werte in Querrichtung. Nach Aussage eines Folienherstellers ist dies auf Prozesse während der Herstellung zurückzuführen. Da bei der Verlegung einer Folie als luftundurchlässige Schicht keine Vorgabe existiert, die besagt, dass eine Bahn sparrenparallel oder traufparallel angeordnet werden muss, und da es auch bei Sachverständigen und Ausführenden hierzu unterschiedliche Meinungen gibt, wurde im Rahmen einer zweiten Parameterstudie dieser Fragestellung nachgegangen. Für diese Untersuchung wurde ein Auflagerabstand von $e = 0,75 \text{ m}$ gewählt. Da die Berechnung des Foliendurchhangs h und der daraus abzuleitenden Probelasten S_P aus der Kombination aller möglichen E -Module in X - und Y -Richtung nicht leistbar war, wurde die Analyse so durchgeführt, dass in einer Richtung, z. B. der X -Richtung, ein E -Modul von $E = 250 \text{ N/mm}^2$ als konstant angenommen und in der anderen Richtung (Y -Richtung) der E -Modul zwischen 50 N/mm^2 und 2000 N/mm^2 variiert wurde. Anschließend erfolgte die Untersuchung, indem der E -Modul in X -Richtung variiert und in Y -Richtung ein konstanter Wert von 250 N/mm^2 angesetzt wurde. Auch in diesem Fall wurde sowohl der Bemessungswert der Einwirkung $F_{d,b}$ für die Untersuchung der Ermüdung als auch der Bemessungswert der Einwirkung für die Betrachtung von Böen angesetzt. Der Durchhang h und die Prüflasten S_P für die Ermüdungsprüfung sind in den Bildern 6 und 7 dargestellt, die Ergebnisse für Böeneinwirkung sind den Bildern 8 und 9 zu entnehmen.

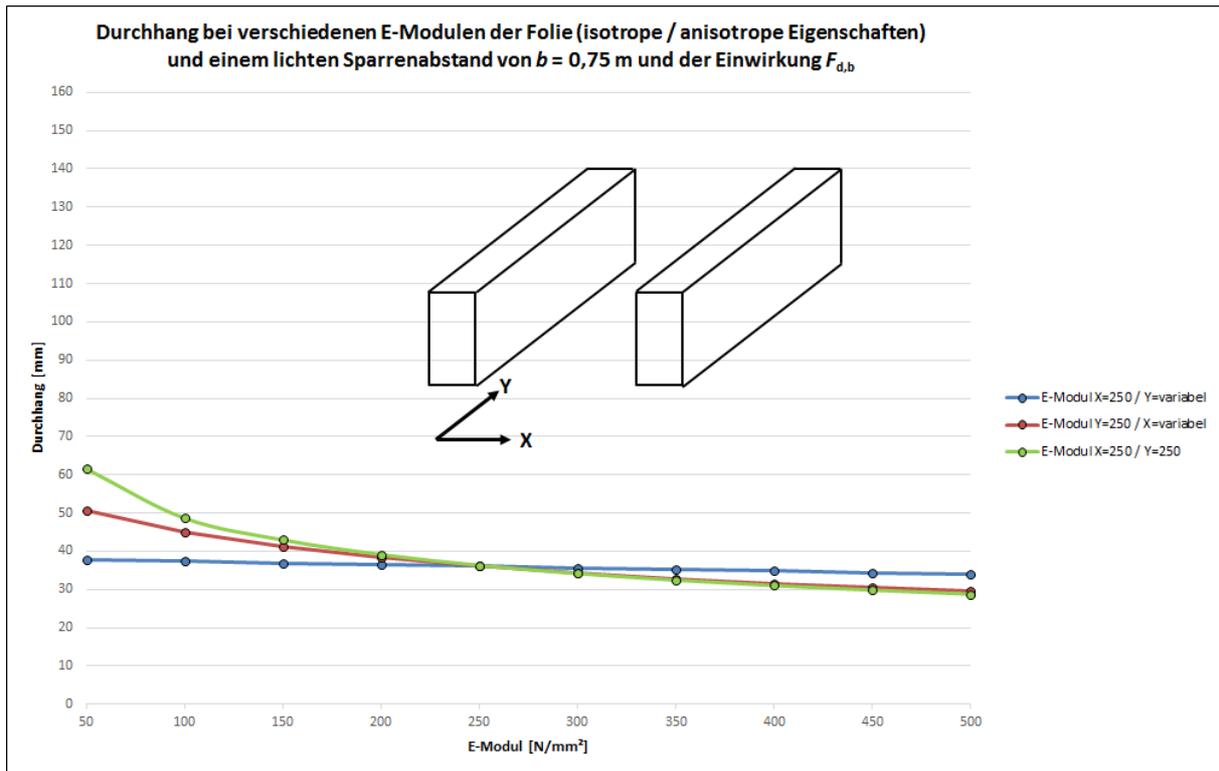


Bild 6: Durchhang bei Lasten zur Ermüdungsprüfung für isotrope bzw. anisotrope Folien

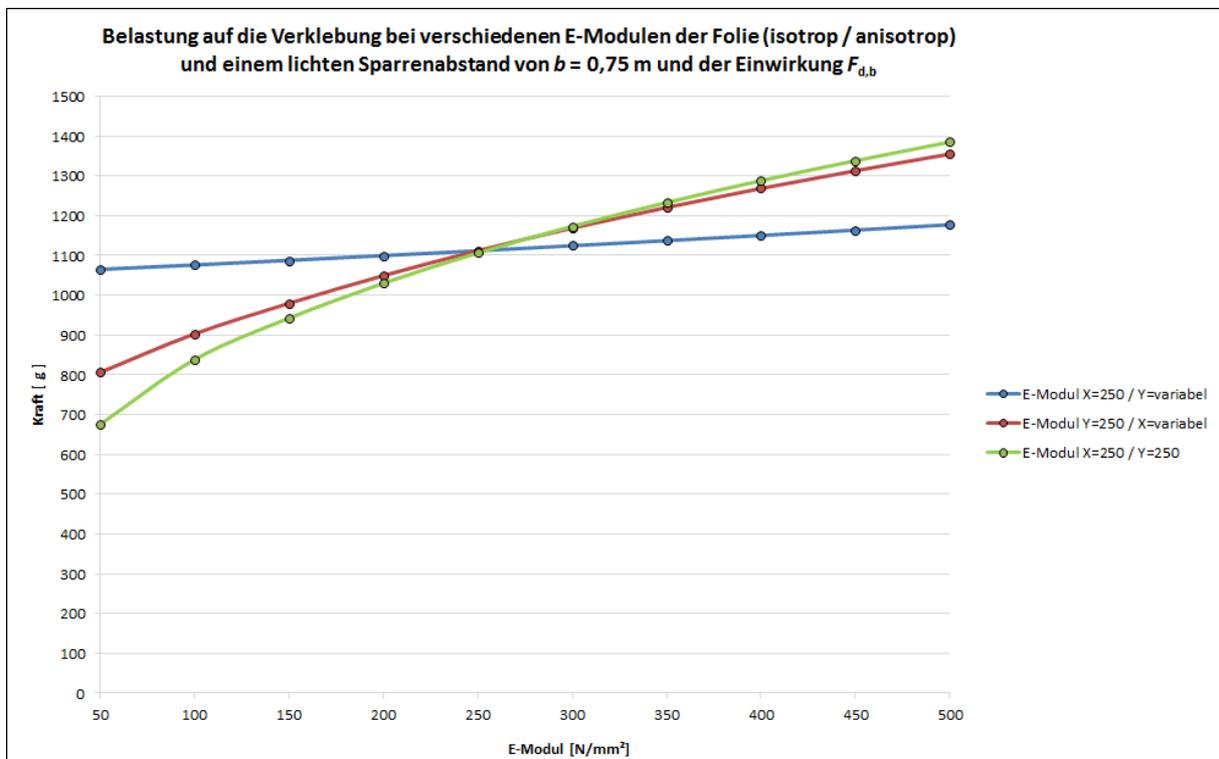


Bild 7: Prüflasten bei Lasten zur Ermüdungsprüfung für isotrope bzw. anisotrope Folien

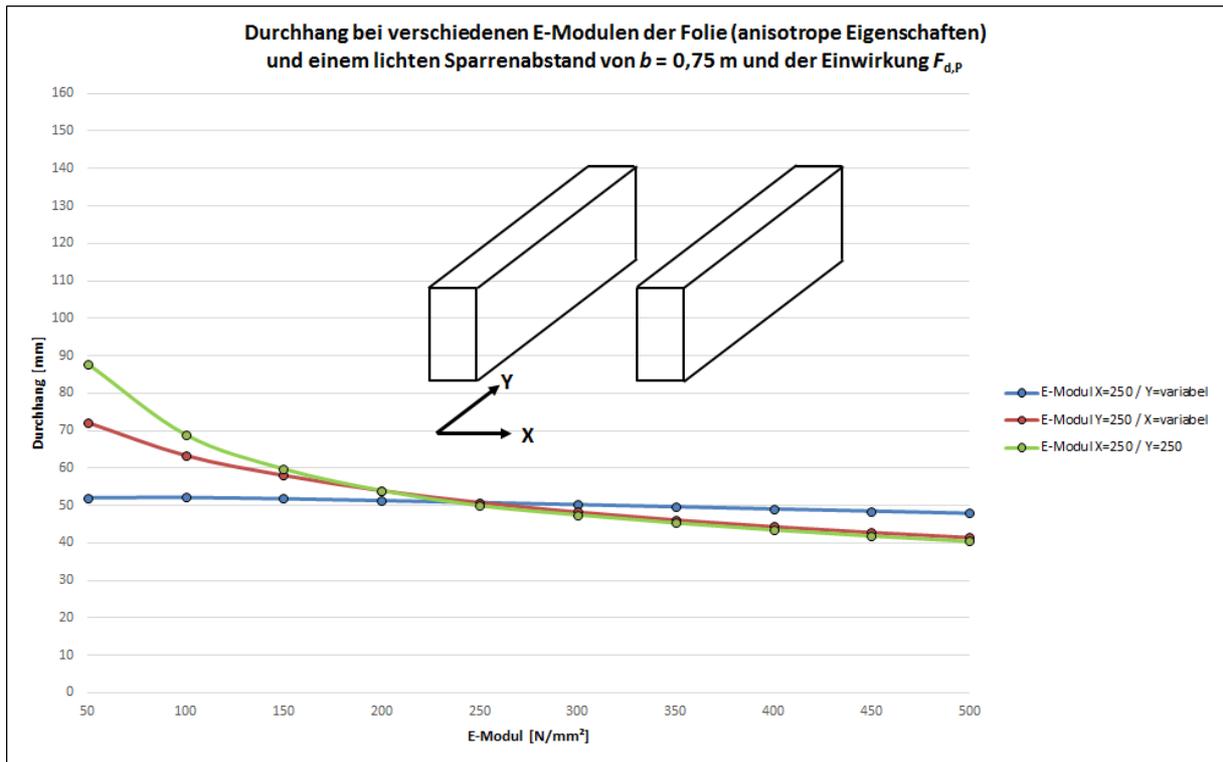


Bild 8: Durchhang bei Lasten aus Böeneinwirkung für isotrope bzw. anisotrope Folien

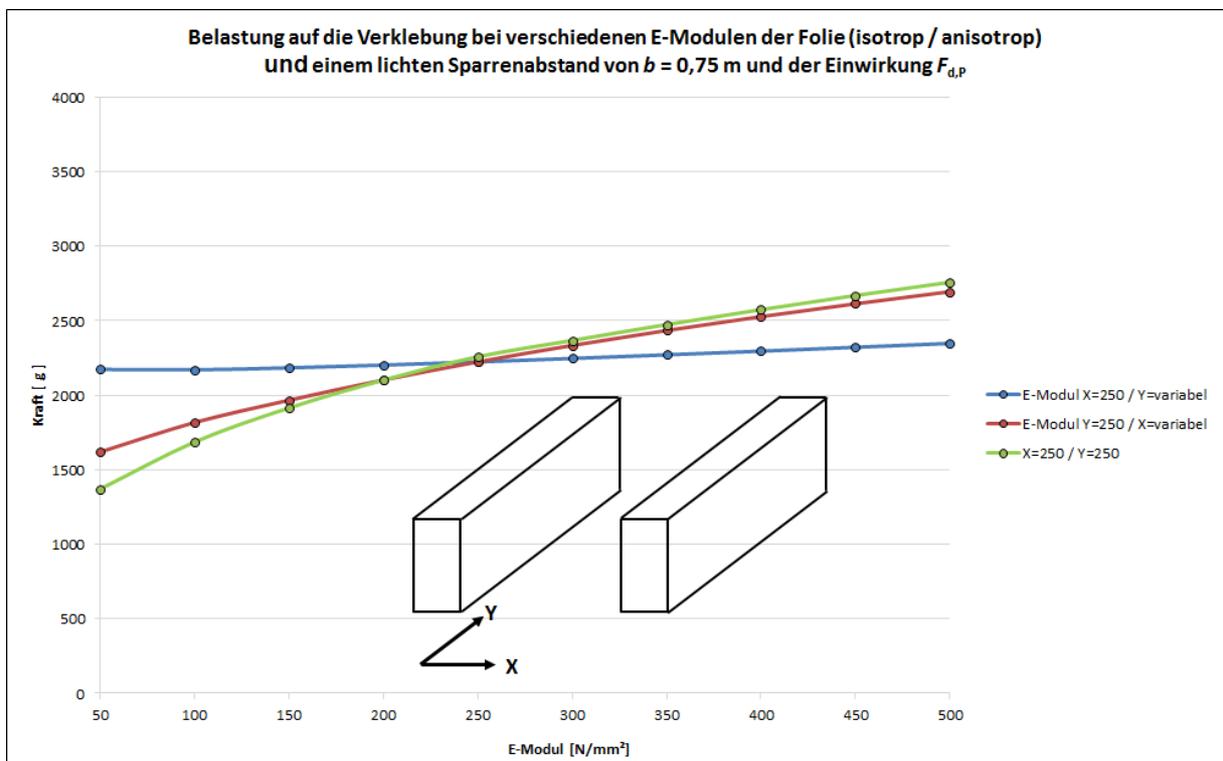


Bild 9: Prüflasten bei Lasten aus Böeneinwirkung für isotrope bzw. anisotrope Folien

Bei der Betrachtung der Bilder 6 bis 9 wird deutlich, dass die jeweils „steifere“ Richtung einer Folie, also die Richtung mit dem höheren E -Modul, die wesentliche Lastübertragung übernimmt. Wie bereits ausgeführt, liegt nach Aussage eines Folienherstellers in der Regel in Längsrichtung einer Bahn ein niedrigerer E -Modul vor im Vergleich zur Querrichtung. Dies soll auf Vorgänge während des Herstellungsprozesses zurückzuführen sein. Da jedoch im Vorfeld nicht eindeutig geklärt ist, ob die Bahnen beim Einbau sparren- oder traufparallel verlegt werden, ist auch keine eindeutige Aussage darüber möglich, in welcher Richtung mit einem stärkeren und in welcher Richtung mit einem geringeren Durchhang zu rechnen ist. Um im Rahmen von Festlegungen zur Bestimmung der Prüflasten zu einem „auf der sicheren Seite“ liegenden Ergebnis zu kommen, ist prinzipiell der ungünstigste Fall zu betrachten. Als ungünstig muss in diesem Zusammenhang ein möglichst hoher E -Modul eingestuft werden. Für die Umsetzung des Wechsellastverfahrens bedeutet dies, dass die Folien daraufhin zu untersuchen sind, welcher E -Modul der größere ist und dass zur Bestimmung des Durchhangs h und der daraus abgeleiteten Prüflasten S_P davon auszugehen ist, dass es sich bei der betrachteten Folie um ein Produkt mit einem isotropen Material handelt. Dementsprechend können bei der Festlegung der Prüflasten von Auflagerbreiten zwischen $e = 0,50\text{ m}$ und $e = 1,0\text{ m}$ die Werte der Prüflasten aus Anhang B angesetzt werden, die auf der Basis isotroper Folien erstellt wurden.

12 Lastzyklus zur Simulation der Dauerhaftigkeit

Wie in vielen Bereichen des Ingenieurwesens, bei denen instationäre Vorgänge zu betrachten sind, stellte sich auch bei der Entwicklung eines Prüfverfahrens für die Dauerhaftigkeit von Klebmitteln die Frage, ob das Sicherheitskonzept auf der Basis stationärer Verhältnisse – mit einem entsprechend höheren Sicherheitsniveau – entwickelt werden soll oder ob die Möglichkeit besteht, die instationäre Lasteinwirkung unter Berücksichtigung der Nutzungsdauer abzubilden. Bei der Entwicklung des Wechsellastverfahrens wurde die letztere der beiden Varianten gewählt, d. h., beim Wechsellastverfahren wird die Einwirkung von zeitlich veränderlichen Windkräften während einer Dauer von 50 Jahren untersucht. Hierzu war es erforderlich, einen Zyklus der Lasteinwirkung zu entwickeln oder auf eine fundierte Unterlage zurückzugreifen, in der die Ermüdungsbelastung über diesen Zeitraum beschrieben wird. Aussagen hierzu liefert eine englische Fachveröffentlichung, der BRE Digest 346 vom November 1989 [9]. Dort wird ein Verfahren beschrieben, mit dessen Hilfe das

Ermüdungsverhalten von Konstruktionen unter Windlasten bei einem Betrachtungszeitraum von 50 Jahren simuliert werden kann, also eine Prüfmethode, die die gesuchten Randbedingungen erfüllt. Der BRE Digest legt fest, dass Lasten, die zwischen 40 % und 90 % der Maximallast variieren, in einer vorgegebenen Reihenfolge und einer definierten Anzahl von Lastwechseln auf das System einwirken. Dieser Prüfmodus wird fünf Mal durchlaufen und endet mit einer einmaligen Belastung durch 100 % der Last. Die Systematik dieser Abfolge ist Tabelle 6 zu entnehmen. Die britische Studie zeigt außerdem, dass als Ausgangsgröße der Lasteinwirkung der Maximalwert der Windgeschwindigkeit, entsprechend den in Großbritannien gültigen Regelungen anzusetzen ist. Bei der Anwendung von DIN EN 1991-1-4:2010-12 und DIN EN 1991-1-4/NA:2010-12 ist jedoch zu unterscheiden zwischen der Basiswindgeschwindigkeit $v_{b,0}$ und dem daraus resultierenden Geschwindigkeitsdruck $q_{b,0}$ und dem Geschwindigkeitsdruck aus Böeneinwirkung q_p . Während die Böengeschwindigkeit mit der in einem Zeitraum von 50 Jahren maximal möglichen Windgeschwindigkeit als Einzahlergebnis korrelieren, werden die Werte der Basiswindgeschwindigkeit in diesem Zeitraum immer wieder überschritten und stellen damit eine wiederkehrende Belastung dar. Um das Versagen durch Ermüdung unter Lasten zu simulieren, die während eines Zeitraum von 50 Jahren auftreten können, ist daher die Verwendung der Basiswindgeschwindigkeit der sinnvollere Ansatz. Gleichwohl kann während der Nutzungsdauer eines Bauteils oder Bauwerks auch die maximale Böengeschwindigkeit als einmaliges Ereignis auftreten. Neben der Untersuchung, ob die Klebemittel durch Ermüdung geschädigt werden, ist parallel auch zu prüfen, ob die einmalige Einwirkung der maximalen Böe bewältigt werden kann. Der Prüfmodus des Wechsellastverfahrens setzt sich daher aus diesen beiden Ansätzen zusammen. In einem ersten Schritt wird die Ermüdung gemäß den Vorgaben des BRE Digests und im Anschluss daran die Einwirkung der maximal möglichen Böe an derselben Probe getestet.

Tabelle 6: Belastungszyklen beim Wechsellastverfahren

Prüfung der Materialermüdung			
Anzahl der Lastwechsel je Zyklus	Anzahl der Zyklen	Anteil der Volllast	Belastung der Proben
		[%]	[g/25mm]
1	5	90	
960		40	
60		60	
240		50	
5		80	
14		70	
1		1	100
Prüfung der maximalen Belastung aus Böen			
5	1	100	
Dauerbelastung			
300 Sekunden	1	100	

Unter Verwendung der vorgeschlagenen Prüflasten aus Kapitel 11.5.1 sieht das Szenario beim Wechsellastverfahren wie in Tabelle 7 dargestellt aus.

Tabelle 7: Prüfscenario beim Wechsellastverfahren

Prüfung der Materialermüdung			
Anzahl der Lastwechsel je Zyklus	Anzahl der Zyklen	Anteil der Volllast	Belastung der Proben
		[%]	[g/25mm]
1	5	90	1170
960		40	520
60		60	780
240		50	650
5		80	1040
14		70	910
1	1	100	1300
Prüfung der maximalen Belastung aus Böen			
5	1	100	2500
Dauerbelastung			
300 Sekunden	1	100	2500

13 Durchführung der Prüfung beim Wechsellastverfahren

13.1 Probenkonfiguration und Untergründe

Ziel des Wechsellastverfahrens ist es, die Dauerhaftigkeit von Klebemitteln zu untersuchen. Da Klebemittel jedoch dazu dienen, verschiedene Elemente der luftundurchlässigen Hülle miteinander zu verbinden, werden Klebebänder und Klebmassen auf unterschiedlichen Untergründen aufgebracht. Für die Prüfung der Dauerhaftigkeit von Klebemitteln bedeutet dies, dass in der Prüfung deren Verhalten nur dann untersucht werden kann, wenn sie zwei Untergrundmaterialien verbinden. Die Dauerhaftigkeit der Klebemittel bezieht sich somit nicht nur auf die Eigenschaft des zu untersuchenden Stoffes alleine, sondern gegebenenfalls auch auf die andauernde Haf-

tung – und damit die Luftdichtheit – auf einem Untergrundmaterial. Diese Einbausituation ist durch den Prüfmodus im Wechsellastverfahren abzubilden. Bei der Prüfung nach dem Wechsellastverfahren ist daher ein geeignetes Untergrundmaterial zu wählen, das durch ein Klebemittel verbunden wird. Das Versagen kann dabei im Klebemittel – durch ein sogenanntes Kohäsionsversagen – oder aufgrund des Ablösens des Klebemittels vom Untergrund – als Adhäsionsversagen – oder als eine Mischung aus beidem auftreten.

Da sich die verschiedenen auf dem Markt befindlichen Klebemittel aus unterschiedlichen Komponenten zusammensetzen, zeigen diese auch von einander abweichende Reaktionen hinsichtlich der Haftung auf Untergrundmaterialien. Die Bandbreite möglicher Untergründe erstreckt sich von Holz und Holzwerkstoffen über mineralische Baustoffe bis zu Kunststoffen und Metallen.

Es ist weiterhin zu unterscheiden, ob sich die Prüfung auf neutrale Untergründe bezieht oder ob der Anbieter eines Klebemittels auch als Anbieter einer luftdichten Schicht auftritt. Bei der Prüfung der Dauerhaftigkeit ist somit in Abhängigkeit der zu verbindenden Untergrundmaterialien (Substrate) zu unterscheiden,

- ob es sich um eine Aussage über das zu untersuchende Material bei neutralen Substraten handelt (Referenzprüfung) oder
- ob sich die Aussage zur Dauerhaftigkeit eines Klebemittels auf dessen Kombination mit einem speziellen Material der Luftdichtheit (Systemlösung) bezieht.

Zu beachten ist, dass die Referenzprüfung Bestandteil der normativen Prüfung im Rahmen von DIN 4108-11 ist und damit von qualifizierten neutralen Prüfinstituten durchgeführt werden muss, während die Systemprüfung als eine Zusatzqualifikation angesehen wird und in den Bereich der Eigenüberwachung fällt.

13.1.1 Referenzfallprüfung

Um eine möglichst neutrale Aussage über die Dauerhaftigkeit der Klebemittel zu erhalten, waren ein bzw. mehrere Materialien festzulegen, die die Eigenschaften der zu untersuchenden Klebemittel möglichst wenig beeinflussen. Zu berücksichtigen sind neben chemischen Reaktionen auch die unterschiedlichen Oberflächenspannungen der verschiedenen Stoffe. So zeigen unterschiedliche Klebemittel durchaus abweichende Reaktionen auf Untergründe mit einer hohen oder niedrigen Oberflächenspannung. Während sich mit einigen Klebemitteln sehr gute Ergebnisse auf Untergründen wie Glas oder poliertem Stahl erzielen lassen – die dann wiederum schlechte Eigen-

schaften bei porosierten Oberflächen zeigen –, gibt es andere Kleber, die auf rauen Oberflächen eine bessere Haftung zeigen als auf glatten.

Nach Abwägung verschiedenster Materialien und Untergründe wurde im Rahmen des Wechsellastverfahrens beschlossen, bei der Probenherstellung als festen un-nachgiebigen Untergrund Buchenholz gemäß DIN 205 [10] zu wählen. Die Breite der Buchenholzplättchen beträgt 25 mm. Als Kunststoffbahn kommt eine nicht siegel-fähige, nicht tiefziehfähige und nicht geätzte OPET-Bahn zum Einsatz, die eine Ober-flächenspannung von mindestens 40 nN/m und eine Dicke von 50 µm aufweist.

Zur Prüfung von Klebmassen wird ein Folienstreifen auf einem Buchenholzplättchen fixiert, während zur Untersuchung von Klebebändern zwei Folienstreifen miteinander verbunden werden.

Die Fläche, mit der die Klebemittel Buchenholz und Folie bzw. zwei Folien verbinden, beträgt 25 x 25 mm. Zu beachten ist in diesem Zusammenhang, dass es bei Klebe-bändern einseitig und beidseitig klebende Produkte gibt. Es sind daher entsprechen-de Verklebungen vorzunehmen. Klebmassen haften prinzipiell auf beiden Seiten.

13.1.2 Systemprüfung

Die Systemprüfung unterscheidet sich, wie im vorgehenden Kapitel dargestellt, von der Referenzprüfung nur dadurch, dass die zu verwendende Folie als Systemlösung in Kombination mit einem Klebemittel von einem Hersteller angeboten wird. Als Un-tergründe bei der Untersuchung von Klebmassen folgt daraus, dass – analog zur Referenzprüfung – ein Substrat aus einem Buchholzplättchen besteht und das ande-re Substrat aus dem vom Hersteller vorgegebenen Systemuntergrund gebildet wird. Bei der Systemprüfung von Klebebändern werden beide Untergründe aus dem her-stellerspezifischen Material gebildet.

13.2 Künstliche Alterung

Da auf eine Verklebung am Bau vom Zeitpunkt des Einbaus an Lasten aus Windkräf-ten einwirken und statistisch gesehen die maximal mögliche Böe zu jedem Zeitpunkt innerhalb des 50-jährigen Betrachtungszeitraums auftreten kann, sind beim Wechsel-lastverfahren zwei Alterungszustände zu prüfen: zum einen der frische Einbauzu-stand und zum anderen Materialien in gealtertem Zustand.

Der gealterte Zustand, der eigentlich den Inhalt der Norm, die Dauerhaftigkeit von Klebemitteln, wiedergibt, bezieht sich auf die Funktionsfähigkeit über einen Zeitraum

von 50 Jahren. Während dieser Spannen muss man jedoch davon ausgehen, dass sich die zu untersuchenden Klebemittel durch Temperatur- und Feuchteschwankungen sowie durch chemische Prozesse verändern. Da die Produkte, die als Klebemittel verwendet werden, einer ständigen Weiterentwicklung unterworfen sind und es keine Klebemittel gibt, die 50 Jahre alt sind, sind geeignete Methoden anzuwenden, mit deren Hilfe ein künstlicher Alterungsprozess in beschleunigter Form durchgeführt werden kann. Mögliche Szenarien für eine künstliche Alterung von Klebemitteln wurden von des ASTM [11] und von SATAS [12] veröffentlicht.

Tabelle 8: Zusammenhang zwischen künstlicher und natürlicher Alterung nach ASTM und SATAS

Künstliche Alterung bei 65 °C / 80 % r. F. in Tagen	Natürliche Alterung nach ASTM D3611-89 in Jahren (ca.)	Natürliche Alterung nach SATAS in Jahren (ca.)
21	10,5	3
40	20	5,7
80	40	11,4
120	60	17,1

Das Verfahren nach ASTM bezieht sich jedoch nur auf die Prüfung ganzer Klebebandrollen und die Methode nach SATAS nur auf chirurgische Pflaster, sodass eine Übertragung dieser Korrelationen zwischen künstlicher und natürlicher Alterung auf Klebemittel im Baubereich nur bedingt möglich ist.

Als weitere Möglichkeit der künstlichen Alterung kommt das Verfahren nach SP – METHODE 1380 Edition 2 der schwedischen Kunststoff- und Chemievereinigung [13] infrage. Danach werden die Prüflinge einer konstanten Temperatur von $\theta = 100$ °C ausgesetzt. Mit Hilfe der erhöhten Temperatur soll der Prozess der künstlichen Alterung simuliert werden. Die Abhängigkeit der chemischen Reaktionsgeschwindigkeit von der Temperatur wird dabei durch die Arrhenius-Gleichung beschrieben. Nach dieser Methode entspräche die künstliche Alterung über einen Zeitraum von 168 Tagen (24 Wochen) einer natürlichen Alterung von 50 Jahren.

Tabelle 9: Zusammenhang zwischen künstlicher und natürlicher Alterung nach SP -
METHODE 1380, Edition 2

Künstliche Alterung bei 65 °C / 80 % r. F. in Tagen	Natürliche Alterung nach SP – METHODE 1380, Edition 2 in Jahren (ca.)
60	18
120	36
168	50

Da sich jedoch zeigte, dass bei einer Temperatur von $\theta = 100 \text{ °C}$ auch die Folien geschädigt werden können, wurde diese Methode als wenig sinnvoll eingestuft. Messungen nach diesem Ansatz werden derzeit in anderen Bereichen mit niedrigeren Temperaturen und dementsprechend längeren Zeiten der künstlichen Alterung durchgeführt.

In Ermangelung weiterer Angaben und Ergebnisse zur künstlichen Alterung von Klebmitteln werden beim Wechsellastverfahren die zu untersuchenden Proben bei einer Temperatur von $\theta = 65 \text{ °C}$ und einer relativen Feuchte von $\phi = 80 \text{ %}$ über einen Zeitraum von 120 Tagen gelagert. Damit soll eine Alterung von 50 Jahren simuliert werden.

13.3 Probenvorbereitung und Probenherstellung

Um gleichgeartete Verhältnisse bei der Probenherstellung zu erreichen, werden die Materialien – Folie, Klebmittel, Buchenholzplättchen – vor der Herstellung der Prüfkörper für die Dauer von 24 h bei einer Temperatur von $\theta = 23 \text{ °C}$ und einer relativen Feuchte von $\phi = 50 \text{ %}$ gelagert. Danach erfolgt die Herstellung der Prüfkörper und – bei Klebebändern – die künstliche Alterung. Bei Prüfkörpern zur Untersuchung von Klebmassen soll bei den Klebmitteln jedoch zunächst eine „Grundtrocknung“ erreicht werden. Hierzu werden die Prüflinge während einer Dauer von sieben Tagen bei einer Temperatur von $\theta = 40 \text{ °C}$ gelagert und erst nach Ablauf dieser Frist der künstlichen Alterung zugeführt.

Um Zufälligkeiten bei der Prüfung nach dem Wechsellastverfahren zu vermeiden, werden pro zu prüfendem Klebmittel mindestens 5 Proben getestet. In Hinblick auf

die Menge an Proben, die sich aus daraus ergibt, ist die Anordnung der Prüfkörper und die Probenkonfiguration so zu wählen, dass während einer Messung möglichst viele der Prüfkörper untersucht werden können. Wie bereits in Kapitel 11.4 aufgeführt, beträgt die Probekbreite daher 25 mm.

14 Prüfung nach dem Wechsellastverfahren

14.1 Allgemeines

Wie bereits dargelegt, zielt die Prüfung der Dauerhaftigkeit von Klebemitteln auf zwei Szenarien zur Simulation der Einwirkung durch Wind auf die Klebemittel an und in Bauteilen und Bauwerken ab. Dabei ist zu unterscheiden zwischen Lasten, die während der prognostizierten Nutzungsdauer eines Bauteils oder Bauwerks wiederholt auftreten können und zu einem „Verschleiß“ – d. h. zu einem Versagen durch Ermüdung – führen, und Lasten, die einmalig während der Lebensdauer des Bauteils oder Bauwerks auftreten. Um eine verlässliche Aussage über die Dauerhaftigkeit von Klebemitteln machen zu können, sind bei der Prüfung von Klebebändern und Klebmassen auch diese beiden Lasteinwirkungen messtechnisch abzubilden.

14.2 Ermüdungsprüfung

Wie bei vielen anderen Produkten muss bei der Prüfung des Versagens aus Ermüdung von Klebemitteln zunächst eine Methode entwickelt werden, um die Einwirkung alternierender Lasten zu simulieren. Zur Erfassung dieses Problems – der Dauerhaftigkeit – wurde ein Prüfgerät entwickelt, mit dessen Hilfe Lasten in einer vorgegebenen Häufigkeit und einer definierten Größenordnung auf den Probekörper und damit auf das Klebemittel einwirken. Der erste gedankliche Ansatz hierzu resultierte aus der Betrachtung des Erregergerätes bei der Messung von Trittschallübertragung, dem sogenannten Normtrittschallhammerwerk. Bei dieser Messung fallen Gewichte einer genau definierten Masse aus einer vorgegebenen Höhe auf die zu untersuchende Deckenfläche und regen diese zum Schwingen an. Da es sich bei der Wechsellastprüfung jedoch nicht um eine Anregung, sondern um eine Kraft- bzw. Lasteinwirkung auf ein Klebemittel handelt, war die Apparatur dahin gehend zu verändern, dass die Gewichte nicht auf einem Untergrund auftreffen, sondern die Einwirkung, die sich aus den frei fallenden Gewichten ergibt, durch die Klebeverbindung aufgenommen wird. Diese veränderte Betrachtung führt zu einer veränderten Prüfvorrichtung: Während bei der Messung zum Trittschallschutz die Gewichte angehoben wer-

den, um dann nach dem freien Fall auf die in Ruhe befindliche Oberfläche einer Decke aufzutreffen, befindet sich beim Wechsellastverfahren die Auflage der Gewichte in einer Auf- und Abbewegung. Da die Abwärtsbewegung der Aufsatzplatte über die Länge des Prüfkörpers – einschließlich des daran hängenden Gewichtes – weiter nach unten geführt wird, kommt es dazu, dass die Gewichte am Prüfling frei hängen. Der Prüfkörper, d. h. die Klebeverbindung, wird so mit den gewählten Gewichten und Kräften belastet.

Eine Prinzipdarstellung der Prüfvorrichtung findet sich in Bild 10.

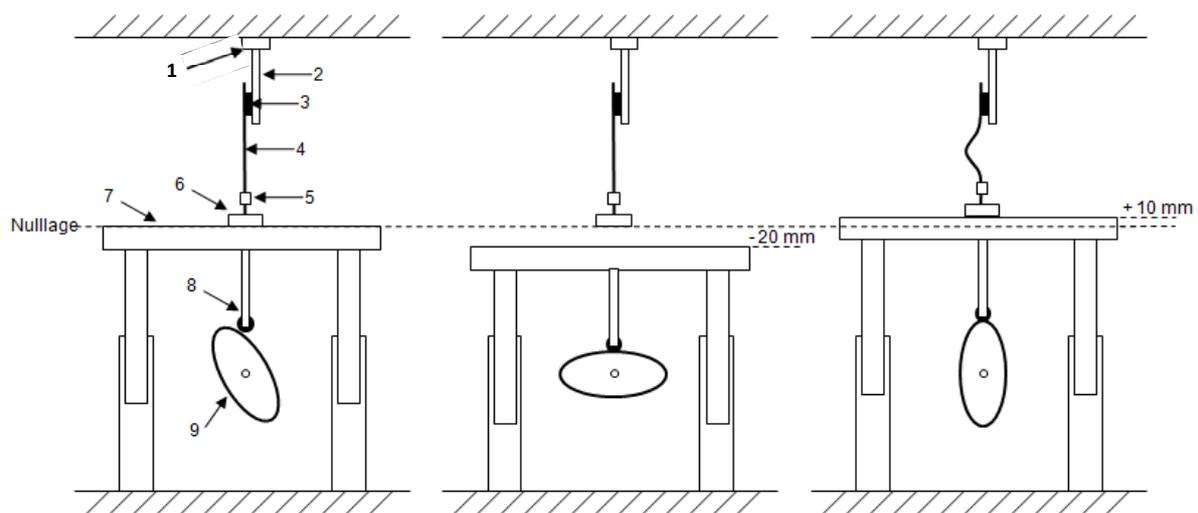


Bild 10: Schematische Darstellung der Prüfmachine

Wie zu sehen ist, wird der Probekörper am oberen Ende in die Prüfmachine eingespannt (1). Das Klebemittel (3) verbindet die beiden Substrate (2) und (4). Wie in Kapitel 13.1.1 dargelegt, besteht das Substrat (2) bei der Prüfung von Klebmassen aus einem Buchenholzplättchen, bei der Prüfung von Klebebändern aus einer OPET-Folie. Das Substrat (4) wird bei der Regelfallprüfung generell aus einem Streifen einer OPET-Folie hergestellt. Am unteren Ende von (4) werden die Gewichte (6) angehängt (5). Die Gewichte ruhen in der Nulllage (linke Darstellung in Bild 10) auf der Hubplatte (7). In diesem Zustand sind die Folien straff, d. h., es besteht eine leichte Vorspannung, jedoch ohne dass sich die Gewichte bereits von der Platte gelöst haben. Wenn sich die Extenderscheibe (9) zu drehen beginnt, wird die Platte (7) durch die Hubstange (8), an deren unterem Ende sich eine Laufrolle befindet, angehoben bzw. abgesenkt. Die mittlere Darstellung in Bild 10 zeigt die Situation des Prüfgeräts, wenn die Hubplatte (7) ihren Tiefpunkt erreicht hat. Dann beträgt der Abstand von

der Unterkante der Gewichte (6) zur Oberkante der Hubplatte (7) $\Delta h = 20$ mm. Die rechte Darstellung in Bild 10 stellt den Hochpunkt der Hubplatte (7) dar. Damit es zu einer vollständigen Entlastung der Verbindung von (2) und (4), also zu einer Entlastung des Klebemittels, kommt, wird die Hubplatte (7) um $\Delta h = 10$ mm über die Nulllage hinaus angehoben.

In Bild 11 dargestellt ist der Prototyp einer Prüfmaschine mit der Einspannung der Prüfkörper, der Hubplatte und den Gewichten. Je nach Größe des Aufbaus können mit dieser Vorrichtung bis zu 20 Proben gleichzeitig untersucht werden.



Bild 11: Prototyp einer Prüfmaschine

Als kritisch wurde bei der Wechsellastprüfung zunächst eingestuft, dass es durch den freien Fall der Hubplatte zu einem ruckartigen Lasteintrag in den Klebeverbindungen kommt. Dieser Impuls führt zu einer Kraft auf die Klebemittel, die deutlich über den anzusetzenden Lasten liegt. Die Auswirkung einer impulsartigen Lasteinleitung bei einem Gewicht von 2000 g und einer freien Fallhöhe von 12,5 mm ist als Messkurve

in Bild 12 dargestellt. Es ist deutlich zu sehen, dass statt einer Belastung von 20 N (= 2000 g) Kraftspitzen von mehr als 40 N auftreten können.

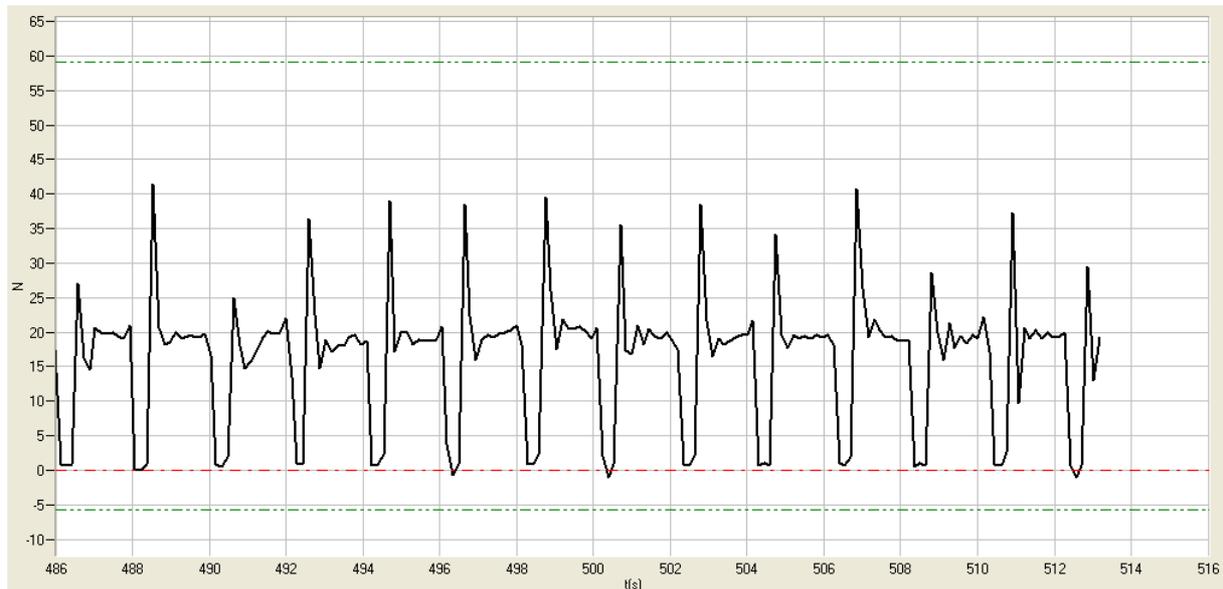


Bild 12: Impulsartige Belastung

Das ruckartige Auftreten von Lasten entspricht zwar eher den natürlichen Verhältnissen – der Wind ist in der Regel keine gleichförmige Belastung, sondern tritt in kurzen Schüben auf –, für die Prüfung des Wechsellastverfahrens mit dem Aspekt der Dauerhaftigkeit über einen Zeitraum von 50 Jahren kommt es jedoch auf das Ermüdungsverhalten der Klebemittel unter definierten Randbedingungen an. Unter diesem Eindruck wurde die Antriebsscheibe so konfiguriert, dass sich die Hubplatte mit einer gleich bleibenden Geschwindigkeit von $v = 20 \text{ mm/s}$ absenkt. Um dies zu erreichen, wurde eine Scheibengeometrie gewählt, die im Bereich der Absenkbewegung die Form einer Archimedischen Spirale hat. Die Form der Exzentrerscheibe ist in Bild 13 dargestellt. Die zugehörigen Bewegungen in Y-Richtung und die dazu erforderliche Zeit sind Bild 14 zu entnehmen. Betrachtet man die Bewegung der Hubplatte, dann bewegt sich diese aus der Nulllage heraus mit einer konstanten Geschwindigkeit (rote Linie in Bild 13 und Bild 14) nach unten. Ab dem Tiefpunkt der Bewegung setzt die Aufwärtsbewegung ein, für die es keine Anforderungen an die Geschwindigkeit gibt (blaue Linie in Bildern 13 und Bild 14). Die Aufwärtsbewegung endet bei der Marke 10 mm über der Nulllage. Von diesem Punkt an setzt wieder eine Abwärtsbewegung mit einer konstanten Geschwindigkeit von $v = 20 \text{ mm/s}$ ein (grüne Linie in den Bildern 13 und 14.) Die grüne Linie und die rote Linie in Bild 13 stellen somit einen Ausschitt aus einer Archimedischen Spirale dar, während die Verbindung vom Endpunkt der

roten Linie zum Anfangspunkt der grünen Linie durch eine Bezierkurve 2. Grades hergestellt wird. Die Linienform wird in diesem Bereich so gewählt, dass die Aufwärtsbewegung vom Tiefpunkt zum Hochpunkt 0,5 s beträgt und die Übergänge zur Archimedischen Spirale möglichst glatt gestaltet werden.

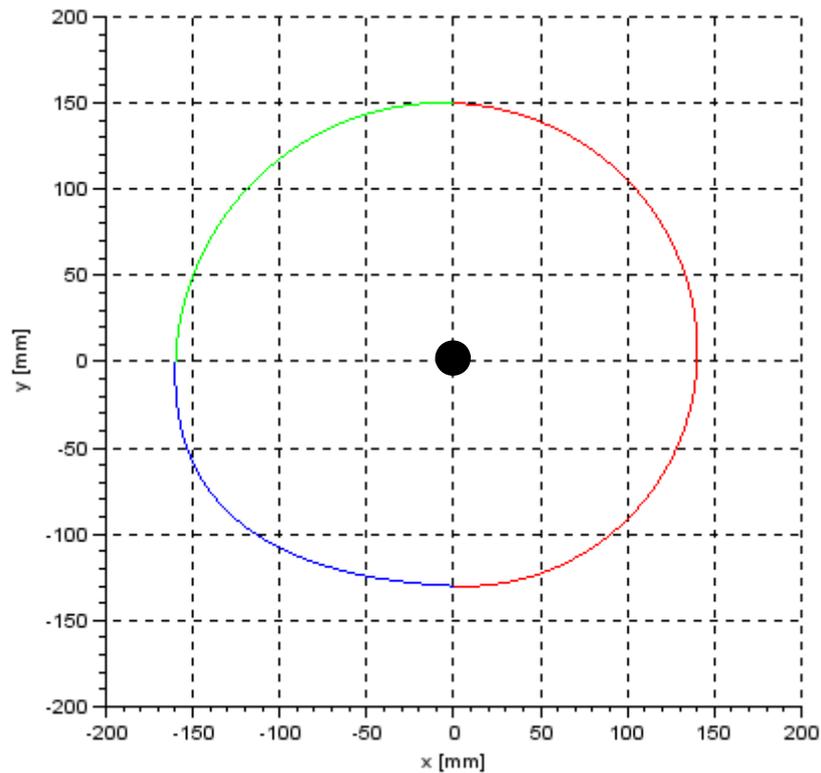


Bild 13: Form der Exzentrerscheibe

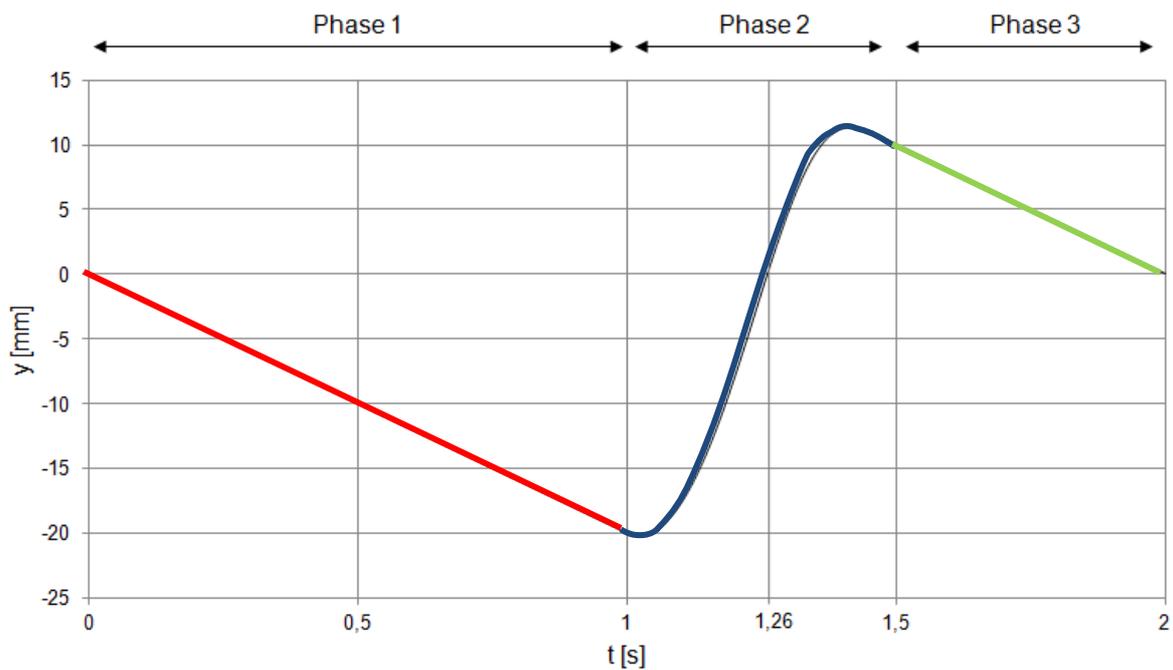


Bild 14: Zeitlicher und räumlicher Verlauf der Hubplattenbewegung

Die Exzentrerscheibe dreht sich während des gesamten Vorgangs mit einer konstanten Winkelgeschwindigkeit und benötigt für eine vollständige Umdrehung 2 s, d. h., es findet eine Belastung und Entlastung der Proben mit einer Frequenz von 0,5 Hz statt.

Der Vorgang der Be- und Entlastung wird zur Prüfung des Ermüdungsverhaltens mit den Gewichten nach Tabelle 7 und der dort aufgeführten Anzahl der Lastwechsel durchgeführt.

14.3 Prüfung der Böeneinwirkung

Wie bereits dargelegt, kommt es während der prognostizierten Nutzungsdauer einer Klebeverbindung nicht nur zu wiederholten mittleren Lastwechseln, sondern auch zur Einwirkung extremer Kräfte aus Böen. Diese Belastung wird im Wechsellastverfahren im Anschluss an die Ermüdungsprüfung durchgeführt. Die Vorgehensweise entspricht dabei prinzipiell dem in Kapitel 14.2 beschriebenen Prozedere, jedoch sind als Kräfte die aus der Böeneinwirkung ermittelten Lasten nach Tabelle 7 anzusetzen und es kommt nur zu einem Zyklus mit fünfmaligem Lastwechsel. Um nicht nur kurzzeitige Einwirkungen, sondern auch Böen mit einer längeren Wirkdauer zu erfassen, erfolgt nach den fünf Lastwechseln eine Dauerbelastung mit den Kräften aus Böen nach Tabelle 7 über einen Zeitraum von 300 s hinweg.

14.4 Kriterium zum Bestehen des Wechsellastverfahrens

Da mit dem Wechsellastverfahren das Ermüdungsverhalten von Klebmitteln geprüft werden soll, können Zahlenwerte als Kriterium für das Bestehen oder Nichtbestehen nicht definiert werden. Als Entscheidungsmerkmal für eine erfolgreiche Prüfung wird daher der Aspekt der Luftdichtheit herangezogen, d. h. die Frage, ob nach einer Belastung mit einem simulierten Zeitraum von 50 Jahren und extremen Böen gemäß Tabelle 7 die Klebeverbindung die ihr zuge dachte Aufgabe auch weiterhin erfüllen kann. Wie eine Auswertung von Versuchen zeigte, kann es bei einer Belastung von Klebmitteln zu einem „Abrutschen“ auf dem Untergrund kommen, die Luftdichtheit der Verbindung ist aber trotzdem weiterhin gegeben. Da ein solcher Prozess jedoch nicht beliebig ausgedehnt werden kann, wurde festgelegt, dass ein Klebmittel die Wechsellastprüfung dann mit Erfolg bestanden hat, wenn nach Abschluss der Lastwechsel nach Tabelle 7 das am Probekörper angehängte Gewicht – bei einer Einstellung der Hubplatte an ihrem Tiefpunkt – noch frei über der Plattenoberfläche hängt.

Bei einer Verklebungslänge von 25 mm kann sich das Klebemittel somit um 20 mm bewegen, eine Restfläche der Ausgangslage von 5 mm muss aber gegeben sein. Bei der Prüfung nach dem Wechsellastverfahren ist aber nicht nur das Endergebnis zu betrachten. Auch während des Prüfvorgangs muss immer wieder untersucht werden, ob das Klebemittel sich durch die Lasteinwirkung in einer Weise verändert hat, dass die Anforderungen der Luftdichtheit nicht mehr gegeben sind.

Hinsichtlich der Versagensmöglichkeiten ist zwischen der Referenzfallprüfung mit standardisierten Substraten und der Prüfung von Systemlösungen zu unterscheiden. Während die Referenzfallprüfung Ergebnisse zu Klebemitteln liefert, kann es bei der Prüfung von Systemlösungen auch zum Versagen der Substrate kommen. Die letztendliche Frage, nämlich die, ob die Luftdichtheit gegeben ist oder nicht, wird mit dem Wechsellastverfahren auf jeden Fall beantwortet.

15 Zusammenfassung

Um die Dauerhaftigkeit von Klebemitteln gemäß der Aufgabenstellung von DIN 4108-11 prüfen zu können, war es notwendig, ein Verfahren zu entwickeln, mit dessen Hilfe die Wirkung alternierender Lasten auf Verbindungsmittel in der luftdichten Hülle von Gebäuden simuliert werden kann. Die Kräfte, die auf die Prüfkörper einwirken, wurden aus Festlegungen in den baurechtlich eingeführten Normen, insbesondere DIN EN 1990:2012-08, DIN EN 1991-1-4:2012-08 und DIN EN 1991-1-4/NA:2012-08, entwickelt und stellen mittlere und maximale Lasten aus Wind während einer prognostizierten Nutzungsdauer eines Bauteils oder Gebäudes von 50 Jahren dar. Die erforderlichen Belastungswechsel und Zyklen zur Simulation des Ermüdungsversagens wurden einer britischen Studie entnommen und um die Lasteinwirkung aus Böen ergänzt. Der Alterung der verwendeten Materialien während der anvisierten 50 Jahre Nutzungszeit wird durch eine künstliche Alterung Rechnung getragen.

Das Wechsellastverfahren stellt damit ein Modell dar, mit dessen Hilfe sowohl Lasten als auch die chemische Veränderung der zu untersuchenden Materialien während eines Zeitraums von 50 Jahren abgebildet werden können. Mit dieser Methode ist somit eine Aussage darüber möglich, ob Klebemittel ihrer Aufgabe während des Betrachtungszeitraums gerecht werden oder nicht.

Anhang A: Bestimmung der Windgeschwindigkeiten

Tabelle A.1: Zusammenhang zwischen der Beaufort-Skala und der Windgeschwindigkeit nach [3]

Beaufort-grad	Bezeichnung	Mittlere Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe über freiem Gelände		Beispiele für die Auswirkungen des Windes im Binnenland
		m/s	km/h	
0	Windstille	0 - 0,2	< 1	Rauch steigt senkrecht auf
1	leiser Zug	0,3 - 1,5	1 - 5	Windrichtung angezeigt durch den Zug des Rauches
2	leichte Brise	1,6 - 3,3	6 - 11	Wind im Gesicht spürbar, Blätter und Windfahnen bewegen sich
3	schwache Brise schwacher Wind	3,4 - 5,4	12 - 19	Wind bewegt dünne Zweige und streckt Wimpel
4	mäßige Brise mäßiger Wind	5,5 - 7,9	20 - 28	Wind bewegt Zweige und dünnere Äste, hebt Staub und loses Papier
5	frische Brise frischer Wind	8,0 - 10,7	29 - 38	kleine Laubbäume beginnen zu schwanken, Schaumkronen bilden sich auf Seen
6	starker Wind	10,8 - 13,8	39 - 49	starke Äste schwanken, Regenschirme sind nur schwer zu halten, Telegrafleitungen pfeifen im Wind
7	steifer Wind	13,9 - 17,1	50 - 61	fühlbare Hemmungen beim Gehen gegen den Wind, ganze Bäume bewegen sich
8	stürmischer Wind	17,2 - 20,7	62 - 74	Zweige brechen von Bäumen, erschwert erheblich das Gehen im Freien
9	Sturm	20,8 - 24,4	75 - 88	Äste brechen von Bäumen, kleinere Schäden an Häusern (Dachziegel oder Rauchhauben abgehoben)
10	schwerer Sturm	24,5 - 28,4	89 - 102	Wind bricht Bäume, größere Schäden an Häusern
11	orkanartiger Sturm	28,5 - 32,6	103 - 117	Wind entwurzelt Bäume, verbreitet Sturmschäden
12	Orkan	ab 32,7	ab 118	schwere Verwüstungen

Tabelle A.2: Stationsübersicht

Nr.	Station	Windgeschwindigkeit [Bft]	Windgeschwindigkeit [m/s]	Windgeschwindigkeitsdruck [N/m ²]
1	Aachen	5,58	11,06	0,08
2	Arkona	8,04	19,08	0,23
3	Augsburg	4,73	8,65	0,05
4	Bamberg	4,49	8,00	0,04
5	Berlin-Tempelhof	5,99	12,30	0,09
6	Bremen	5,77	11,63	0,08
7	Erfurt-Bindersleben	6,23	13,04	0,11
8	Fehmarn	7,78	18,17	0,21
9	Feldberg	9,16	23,19	0,34
10	Fichtelberg	8,82	21,92	0,30
11	Frankfurt-Flughafen	4,75	8,70	0,05
12	Görlitz	6,77	14,76	0,14
13	Hamburg-Fuhlsbüttel	6,03	12,42	0,10
14	Hannover	5,90	12,02	0,09
15	Helgoland	8,02	19,12	0,23
16	Hof	7,31	16,55	0,17
17	Hohenpeisenberg	7,72	17,96	0,20
18	Kahler Asten	6,67	14,44	0,13
19	Karlsruhe	5,61	11,15	0,08
20	Kempten	4,35	7,64	0,04
21	Lindenberg	5,36	10,42	0,07
22	List auf Sylt	7,75	18,06	0,20
23	Magdeburg	5,55	10,97	0,08
24	Nürnberg	4,77	8,76	0,05
25	Potsdam	6,28	13,20	0,11
26	Rostock-Warnemünde	7,15	16,02	0,16
27	Saarbrücken-Ensheim	5,29	10,22	0,07
28	Schleswig	6,15	12,79	0,10
29	Schwerin	6,32	13,32	0,11
30	Stuttgart-Echterdingen	4,71	8,60	0,05
31	Trier-Petrisberg	5,95	12,17	0,09
32	Würzburg	5,75	11,57	0,08
33	Zugspitze	9,68	25,19	0,40

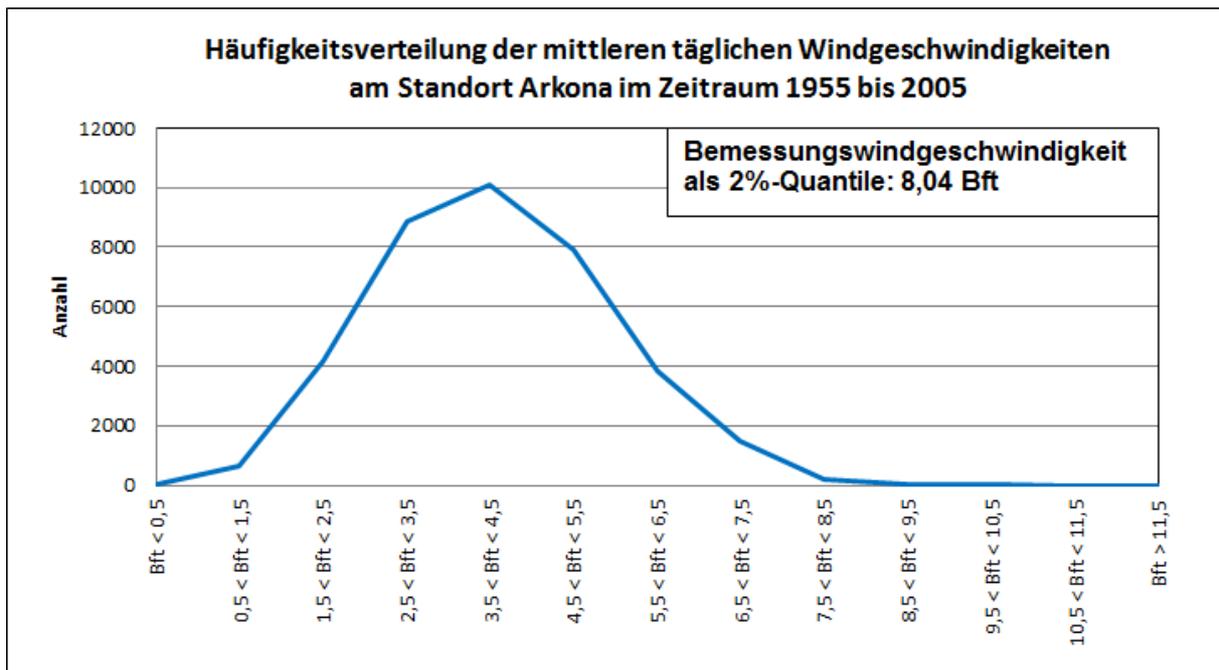


Bild A.1: Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeiten am Standort Arkona

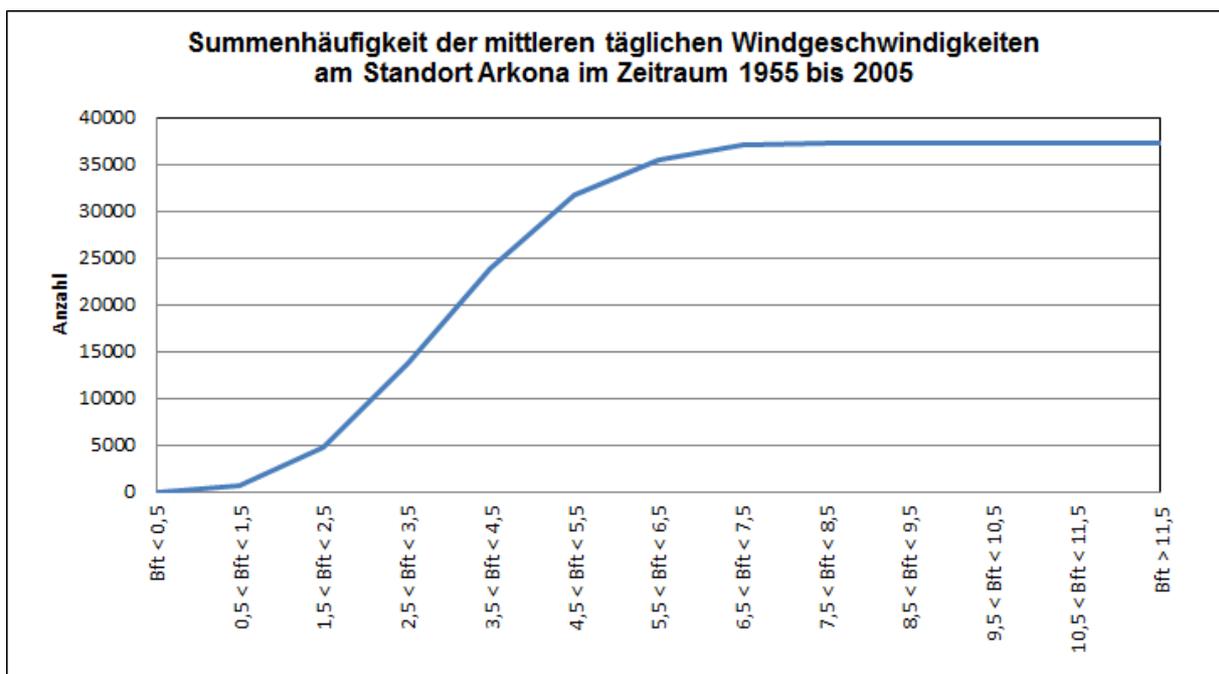


Bild A.2: Summenhäufigkeit der Windgeschwindigkeiten am Standort Arkona

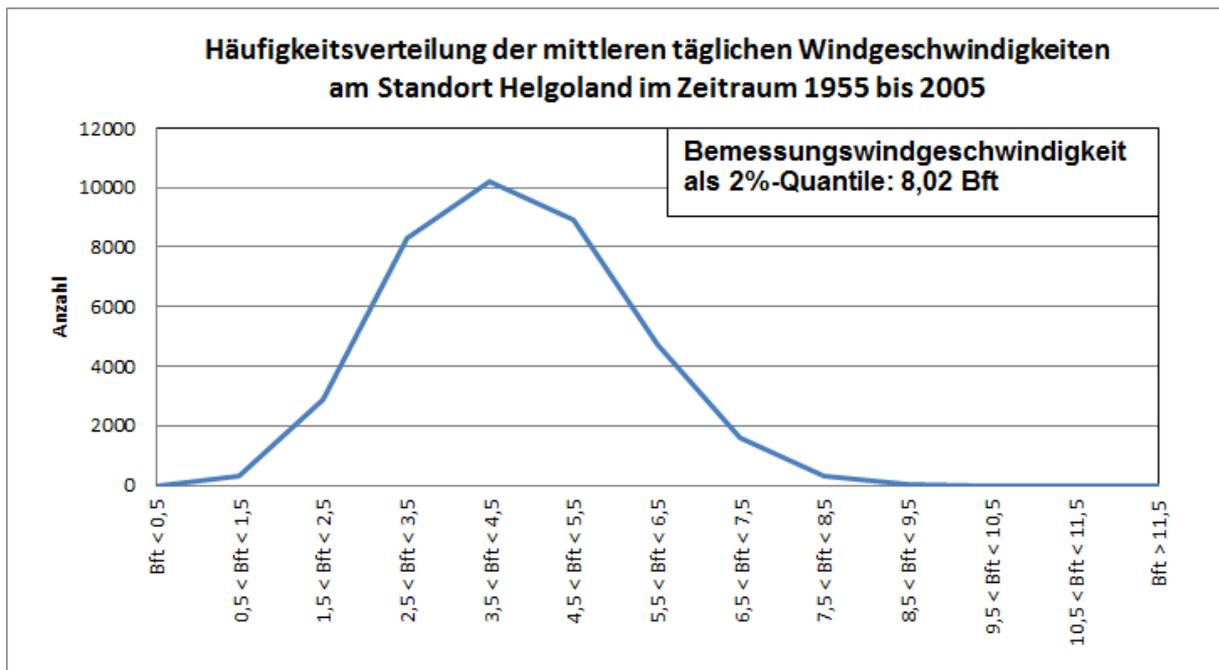


Bild A.3: Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeiten am Standort Helgoland

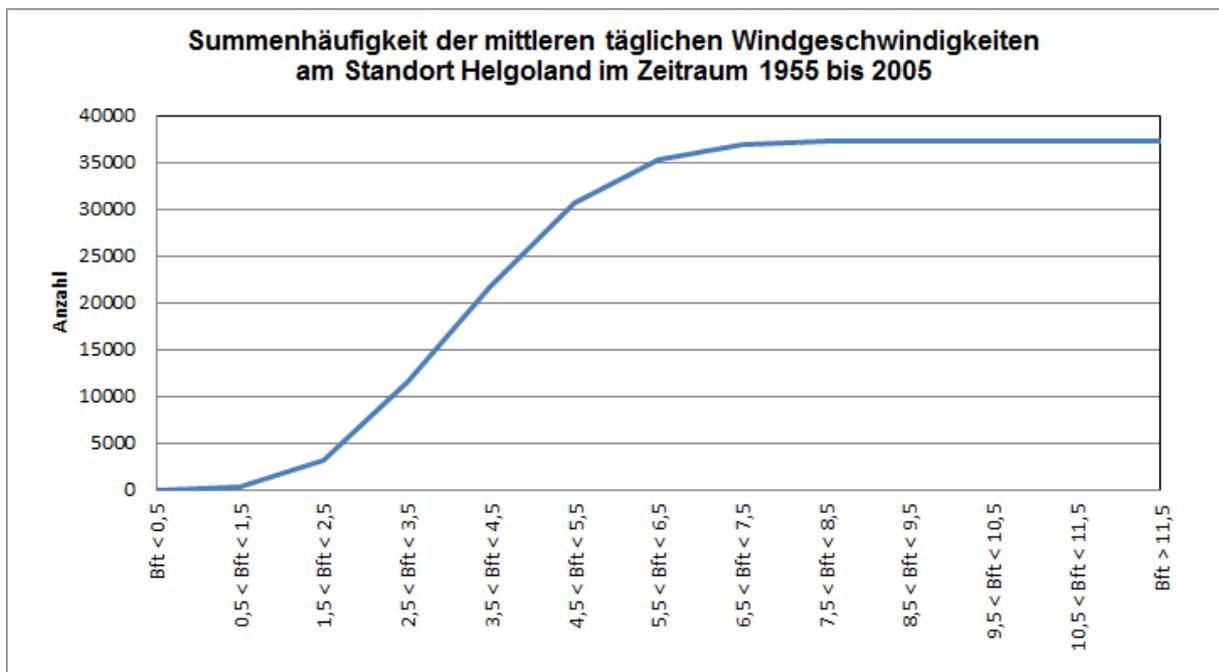


Bild A.4: Summenhäufigkeit der Windgeschwindigkeiten am Standort Helgoland

Anhang B: Ergebnisse aus Simulationerechnungen

Tabelle B 1: Durchhang h in mm und Prüflast S_p in g bei der Ermüdungsprüfung

lichter Abstand der Auflager e [m]	Durchhang h [mm] und Prüflast S_p [g]	E-Modul der Folie [N/mm ²]											
		50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	1000	2000
0,50	h	34	28	24	22	20	19	18	17	17	16		
	S_p	541	649	737	809	869	923	970	1014	1054	1091		
0,55	h	38	33	29	26	24	23	22	21	20	19		
	S_p	573	669	759	832	894	949	998	1042	1083	1121		
0,60	h	44	37	32	29	27	25	24	23	22	21		
	S_p	597	711	805	882	948	1006	1058	1105	1148	1188		
0,65	h	49	40	35	32	29	28	26	25	24	23		
	S_p	634	770	870	953	1023	1086	1142	1192	1239	1283		
0,70	h	54	44	38	35	32	31	29	28	27	26	21	16
	S_p	661	812	915	1001	1076	1141	1200	1253	1302	1348	1671	2100
0,75	h	62	49	43	39	36	34	32	31	30	29	23	18
	S_p	675	838	942	1030	1106	1173	1233	1288	1338	1385	1749	2199
0,80	h	67	53	47	43	40	37	35	34	33	31		
	S_p	703	878	985	1076	1155	1225	1287	1344	1397	1446		
0,85	h	72	57	50	46	42	40	38	36	35	34		
	S_p	740	924	1040	1136	1219	1292	1358	1418	1474	1525		
0,90	h	78	62	54	49	46	43	41	39	38	36		
	S_p	768	956	1082	1181	1267	1343	1411	1473	1531	1584		
0,95	h	85	67	59	54	50	47	45	43	41	40	31	25
	S_p	787	978	1112	1211	1299	1376	1446	1510	1569	1623	2045	2569
1,00	h	92	72	63	57	53	50	48	46	44	42	33	27
	S_p	815	1010	1151	1254	1344	1424	1496	1562	1623	1679	2115	2657

Tabelle B 2: Durchhang h in mm und Prüflast S_p in g bei Böeneinwirkung

lichter Abstand der Auflager e [m]	Durchhang h [mm] und Prüflast S_p [g]	E-Modul der Folie [N/mm ²]											
		50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	1000	2000
0,50	h	46	35	33	31	29	27	26	25	24	23		
	S_p	1112	1422	1519	1631	1740	1840	1931	2014	2092	2164		
0,55	h	56	43	38	36	34	32	30	29	28	27		
	S_p	1123	1420	1598	1688	1796	1896	1989	2074	2153	2227		
0,60	h	64	50	43	40	38	36	34	32	31	30		
	S_p	1180	1476	1699	1803	1910	2014	2111	2201	2284	2362		
0,65	h	49	40	35	32	29	28	26	25	24	23		
	S_p	1270	1577	1803	1962	2071	2179	2282	2377	2467	2550		
0,70	h	78	61	53	48	45	43	41	39	37	36	29	23
	S_p	1332	1647	1877	2065	2186	2296	2402	2501	2594	2682	3309	4152
0,75	h	88	69	60	54	50	48	45	43	42	40	32	25
	S_p	1370	1686	1915	2102	2259	2368	2475	2575	2670	2759	3465	4347
0,80	h	96	75	66	59	55	52	49	47	46	44		
	S_p	1433	1758	1993	2184	2348	2481	2589	2693	2790	2883		
0,85	h	103	81	70	64	59	55	53	51	49	47		
	S_p	1512	1853	2099	2300	2472	2623	2739	2845	2947	3044		
0,90	h	111	88	76	69	64	60	57	55	53	51		
	S_p	1573	1924	2178	2384	2560	2715	2854	2961	3065	3165		
0,95	h	121	96	83	75	70	65	62	59	57	55	44	35
	S_p	1618	1974	2232	2440	2618	2775	2916	3042	3147	3247	4055	5083
1,00	h	130	102	89	81	75	70	67	64	61	59	47	37
	S_p	1679	2044	2309	2523	2706	2867	3012	3144	3261	3364	4195	5258

Anhang C

Auszug aus dem Fraunhofer-Bericht

3 Messungen am Testhaus

3.1 Dachaufbau

Das untersuchte Dach bestand aus Dachabdeckung, Lattung, Konterlattung, Windsperre, Wärmedämmung, Dampfsperre und innenseitiger OSB-Plattenabdeckung (Bild 1). Die Dampfsperre war auf die Sparren aufgetackert und seitlich an der Wand mit Klebedichtmasse geklebt. Für die Messung wurden die OSB-Platten in dem Zwischensparrenabschnitt, in dem die Messung durchgeführt wurde, abgenommen.

3.2 Durchführung der Messung

Um die auf eine Folie und indirekt auf die Klebefugen der Folien wirkenden Kräfte zu erfassen wurden in einem Testhaus im Fraunhofer-Institut für Bauphysik im Unterdachbereich zwei Wägezellen an der warmseitigen Oberfläche einer Dampfsperrefolie angebracht. Mit den Wägezellen wurden die auf die Außenseite der Folie wirkenden Staudrücke erfasst (Bild 2). Gleichzeitig wurden die Druckdifferenz an der Innen- und Außenseite der Dampfsperrefolie und die Windgeschwindigkeit im Freien erfasst. Die Messwerte wurden über einen Zeitraum von zwei Monaten (ca. Oktober/November) aufgezeichnet. Vor Beginn der Messperiode erfolgte eine Überprüfung der Messvorrichtung mit Hilfe einer „Blower-door“-Apparatur bei Unterdruck im Unterdachbereich.

3.3 Messergebnisse

Im Zeitraum vom Oktober bis November wurden innerhalb des gesamten Messzeitraums von zwei Monaten die höchsten Windgeschwindigkeiten mit ca. 15 m/s gemessen. Die Bilder 3 und 4 zeigen die in diesem Zeitraum aufgenommenen Messdaten. Tabelle 1 enthält eine Zusammenstellung der wichtigsten Messdaten dieses Zeitraums. An der untersuchten Dampfbremssperrefolie wurden im betrachteten Zeitfenster an den Wägezellen in Sparrenmitte Belastungen bis zu 80 g und in 15 cm Abstand zum Sparrenrand bis zu 32 g gemessen. Die maximale Druckdifferenz an den beiden Dampfsperrefolienseiten betrug ca. 33 Pa. Auf der Basis von Windgeschwindigkeiten können die am Bauwerk anliegenden Staudrücke berechnet werden. Nach Tabelle 2 lässt sich ein Staudruck von ca. 141 Pa bei einem „steifen Wind“ (15 m/s) nach Beaufort [1] berechnen.

6.2.1 Kräfte an Folie bei unterschiedlichen Dachsituationen

Geht man, wie in Bild 1 dargestellt und messtechnisch untersucht, von einem Dachaufbau mit Dacheindeckung, Unterspannbahn, Wärmedämmung und Dampfsperre aus, ist mit einer wesentlichen einbaubedingten Abschwächung der außen am Dach anliegenden Staudrücke zu rechnen. Im Versuch (Punkt 4.2.1, Tabelle 1 und 2) wurden bei einem auf Basis der außen gemessenen Windgeschwindigkeit berechneten Staudruck außen am Dach von 63 Pa kurzzeitig direkt an der Folie eine Druckdifferenz von 20 Pa gemessen. Bei einem ebenfalls auf Basis der Windgeschwindigkeit berechneten Druck von 140 Pa wurden kurzzeitige Druckspitzen bis 33 Pa Differenzdruck gemessen. Nimmt man den Fall, dass bei eingebauter Dampfsperre und Wärmedämmung an einem Dach ohne Windsperre die Dacheindeckung ersetzt wird, liegen wie bei den Übertragungsmessungen im Dichtheitsprüfstand (Punkt 4) die Staudrücke mit geringer Abminderung direkt an der Folie an.

- a) Bei Messungen am Dach eines Testhauses wurden bei Windgeschwindigkeiten von maximal 15 m/s Differenzdrücke an der Dampfsperrfolie im eingebauten Dach von maximal 33 Pa gemessen. Die Wägezellenmessung in Sparrenfeldmitte ergab max. 80 g. Der auf Basis der Windgeschwindigkeit berechnete Staudruck außen am Haus war, durch die Einbausituation bedingt, zum tatsächlich an der Folie gemessenen Druck um ein Drittel bis ein Viertel reduziert.

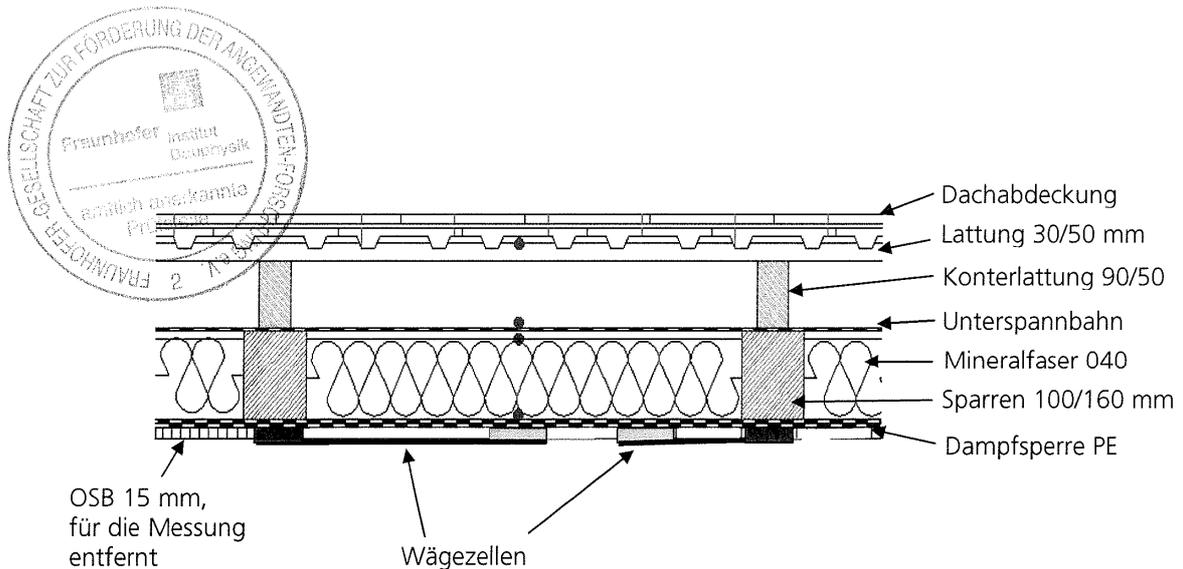


Bild 1: Querschnittszeichnung des Testdaches mit Wägezellen an der Innenoberfläche der Dampfsperrfolie .

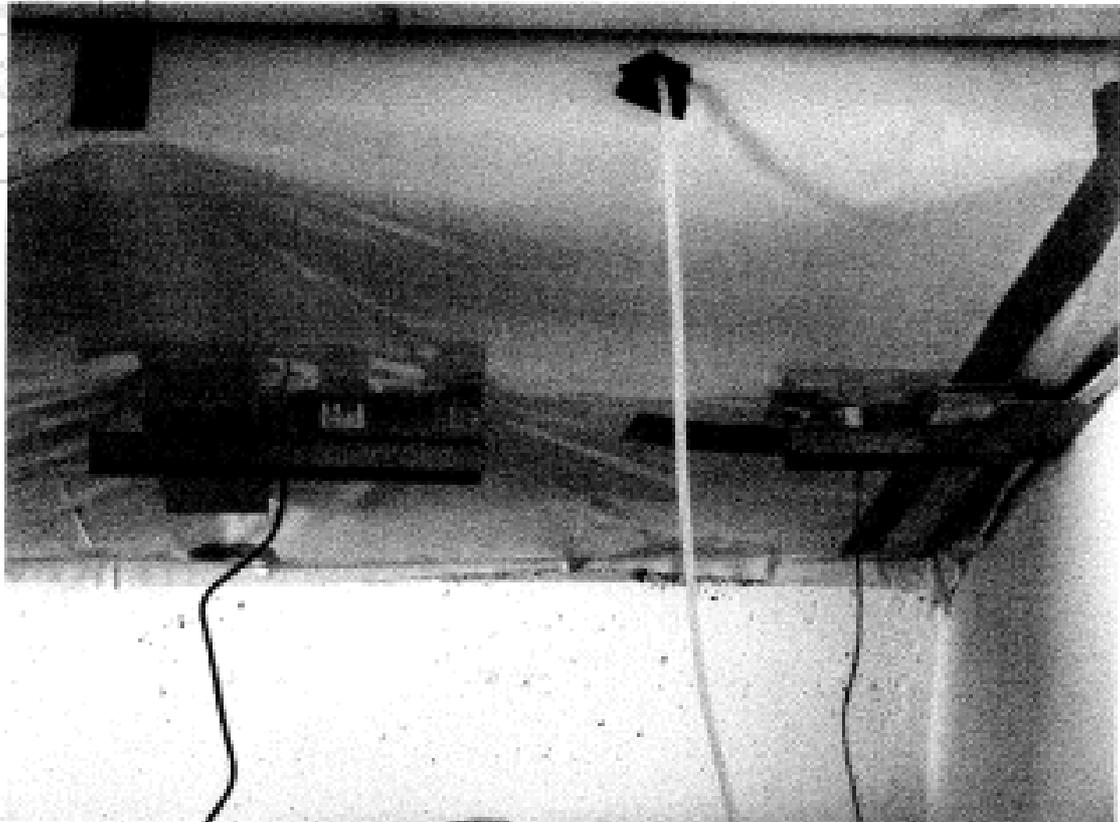


Bild 2: Montage von Wägezellen im Testhaus zur Ermittlung der auf die Folie wirkenden Kräfte. Zusätzlich wurden die Windgeschwindigkeiten sowie der Differenzdruck vor und hinter der Folie über eine Dauer von zwei Monaten gemessen.

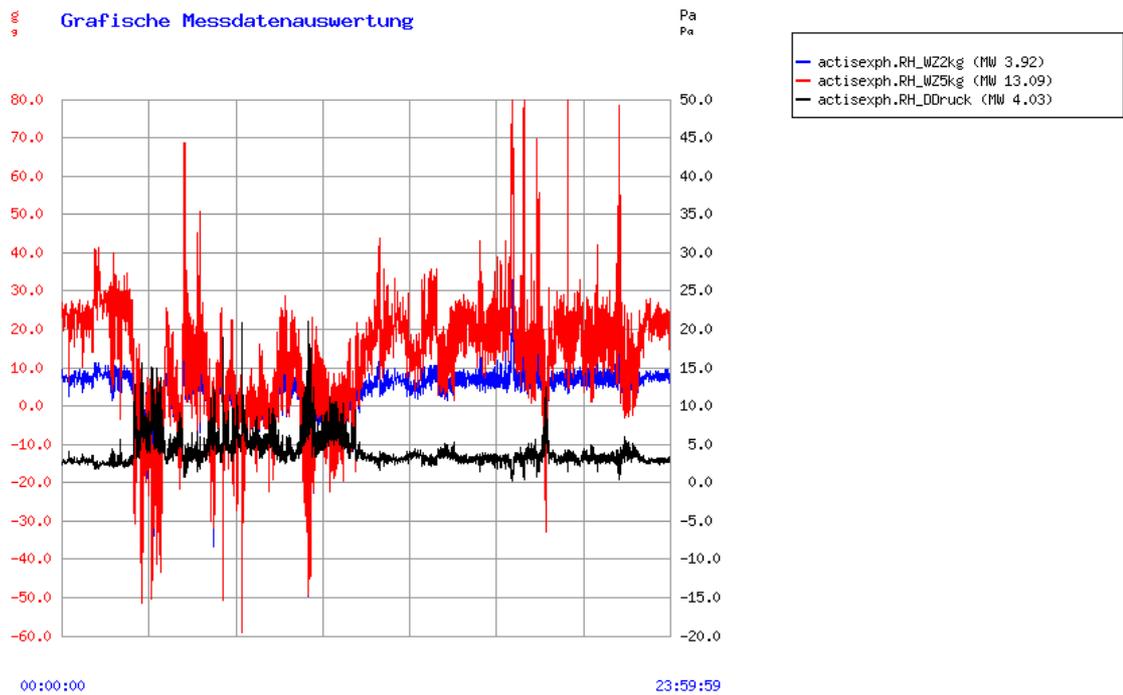
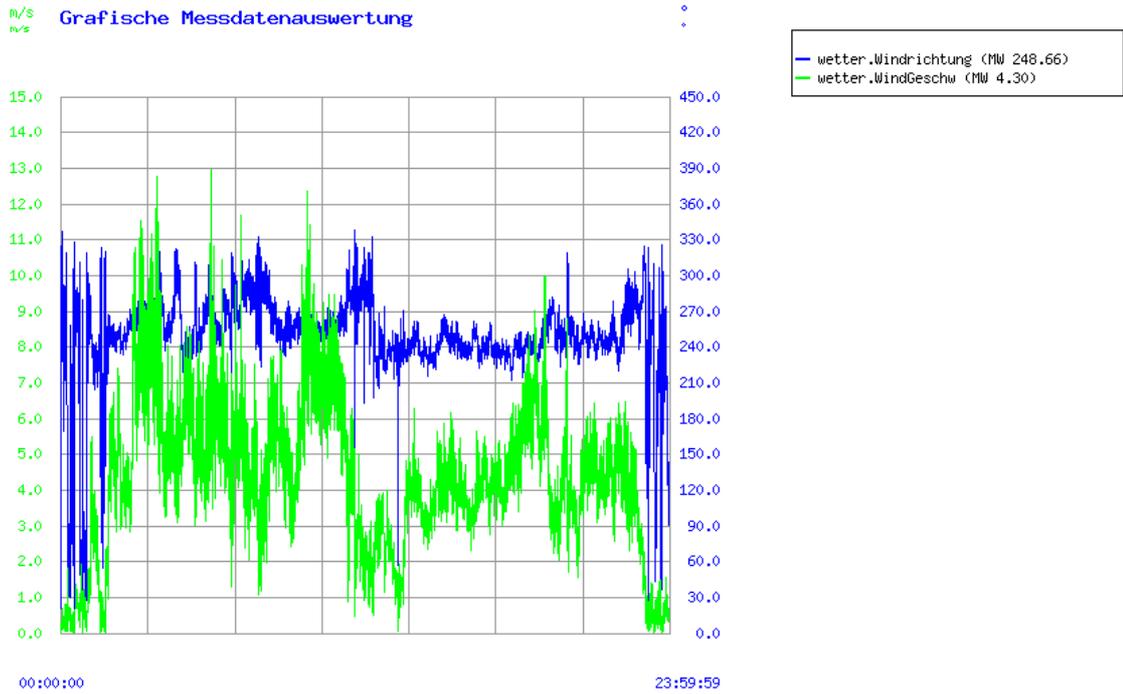


Bild 3: Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen (oben) sowie Differenzdruck und Massen der beiden Wägezellen an der Dampfsperffolie (unten)

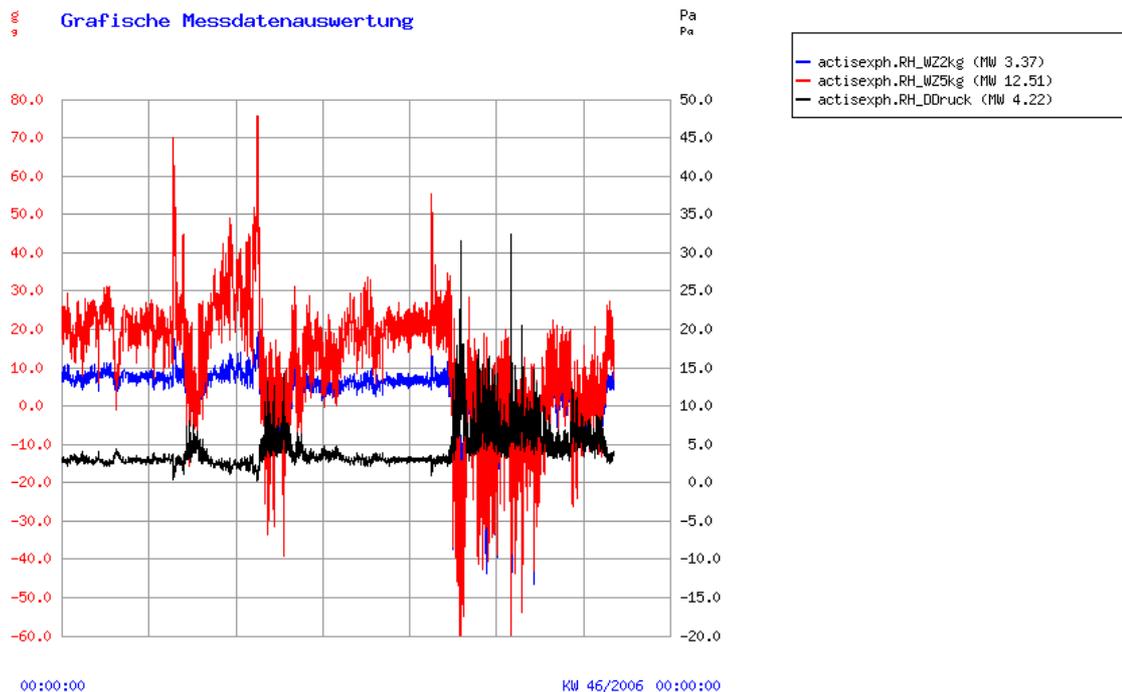
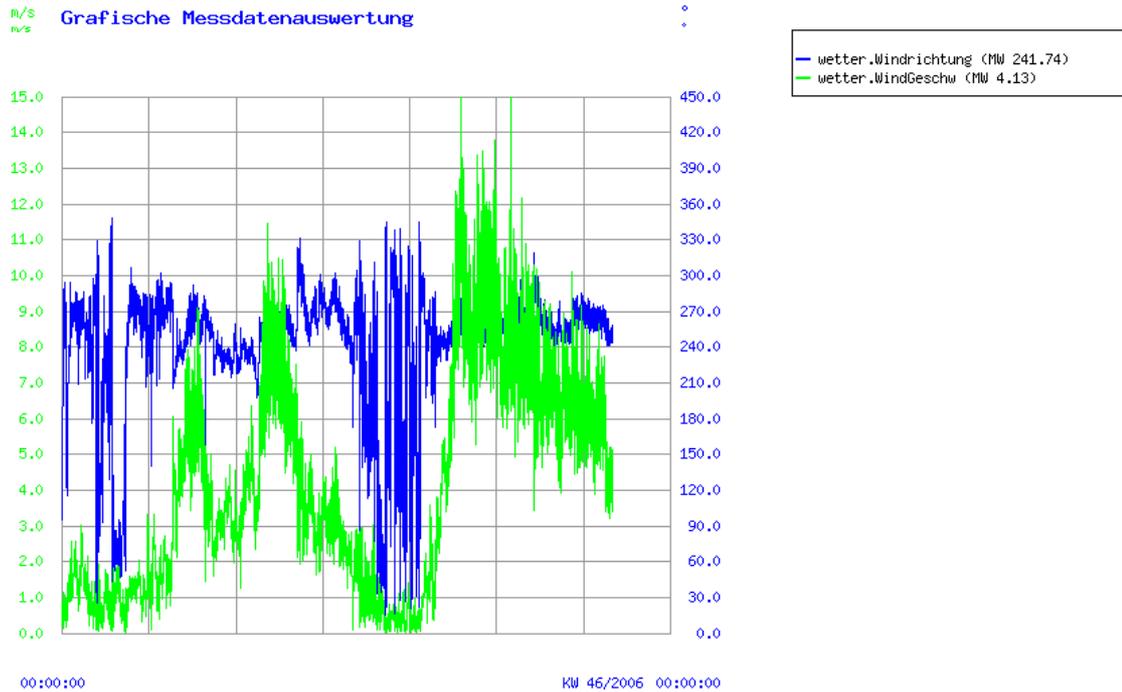
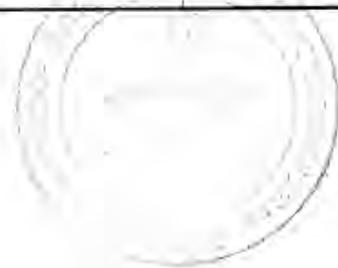


Bild 4: Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen (oben) sowie Differenzdruck und Massen der beiden Wägezellen an der Dampfsperffolie (unten)
 In dieser Woche wurden Windgeschwindigkeiten bis 15 m/s gemessen (siehe Bild oben), während an den Wägezellen eine maximale Masse von ca. 77 g angezeigt wurde.

Tabelle 1: Messergebnisse der Dachuntersuchungen am Experimentierhaus
Auswertung von den zwei Wochen mit den größten Windgeschwindigkeiten innerhalb des gesamten Testzeitraums von zwei Monaten.

	Messwerte	
	Wind- geschwindigkeit	Differenzdruck an Folienoberfläche
	m/s	Pa
Maximalwerte im Auswertzeitraum	15	33
Vergleichswerte	10	20
Mittelwert über Auswertzeitraum	4	4



Literatur:

- [1] DIN EN 1991-1-4:2010-12 Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1 – 4: Allgemeine Einwirkungen – Windlasten
- [2] DIN EN 1990:2010-12 Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung
- [3] Plate, E. J.: Statistik und angewandte Wahrscheinlichkeitslehre für Bauingenieure, Verlag Ernst und Sohn, Berlin 1993
- [4] Mondorf Wetter Malte Neuper, Dipl.-Met. Adenauerplatz 3A 53859 Niederkassel-Mondorf
<http://www.mondorf-wetter.de/regiowind/beaufort.htm>
- [5] DWD Wetterlexikon
<http://www.deutscher-wetterdienst.de/lexikon/index.htm?ID=B&DAT=Beaufort-Skala>
- [6] DIN EN 1991-1-4/NA:2010-12 Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1 – 4: Allgemeine Einwirkungen – Windlasten
- [7] Fraunhofer-Institut Holzkirchen: „Untersuchung von geklebten Dampfbremsfolien im Dach und Übertragung der Ergebnisse auf Kleinprobekörper unter Berücksichtigung der Kaltflusseigenschaften von Dampfsperren-Klebedichtmassen“, Prüfbericht P17-128.1/2007
- [8] DIN 4108-7
- [9] BRE Digest 346 „The assessment of wind loads – Part 7: Wind speeds for serviceability and fatigue assessment“
- [10] DIN 205
- [11] Satas, D. (ed.): “Handbook of Pressure Sensitive Adhesive Technology”; Van Nostrand Reinhold, Edition 2, 1989 (S. 247 ff)
- [12] ASTM – American Society for Testing Material: “Standard Practice of Accelerated Aging of Pressure-Sensitive Tapes” Designation D 3611-89
- [13] Klaesson, Torbjörn: SP METHODE 1380 Edition 2; Method Discription, Materials Technology – Polymer Technology. Edition 2, 1995