

An den Gewerbewiesen 16
D-67374 Hanhofen
Tel. 06344 - 508 789
e-Mail:
IB.Theurer.SP@t-online.de

**Masthähnchenställe 2 und 3 der Familie Höckmeier
in Eschelbach a. d. Ilm**

Einfluss des Waldes auf die Ableitbedingungen der Abgase

Auftraggeber:

Josef und Renate Höckmeier, Eschelbach a. d. Ilm

Wolfgang Theurer, Dr.-Ing.

Wolfgang Bächlin, Dr.-Ing.

Bericht P3271B, Umfang 60 Seiten

23.03.2020

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	4
1. Veranlassung	6
2. Überhöhung der Abgasfahnen und Rezirkulationszonen	9
3. Untersuchungsgrundlagen	11
3.1 Modellgebiet	11
3.2 Modellierung der Bebauung und Anordnung der Abgaskamine	11
3.3 Modellierung des Waldes	14
3.4 Untersuchte Windrichtungen und Anströmbedingungen	15
3.5 Untersuchungsmethoden	18
3.5.1 Strömungssichtbarmachung	18
3.5.2 Geschwindigkeitsmessungen	20
4. Strömungssichtbarmachungen	21
4.1 Vorversuche mit dem Hügel ohne Wald	21
4.2 Strömungssichtbarmachungen mit dem bewaldeten Hügel (Bestand)	23
4.2.1 Ställe auf der Leeseite des Hügels (Windrichtungen 60 und 80 Grad)	23
4.2.2 Ställe auf der Luvseite des Hügels (Windrichtungen 240 und 260 Grad)	26
4.2.3 Talparallele Strömung (Windrichtungen 160 und 180 Grad)	28
4.3 Strömungssichtbarmachungen mit dem bewaldeten Hügel (Planung)	28
4.3.1 Ställe auf der Luvseite des Hügels (Windrichtungen 240 und 260 Grad)	30
4.3.2 Talparallele Strömung (Windrichtungen 160 und 180 Grad)	30
5. Geschwindigkeitsmessungen	33
5.1 Darstellung der Ergebnisse und Positionen der Messpunkte	33
5.1.1 Darstellung der Ergebnisse	33
5.1.2 Positionen der Messpunkte	33

5.2 Ställe auf der Leeseite des Hügels (Windrichtungen 60 und 80 Grad, nur Bestand)	35
5.3 Ställe auf der Luvseite des Hügels (Windrichtungen 240 und 260 Grad)	37
5.4 Talparallele Strömung (Windrichtungen 160 und 180 Grad)	38
6. Schlussfolgerungen	42
7. Literatur	44
Anhang	
A1 Beschreibung des Windkanals	46
A2 Ähnlichkeitsgesetze und Anforderungen an Modellversuche	47
A2.1 Geometrische Ähnlichkeit	47
A2.2 Modellierung des Waldes	48
A2.3 Anströmrenzschicht	50
A2.4 Einfluss der Reynoldszahl	53
A3 Messtechnik	54
A3.1 Strömungssichtbarmachung mit Windfähnchen	54
A3.2 Geschwindigkeitsmessungen	55

Zusammenfassung

Die Familie Höckmeier betreibt in Eschelbach an der Ilm in der Nähe von Wolnzach (Oberbayern) mehrere Masthähnchenställe. Zwei der Ställe, MHS 2 und MHS 3, befinden sich außerhalb der Ortslage unmittelbar an der Waldkante am westlichen Fuß eines stark ansteigenden, bewaldeten Hügels. Im Rahmen einer geplanten Betriebserweiterung um zwei weitere Ställe wurde 2015 durch das Büro Hooock Farny Ingenieure (HFI, 2015), Landshut, ein Immissionschutztechnisches Gutachten erstellt. In diesem Gutachten wurde für die beiden bestehenden Ställe MHS 2 und MHS 3 bei der Berechnung der Immissionskonzentrationen der lufttransportierten Stoffe eine Überhöhung der Abgasfahnen angesetzt. Dies wurde von Gegengutachtern mit Hinweis auf eine Rezirkulationszone, die sich hinter der Waldkante auf der windabgewandten Seite des bewaldeten Hügels einstellen würde, als nicht sachgerecht bemängelt. Bei einer Freisetzung von Abgasen in Rezirkulationszonen, wie sie sich z. B. hinter Gebäuden einstellen, darf keine Überhöhung von Abgasfahnen angesetzt werden.

Da die Erfassung des Einflusses des Waldes auf die Strömung, insbesondere in Kombination mit dem Hügel, mit gängigen numerischen Modellen nicht möglich ist, wurde für die in dem Gutachten von HFI (2015) dargestellte Abgasführung der Ställe MHS 2 und MHS 3 (Einzelkamine entlang der Firstlinien) eine physikalische Modellierung im Windkanal des Ingenieurbüros Theurer, Hanhofen, durchgeführt. Dabei waren insbesondere folgende Fragen zu beantworten:

- Stellt sich hinter der Waldkante auf der windabgewandten Seite des bewaldeten Hügels eine Rezirkulationszone wie hinter Gebäuden, d. h. im Sinne der VDI 3781 Blatt 4 (2017), ein?
- Bildet sich bei Anströmung aus entgegengesetzter Richtung vor dem Waldrand auf der windzugewandten Seite des Hügels ein Frontwirbel aus?

Gegen die Genehmigung der Betriebserweiterung wurde erfolgreich geklagt. Für den neuen Genehmigungsantrag wurde von Hooock & Partner Sachverständige PartG mbG (HPS) ein weiteres Gutachten mit geänderten Randbedingungen erstellt (HPS, 2020). Nach der neuen Planung werden die Abgase der Ställe MHS 2 und MHS 3 über zwei zentrale Wäscher und Kamine an den nördlichen Giebelseiten geführt. Auch diese Planung wurde im Windkanal des Ingenieurbüros Theurer näher betrachtet. Zu untersuchen war, ob mit den geplanten Wäschergebäuden und neuen Standorten der Kamine die Ergebnisse der vorangegangenen Untersuchung für Einzelkamine entlang der Firstlinien weiter gelten.

Bei den untersuchten Windrichtungen 60 Grad und 80 Grad liegen beide Ställe hinter der Waldkante auf der windabgewandten Leeseite des Hügels. Für den Bestand zeigte sich im Bereich der Abgasfahnen eine deutliche Beeinflussung der Strömung durch den Wald.

Es lag aber keine Rezirkulationszone im Sinne der VDI 3781 Blatt 4 (2017) vor, die eine so wesentliche Beeinflussung darstellen würde, dass auf den Ansatz einer Überhöhung vollständig verzichtet werden müsste. Die Strömungsgeschwindigkeiten hinter dem Wald sind bei diesen Windrichtungen zudem so gering, dass eine Abgasfahnenüberhöhung zumindest in abgeminderter Form angesetzt werden kann.

Da aber aufgrund der derzeit vorhandenen Daten nicht quantifiziert werden kann, in welchem Umfang eine Abminderung zu erfolgen hat, wurde in dem immissionsschutztechnischen Gutachten von HPS (2020) bei den Ausbreitungsrechnungen im Sinne konservativer Immissionswerte von dem Ansatz einer Überhöhung der Abgasfahnen im gesamten Windrichtungssektor zwischen 50 Grad und 90 Grad, d.h. bei einer Anströmung aus Nordost bis Ost über den bewaldeten Hügel, abgesehen. Daher wurde die Planungssituation bei diesen Windrichtungen nicht erneut untersucht.

Bei Winden aus westlichen Richtungen (240 – 260 Grad), bei denen sich die Ställe auf der windzugewandten Luvseite des bewaldeten Hügels befinden, bildet sich vor dem Wald kein Frontwirbel aus, der die Abgasfahne unmittelbar zum Boden hin transportieren würde. Es ist daher legitim, bei diesen Windrichtungen sowohl für die Einzelkamine entlang der Firstlinien als auch für die Planung eine Überhöhung der Abgasfahnen anzusetzen. Gleiches gilt für Winde aus südlichen Richtungen (160 – 180 Grad), bei denen die Strömung parallel zum Tal bzw. Hang verläuft.

1. Veranlassung

Die Familie Höckmeier verfügt auf der Gemarkung Eschelbach a. d. Ilm in der Nähe des Marktes Wolnzach (Oberbayern) über insgesamt 5 Masthähnchenställe (folgend Ställe MHS 1 bis MHS 5 genannt, siehe Abbildung 1.1). Stall MHS 1 befindet sich an der Hofstelle der Familie Höckmeier in der Ortslage von Eschelbach, die übrigen Ställe MHS 2 bis MHS 5 liegen außerhalb des Ortes in südlicher Richtung.

Zusammen mit der Errichtung und Inbetriebnahme der beiden neuen Masthähnchenställe MHS 4 und MHS 5 war bei den bestehenden und weiterhin zu betreibenden Ställen MHS 2 und MHS 3 eine Ertüchtigung der Abgasableitung (Erhöhung der Abgaskamine, Einbau leistungstärkerer Ventilatoren) und eine Stilllegung der Anlage MHS 1 geplant.

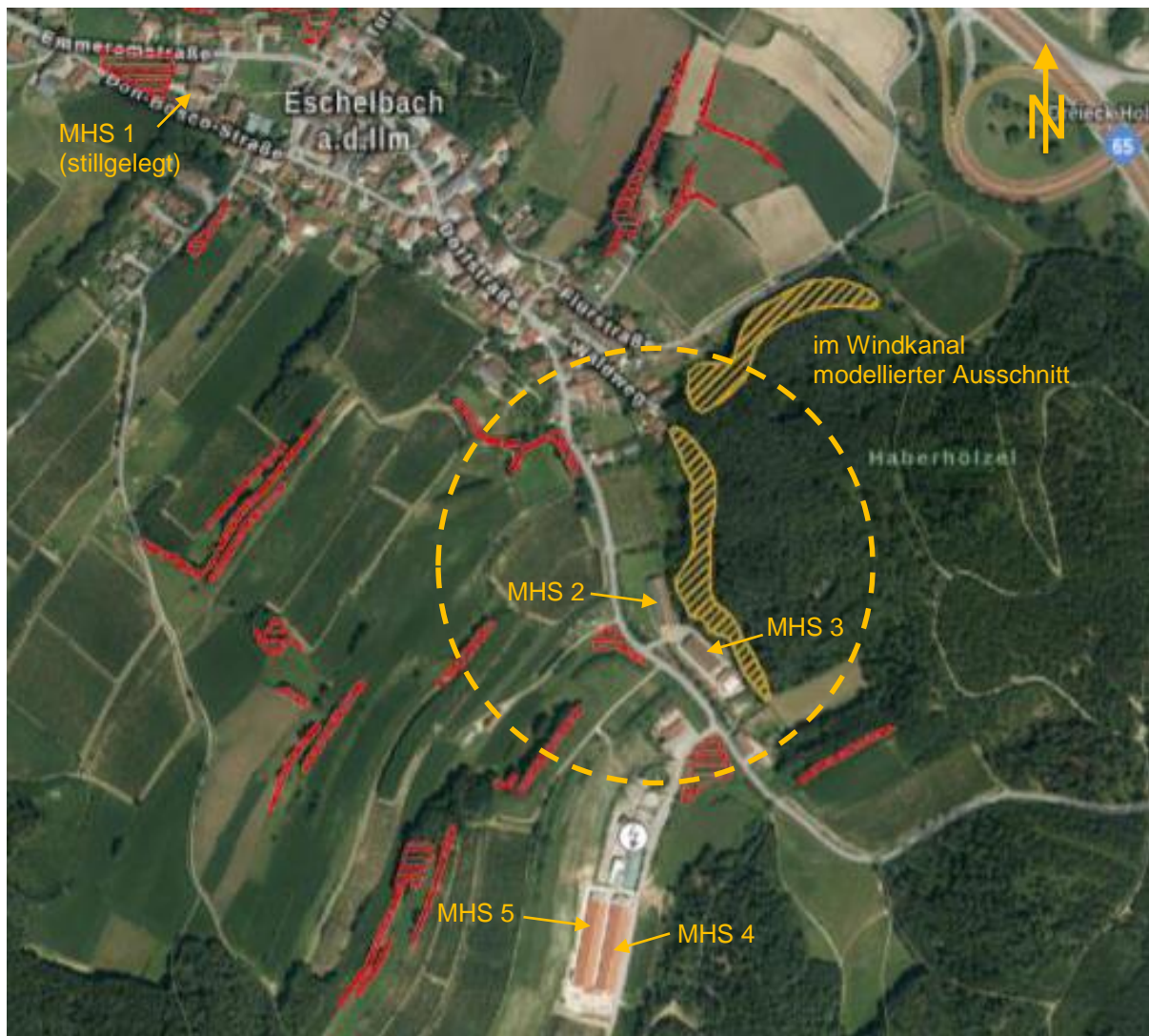


Abb. 1.1: Standorte der Masthähnchenställe MHS 1 – MHS 5 der Familie Höckmeier (Quelle Luftbild: HFI, 2020). Markiert sind zusätzlich der im Windkanal modellierte Ausschnitt (orange) und Biotopflächen (rot).

Da es sich bei dem Vorhaben um eine Erweiterung bzw. Änderung einer immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftigen Anlage handelt, wurde im August 2015 im Auftrag des künftigen Betreibers durch Hoock Farny Ingenieure, Landshut, ein immissionsschutztechnisches Gutachten (HFI, 2015) für die Errichtung und den Betrieb der neuen Ställe MHS 4 und MHS 5 erstellt. Dieses Gutachten bezog die Änderungen an den Ställen MHS 2 und MHS 3 mit ein.

Unter anderem auf der Grundlage dieses Gutachtens erfolgte eine Genehmigung durch das LRA Pfaffenhofen vom 10.07.2017 für die Errichtung und den Betrieb der beiden neuen Masthähnchenställe MHS 4 und MHS 5, die Sanierung der bestehenden Ställe MHS 2 und MHS 3, und die Stilllegung des Stalles MHS 1 in der Ortslage.

Die Masthähnchenställe MHS 4 und MHS 5 sind zwischenzeitlich vollständig errichtet. Bei den Ställen MHS 2 und MHS 3 wurden im Zuge der Lüftungstechnischen Sanierung die einzelnen, entlang der Firstlinien installierten Abgaskamine von 1.5 m auf 4 m über First erhöht. Der Stall MHS 1 wurde stillgelegt.

Gegen die Genehmigung wurde vor dem Bayerischen Verwaltungsgericht München geklagt. Die Klage stützte sich auch auf Gegengutachten bzw. Stellungnahmen zu dem immissionsschutztechnischen Gutachten von HFI (2015), in denen dem Gutachten Mängel vorgeworfen werden.

Genannt wurde u. a. die Nichtberücksichtigung des Einflusses des Waldes auf dem stark ansteigenden Hügel unmittelbar östlich der Ställe MHS 2 und MHS 3 auf die Ausbreitung. In den Stellungnahmen wurde postuliert, dass der aufgrund des Waldeinflusses nicht sachgerechte Ansatz einer Überhöhung der Abgasfahnen zu einer fehlerhaften Modellierung der Quellbedingungen führe. Nach den Ausführungen der Gegengutachter folgten daraus eine Unterschätzung der Immissionen an den Beurteilungspunkten und eine Nichteinhaltung der Grenzwerte.

Der kombinierte Einfluss des Waldes und der Topografie auf das Strömungsfeld und die Immissionen ist rechnerisch schwierig zu erfassen, wie auch die Gegengutachter zugestehen. Während die Topografieeinflüsse, soweit möglich, über das diagnostische Windfeldmodell TALDIA berücksichtigt werden, geht die Wirkung des Waldes auf die Strömung und Ausbreitung nur über die Rauigkeitslänge in die Berechnung ein. Sich etwa hinter dem Wald einstellende Rezirkulationszonen werden nicht erfasst.

Ausgehend von der dem Gutachten von HFI (2015) zugrunde liegenden Situation mit den entlang der Firste der Ställe MHS 2 und MHS 3 angeordneten einzelnen Abgaskaminen wurden daher folgende Fragestellungen an einem physikalischen Modell im Grenzschichtwindkanal des Ingenieurbüros Theurer, Hanhofen, untersucht:

- Wie beeinflusst die Kombination aus Waldrand und Hügel die Strömung im Bereich der Masthähnchenställe MHS 2 und MHS 3?
- Bilden sich bei einer Anströmung über den Hügel hinter der nahe der Abgaskamine der Ställe MHS 2 und MHS 3 gelegenen Waldkante Rezirkulationszonen wie hinter für den Wind undurchlässigen Gebäuden aus, so dass die freigesetzten Abgase zunächst zum Boden hin verfrachtet werden, was zu erhöhten bodennahen Schadstoffkonzentrationen führen würde?
- Gibt es bei einer Anströmung aus entgegengesetzter Richtung einen Frontwirbel vor dem Wald, der Schadstoffe unmittelbar zum Boden hin transportiert?

Mit Urteil vom 22.03.2019 wurde die Genehmigung wegen fehlender Privilegierung aufgrund einer zu geringen Futtergrundlage für den beantragten Tierbestand aufgehoben. Dadurch wird ein neuer Genehmigungsantrag erforderlich.

Für den neuen Genehmigungsantrag (siehe hierzu den Entwurf des immissionsschutztechnischen Gutachtens zur Luftreinhaltung von Hock & Partner Sachverständige PartG mbG, Landshut, Stand 03.02.2020) wurden u. a. der Tierbestand reduziert und die Abgasführung der Ställe MHS 2 und MHS 3 geändert. Anstelle über jeweils zehn Einzelkamine entlang der Firste ist nun geplant, die gesamten Abgase von MHS 2 und MHS 3 über Abgasreinigungsanlagen (Abgaswäscher) und Kamine an den nordwestlichen Giebelfassaden zu führen. In die neuen Ausbreitungsrechnungen flossen dabei die Erkenntnisse aus den bereits durchgeführten Windkanaluntersuchungen hinsichtlich des Ansatzes von Überhöhungen bei den Abgasfahnen ein. Im Windkanal wurde überprüft, ob die bisherigen Ergebnisse für die Kamine entlang der Firste auch für die Kamine auf den geplanten Wäschern Gültigkeit haben.

2. Überhöhung der Abgasfahnen und Rezirkulationszonen

Das immissionsschutztechnische Gutachten von HFI (2015) ging bei der Ermittlung der Immissionen davon aus, dass es bei der Betrachtung der Abgaskamine als Emissionsquellen zulässig ist, bei der Bestimmung der effektiven Quellhöhe eine Überhöhung der Abgasfahnen anzusetzen. Nach Meinung der Gegengutachter ist dagegen der Ansatz einer Abgasfahnenüberhöhung nicht sachgerecht, da die Anforderungen nach VDI 3783 Blatt 13 (2010) an einen ungestörten Abtransport der Abgase mit der freien Luftströmung nicht alle erfüllt seien:

„Eine Berechnung der Überhöhung aus Schornsteinen ist nur sachgerecht, wenn ein ungestörter Abtransport mit der freien Luftströmung gewährleistet ist (siehe auch TA Luft, Abschnitt 5.5). Dies ist im Allgemeinen der Fall, wenn

- *die Quellhöhe mindestens 10 m über der Flur und 3 m über First beträgt und*
- *die Abluftgeschwindigkeit in jeder Betriebsstunde mindestens 7 m/s beträgt (siehe auch VDI 2280) und*
- *keine wesentliche Beeinflussung durch andere Strömungshindernisse (Gebäude, Vegetation usw.) im weiteren Umkreis um die Quelle zu erwarten ist. Dieser Abstand wird für jedes Hindernis als das Sechsfache seiner Höhe bestimmt.“ (Zitat VDI 3783 Blatt 13, 2010)*

Insbesondere die dritte Anforderung sei nicht erfüllt, da eine wesentliche Beeinflussung durch den Waldbestand in der Nähe der Quellen zu erwarten sei. Dies schließe die Annahme eines „ungestörten Abtransports der Abgase mit der freien Luftströmung“ aus.

Der zentrale Begriff des „ungestörten Abtransports der Abgase mit der freien Luftströmung“ ist beispielsweise in „Weiterentwicklung ausgewählter methodischer Grundlagen der Schornsteinhöhenbestimmung und Ausbreitungsrechnung nach TA Luft“ (Janicke, Janicke, Bächlin und Theurer, 2018) definiert:

„In der TA Luft und auch in anderen Regelwerken und Richtlinien hat sich der Begriff des „ungestörten Abtransportes von Abgasen mit der freien Luftströmung“ festgesetzt. Gemeint ist damit die Ableitung der Abgase so, dass sie nicht in den direkten Einflussbereich von Gebäuden und sonstigen Hindernissen gelangen. ...

Der Ausdruck „ungestörter Abtransport“ ist allerdings missverständlich, weil ein gänzlich ungestörter Abtransport, d.h. die Ableitung in einen Bereich der atmosphärischen Grenzschicht, die nicht durch die Bebauung und andere Hindernisse beeinflusst ist, zu unrealistisch hohen Schornsteinhöhen führen würde. Der Ausdruck „ungestörter Abtransport von Abgasen mit der freien Luftströmung“ ist daher als eine Konvention im Sprachgebrauch zu sehen. Gemeint ist hiermit eine Freisetzung außerhalb der in Abschnitt 2.1.1 näher definierten Rezirkulationszonen oder Störzonen der Hindernisse. ...

Die Anforderungen und Randbedingungen für einen „ungestörten Abtransport mit der freien Luftströmung“ im Sinne dieser Definition werden in der überarbeiteten Richtlinie VDI 3781 Blatt 4 (Ausgabe Juli 2017) „Umweltmeteorologie – Ableitbedingungen für Abgase – Kleine und mittlere Feuerungsanlagen sowie andere als Feuerungsanlagen“ allgemein dargelegt. ...“ (Zitat Weiterentwicklung ausgewählter methodischer Grundlagen der Schornsteinhöhenbestimmung und Ausbreitungsrechnung nach TA Luft“, 2018)

In der VDI 3781 Blatt 4 (2017) werden die Höhen und Längen von Rezirkulationszonen beschrieben für:

- einzeln stehende Gebäude mit einer Abgasableitungsrichtung ohne Nachbargebäude oder sonstige Hindernisse,
- Gebäude mit einer Abgasableitungsrichtung und Beeinflussung durch benachbarte Gebäude,
- Gebäude mit einer Abgasableitungsrichtung und Aufbauten,
- Gebäude an Hanglagen.

Rezirkulationszonen sind gekennzeichnet durch verringerte Windgeschwindigkeiten innerhalb der Zonen und eine erhöhte Turbulenz, vor allem aber gerichtete Geschwindigkeitskomponenten zum Boden und zurück zum Gebäude hin (siehe auch Abbildung A3.1 in Anhang A3). Aufgrund der an den Gebäuden meist klar definierten Ablösekanten sind Rezirkulationszonen weitgehend zeitlich stabile, ortsfeste Wirbel. In die Zonen eingebrachte Abgase werden zunächst zum Boden hin verfrachtet, was zu erheblich erhöhten bodennahen Schadstoffkonzentrationen führt. Deshalb besteht Konsens darüber, dass bei Quellen, wenn sie überhaupt in Rezirkulationszonen emittieren, kein ungestörter Abtransport der Abgase mit der freien Luftströmung stattfindet und keine Überhöhung der Abgasfahne angesetzt werden darf.

In der Richtlinie finden sich allerdings keine Vorgaben für teilweise durchströmbare Strukturen ohne definierte Ablösekanten, wie z.B. Wald, sondern es wird dann auf die Durchführung von Einzelfalluntersuchungen hingewiesen. Daher wurde zur Beantwortung der Fragen, ob sich hinter der Waldkante eine Rezirkulationszone im Sinne der VDI 3781 Blatt 4 (2017) ausbildet oder, bei Anströmung aus der Gegenrichtung, vor dem Wald ein Frontwirbel wie bei undurchlässigen Bauwerken entsteht, eine Windkanaluntersuchung im Grenzschichtwindkanal des Ingenieurbüros Theurer, Hanhofen, durchgeführt. Werden bei Windkanaluntersuchungen die Modellgesetze (siehe Anhang A2) eingehalten, gibt dieses Verfahren die Einflüsse der Topografie, der Bebauung und des Waldbestandes auf die Strömungs- und Ausbreitungsvorgänge naturgetreu wieder.

3. Untersuchungsgrundlagen

3.1 Modellgebiet

In Abbildung 1.1 ist der im Windkanal nachgebildete Bereich mit etwa 600 m Durchmesser und den beiden Ställen MHS 2 und MHS 3 dargestellt. Beide Ställe befinden sich unmittelbar an der Waldkante am westlichen Hangfuß des steil ansteigenden Hügels (siehe Abbildung 3.1) westlich der A 9 auf Höhe des Autobahndreiecks Holledau. Nach Norden reicht das Windkanalmodell (Abbildung 3.2) bis zu den ersten Gebäuden am südlichen Ortsausgang von Eschelbach, die ca. 160 m von MHS 2 entfernt sind. In südöstlicher Richtung wird das Modell durch einen baumfreien Streifen bzw. eine Lichtung hangaufwärts des Hügels begrenzt. Die Biogasanlage und die Ställe MHS 4 und MHS 5 der Familie Höckmeier befinden sich südlich außerhalb des Modellgebietes.

Der Hügel im Osten der Ställe MHS 2 und MHS 3, wie auch die übrige Topografie, wurde im Windkanalmodell im Maßstab 1:300 nachgebildet (siehe auch Anhang A2.1). In den Abbildungen 3.1 und 3.2 ist die erhebliche Neigung des den Ställen zugewandten westlichen Hanges des Hügels deutlich zu erkennen.

3.2 Modellierung der Bebauung und Anordnung der Abgaskamine

Die Ställe MHS 2 und MHS 3 einschließlich der Futtersilos am MHS 2 wurden ebenfalls im Maßstab 1:300 modelliert. Analog zu dem immissionsschutztechnischen Gutachten von HPS (2020) werden zwei Anordnungen der Abgaskamine untersucht:

Als „Bestand“ bezeichnet wird die bisherige Anordnung von je 10 einzelnen Abgaskaminen entlang der Firstlinien der beiden Ställe MHS 2 und MHS 3. In HPS (2020) wird bei der Immissionsprognose für den Bestand eine Mündungshöhe der Kamine von 3 m über First zugrunde gelegt, um den Stand der Technik zu berücksichtigen (und nicht, wie mit Bescheid des LRA Pfaffenhofen an der Ilm vom 19.01.1999 baurechtlich genehmigt, eine Mündungshöhe von 1.5 m über First). Die in dem Gutachten angesetzten Mündungshöhen der Kamine sind für den Bestand somit 11.6 m über Grund bei MHS 2 und 10.3 m über Grund bei MHS 3.

Da der Genehmigungsbescheid von 2017 widerrufen wurde, bleibt die tatsächliche Höhe der Mündungen von 4 m über First nach der inzwischen bereits vorgenommenen Ertüchtigung der Kamine unberücksichtigt.

Die Planung sieht für die Ställe MHS 2 und MHS 3 Abgaswäscher an den nördlichen Giebelseiten vor. Das Windkanalmodell wurde daher um die beiden Wäschergebäude und den überdachten ASL-Tank nach den vorliegenden Planunterlagen (Abbildungen 3.3 und 3.4) und Rücksprache mit dem Auftraggeber ergänzt (siehe Abbildung 3.5).



Abb. 3.1: Masthähnchenställe MHS 2 und MHS 3 im Bestand an der Waldkante am westlichen Fuß des Hügels, Blick nach Norden in Richtung Eschelbach. Bildquelle: Höckmeier

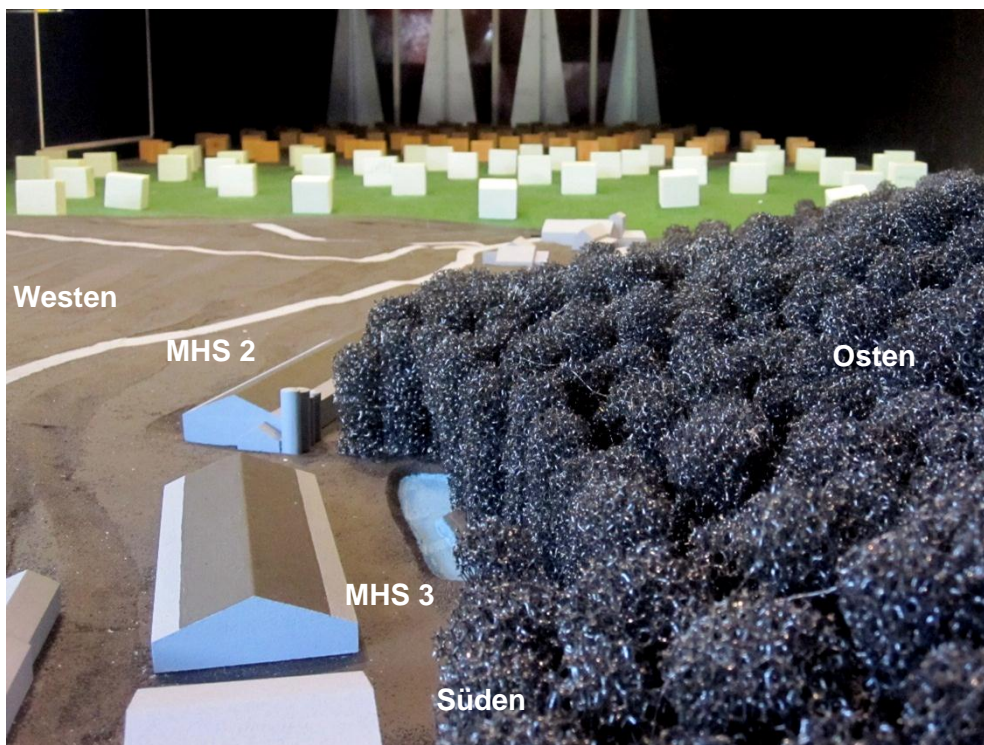


Abb. 3.2: Windkanalmodell des Bestands mit den Ställen MHS 2 und MHS 3 an der Waldkante am westlichen Fuß des bewaldeten Hügels, Blick nach Norden in Richtung Eschelbach. Im Hintergrund sind Einbauten im Windkanal zur Erzeugung einer naturähnlichen Anströmung zu sehen (siehe Anhang A1).

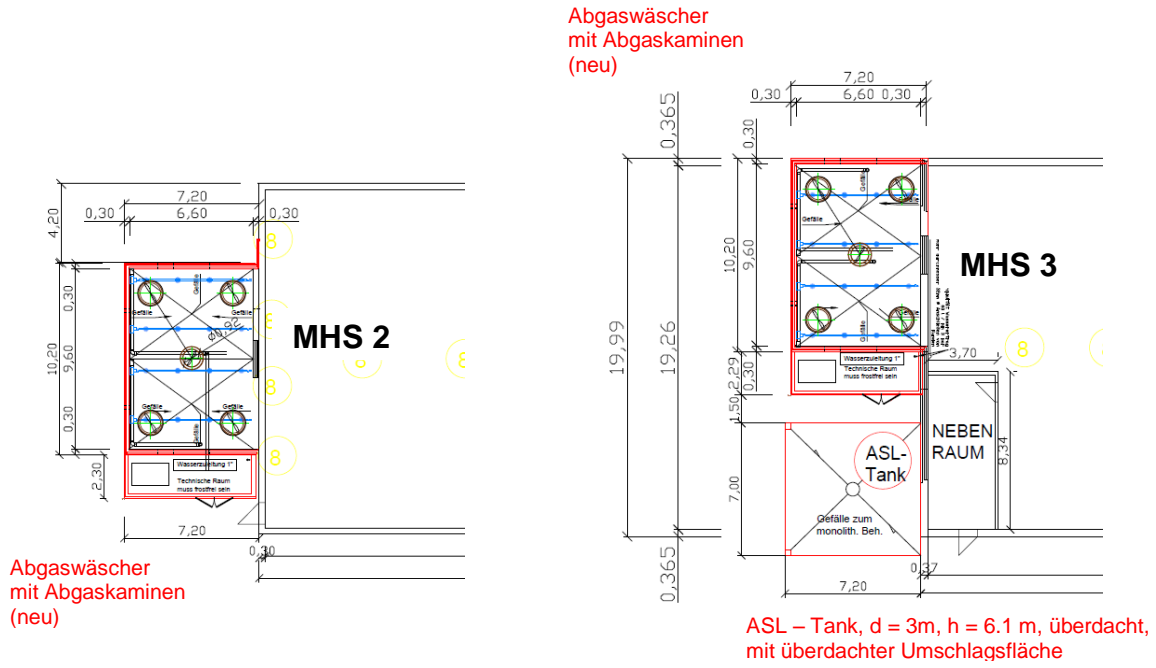


Abb. 3.3: Grundrisse der geplanten Abgaswäscher und Anordnung der Kamine (Stand Januar 2020). Links: MHS 2; rechts MHS 3. Quelle: Höckmeier

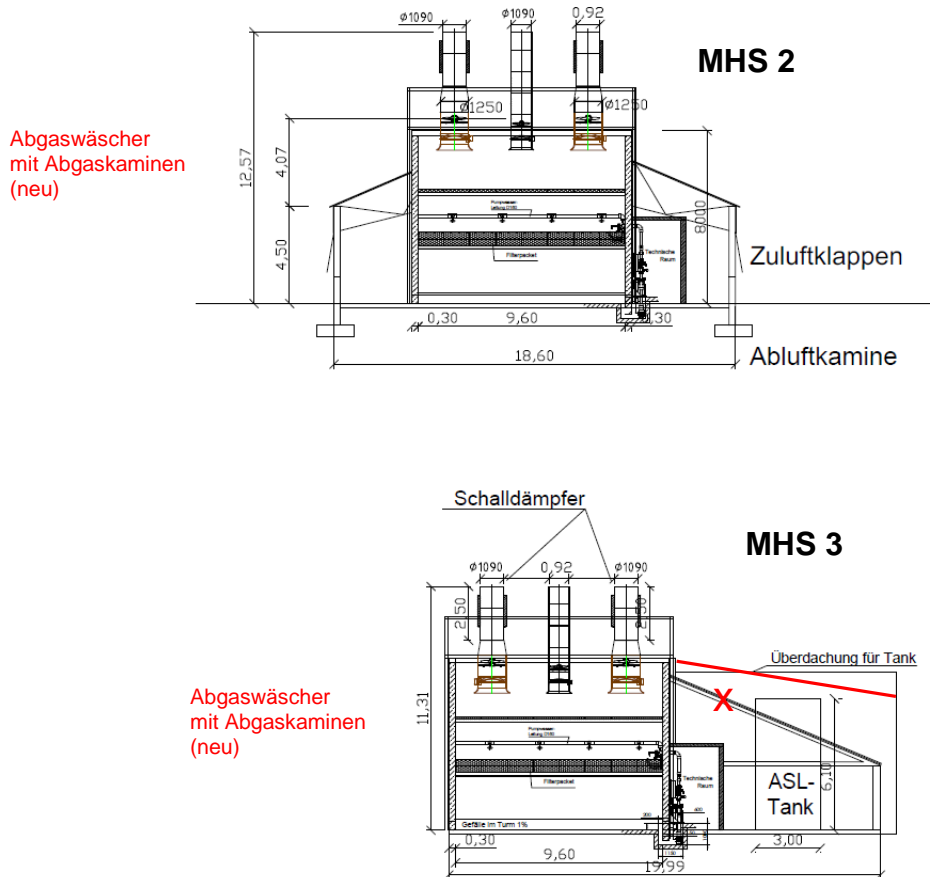


Abb. 3.4: Ansichten der geplanten Abgaswäscher und Anordnungen der Kamine (Stand Januar 2020). Oben: MHS 2; unten: MHS 3. Quelle: Höckmeier

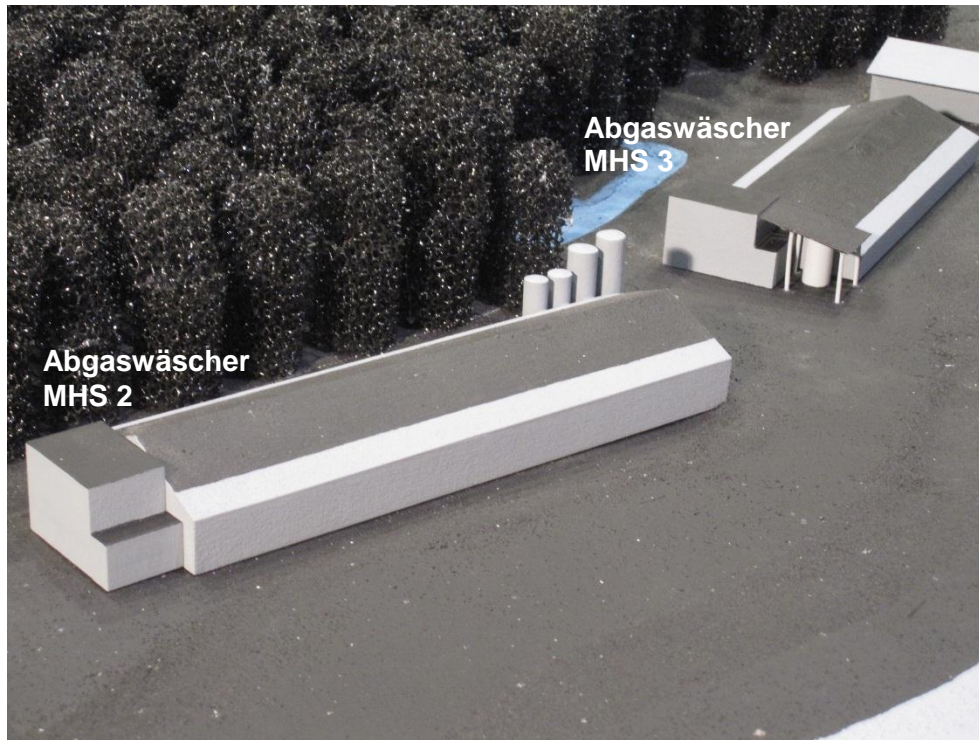


Abb. 3.5: Windkanalmodell der Masthähnchenställe MHS 2 und MHS 3 im Planungsstand mit den Gebäuden der Abgaswäscher an den nördlichen Giebelseiten.

Auf den geplanten Wäschergebäuden befinden sich je 5 Abgaskamine. Die Mündungshöhen der Abgaskamine liegen 4 m über First des jeweiligen Stallgebäudes, d. h. 12.6 m über Grund bei MHS 2 und 11.3 m über Grund bei MHS 3.

Da die vorhandenen bzw. gewählten Abstände der Einzelkamine untereinander größer als das Doppelte der Kamindurchmesser sind, ist nach VDI 3782 Blatt 3 Entwurf (2019) davon auszugehen, dass der Einfluss der einzelnen Kaminkörper auf das Strömungsfeld selbst nicht mehr dominierend ist. Auf die Nachbildung der Kamine selbst wurde daher verzichtet.

Die Höhen und Dachformen der übrigen Umgebungsbebauung um die Stallanlagen, wie auch der Gebäude am Ortsrand von Eschelbach, wurden bei einer Begehung mit Fotoaufnahmen im Rahmen eines Ortstermins am 14.05.2019 sowie aus Luftbildern (Google Maps, abgerufen am 22.05.2019) ermittelt.

3.3 Modellierung des Waldes

Im Gegensatz zu undurchlässigen Gebäuden ist eine Waldvegetation teilweise durchströmbar. Die Modellierung ihres Einflusses auf das Strömungsfeld ist komplex und hängt von einer Vielzahl von Parametern, wie der Art und den Höhen des Bewuchses oder der Dichte des Baumbestandes, ab.

Im Windkanalmodell wird der Wald nach einem Verfahren simuliert, welches am Karlsruher Institut für Technologie (KIT, ehemals Universität Karlsruhe) entwickelt wurde. Dabei wird unterschieden in einen Stamm- und einen Kronenraum der Bäume. Die von Gromke (2018) aufgestellten Bedingungen für eine naturähnliche Durchströmung des Stamm- und des Kronenraumes des Waldes einschließlich der benötigten Eingangsgrößen sind in Anhang A2.2 zusammen gestellt.

Die für die Modellierung des Waldes notwendigen Eingangsgrößen wurden bei einem Ortstermin am 14.05.2019 sowie aus der Auswertung von Fotoaufnahmen und Luftbildern erfasst.

Nach der Abbildung 3.6 befindet sich in unmittelbarer Nähe der Ställe entlang der Waldkante ein dichter Galeriewald aus ungefähr 25 m hohen Laubbäumen. Weiter hangaufwärts besteht der Bewuchs aus einem Mischwald mit einem hohen Anteil an lichterem, hochstämmigen Kiefern. Um eine naturähnliche Wirkung des modellierten Waldes (siehe Abbildung 3.7) auf die Strömung zu erzielen, sind entlang der Waldkante die Modellbäume entsprechend dicht angeordnet. Der Kronenraum der Bäume reicht, wie in der Natur, dort bis zum Boden.

3.4 Untersuchte Windrichtungen und Anströmbedingungen

Für die Ausbreitungsrechnungen (HPS, 2020) wurden nach einer Untersuchung (QPR) des Deutschen Wetterdienstes aus dem Jahr 2015 Ausbreitungszeitreihen der ca. 20 km nordnordwestlich von Eschelbach gelegenen Messstation Ingolstadt verwendet. Gewählt wurde das Jahr 2009 als repräsentativ. Abbildung 3.8 zeigt die entsprechende Windrose der Messstation mit einer mittleren Windgeschwindigkeit von 2.5 m/s in 10 m Höhe. Untersuchungen von Argusim Umwelt Consult (2019) bestätigten die Auswahl von 2009 als repräsentatives Jahr.

Bei den Hauptwindrichtungen aus Westsüdwest (WSW) mit den höchsten Windgeschwindigkeiten und freier Anströmung liegen die Ställe auf der windzugewandten Luvseite des Hügels. Bei dem zweiten Maximum mit Windrichtungen aus Ostnordost (ONO) befinden sich die Ställe auf der windabgewandten Leeseite des Hügels.

Für den Bestand mit den Abgaskaminen entlang der Firstlinien wurden daher zum einen die beiden Richtungen 240 und 260 Grad mit Wind aus WSW untersucht, zum anderen die Gegenrichtungen 60 und 80 Grad mit Wind aus ONO, bei denen durch die Gegengutachter die Ausbildung von Rezirkulationszonen angenommen wurde. Betrachtet wurden ferner die beiden deutlich seltener auftretenden südlichen Windrichtungen 160 und 180 Grad mit einer hangparallelen Strömung entlang des Tales von den Ställen in Richtung auf die Ortslage von Eschelbach.



Abb. 3.6: Blick auf den bewaldeten Hang östlich der Ställe MHS 2 und MHS 3 (im Vordergrund).

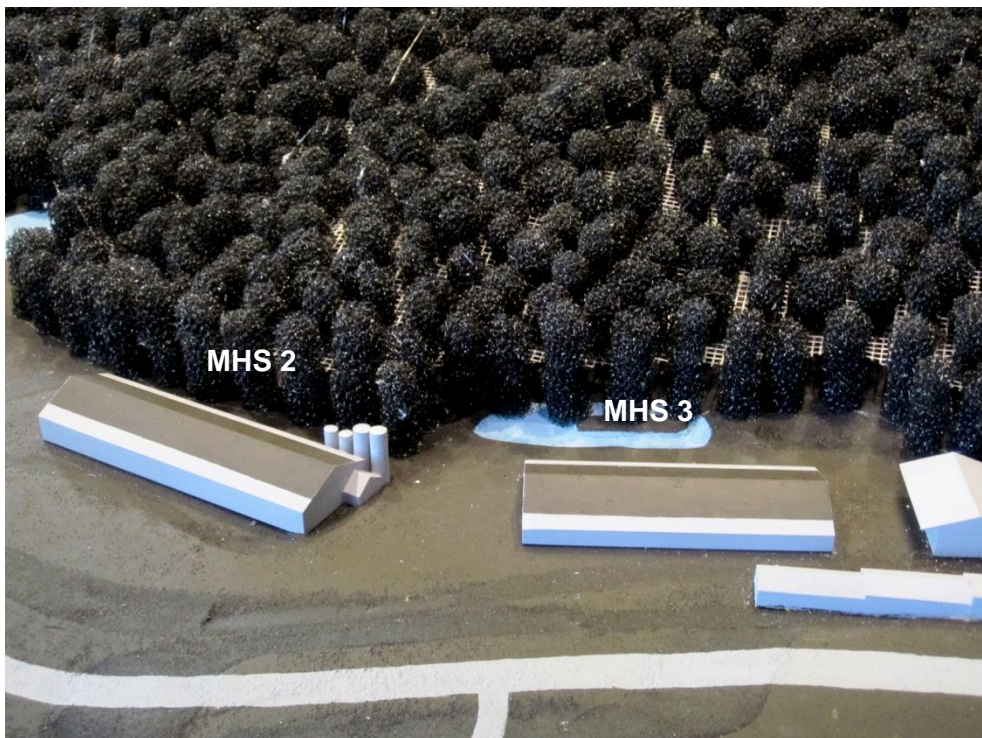


Abb. 3.7: Modellierung des Waldes auf dem Hang östlich der Ställe MHS 2 und MHS 3.

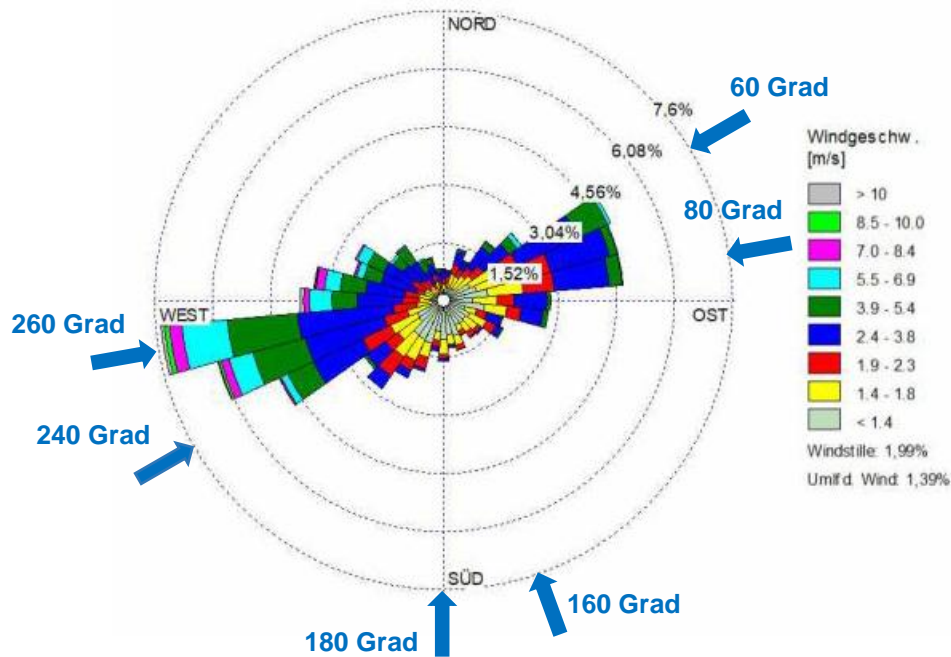


Abb. 3.8: Windrose an der Station Ingolstadt, ca. 20 km in nordnordwestlicher Richtung von Eschelbach gelegen, Jahr 2009 (Quelle: HPS, 2020). Mittlere Windgeschwindigkeit 2.5 m/s in 10 m Höhe. Die blauen Pfeile markieren im Windkanal untersuchte Windrichtungen.

In dem immissionsschutztechnischen Gutachten von HPS (2020) wurde im Sinne konservativer Immissionswerte bei den Ausbreitungsrechnungen von dem Ansatz einer Überhöhung der Abgasfahnen im Windrichtungssektor zwischen 50 Grad und 90 Grad, d. h. bei einer Anströmung aus Nordost bis Ost über den bewaldeten Hügel, abgesehen. Daher beschränken sich die Untersuchungen für die Planung (Abgaskamine auf den Wäschergebäuden) auf die Windrichtungen 240 Grad, 260 Grad, 160 Grad und 180 Grad. Für diese Windrichtungen wurde überprüft, ob die für den Bestand (Abgaskamine entlang der Firstlinien) erhaltenen Ergebnisse weiter Gültigkeit für die Planung haben.

Die Anströmung des Modells im Windkanal erfolgte mit einem hinsichtlich der mittleren Geschwindigkeiten und Turbulenzeigenschaften naturähnlichen Windprofil (siehe Anhang A2.3). Aus Messdaten in der Anströmung vor dem Modell wurden als Profilparameter nach dem logarithmischen Ansatz eine Rauigkeitslänge $z_0 = 0.5$ m und eine Verdrängungs- bzw. Versatzhöhe $d_0 = 5$ m bestimmt.

Die Rauigkeitslänge z_0 im Windkanal lag in einem Bereich, der für Vegetations- und Waldflächen typisch ist. Berechnungen von HFI (2017) wiesen für die Spanne von $z_0 = 0.2 - 0.5$ m nur einen geringen Einfluss von z_0 auf die Immissionen nach. Das Anströmprofil wurde bei den verschiedenen untersuchten Windrichtungen unverändert beibehalten.

3.5 Untersuchungsmethoden

Ziel der vorliegenden Untersuchung war es zunächst, den Einfluss des bewaldeten Hügels auf das Strömungsfeld im Bereich der Mündungen der Abgaskamine über den Firstlinien der Ställe MHS 2 und MHS 3 aufzuzeigen. Nach Vorliegen der Planung wurden ergänzende Untersuchungen zum Strömungsfeld im Bereich der Mündungen der Abgaskamine auf den geplanten Wäschergebäuden durchgeführt. Die eingesetzten Untersuchungsmethoden zur Strömungssichtbarmachung und Ermittlung der Windgeschwindigkeiten werden im Folgenden kurz erläutert. Detaillierte Angaben zu den Methoden und der Messtechnik finden sich im Anhang A3.

3.5.1 Strömungssichtbarmachung

Eine Methode zur Sichtbarmachung der Strömungsrichtungen an den interessierenden Punkten sind, neben der Freisetzung von Rauch, miniaturisierte, leicht drehbare Windfähnchen, die in die jeweilige lokale Strömungsrichtung weisen (siehe auch Anhang A3.1).

Mit diesen Fähnchen wurden zunächst die Strömungsrichtungen und ihre Änderungen entlang der Firstlinien der Ställe MHS 2 und MHS 3 im Bereich der Abgaskamine sowie im Umfeld der Ställe für die zu untersuchenden Windrichtungen sichtbar gemacht und mittels einer Kamera und Langzeitbelichtung dokumentiert.

Abbildung 3.9 zeigt als Beispiel eine Aufnahme mit Langzeitbelichtung für den Bestand bei der Windrichtung 60 Grad. Die Windfähnchen befinden sich dabei in einer Höhe von 3 m in der Natur (bzw. 1 cm im Modell bei dem Maßstab 1:300) über First oder dem Gelände. Der Abstand der Fähnchen am Boden zueinander beträgt 7.5 m (entsprechend 25 mm im Modell). Nimmt man die Windgeschwindigkeit im Modell als ähnlich zu der in der Natur an, entspricht die Belichtungsdauer von 15 Sekunden während der Langzeitbelichtungen einem Zeitraum von über 1 h in der Natur.

In dem Detailbild in der Abbildung 3.10 erkennt man an Stellen mit einer über den Belichtungszeitraum eindeutigen Strömungsrichtung deutlich ausgerichtete Windfähnchen. So weist das zu der Waldkante nächste bodennahe Fähnchen (1) im Bereich zwischen den beiden Ställen entgegen der Anströmung in Richtung Wald. An Punkten mit wechselnden Windrichtungen dagegen überstreichen die Fähnchen einen entsprechenden Windrichtungssektor bis hin zu einem Vollkreis. In letzterem Fall ist die Windrichtung nicht mehr definierbar. Beispiele dafür sind in der Abbildung 3.10 die mit Kreisen markierten Fähnchen entlang der Firstlinie des Stalls MHS 3, hinter dem Gebäude des MHS 3 oder zwischen den Ställen in einiger Entfernung von der Waldkante. Auch eine große Anzahl der übrigen Fähnchen überstreicht einen weiten Windrichtungssektor, aber ohne eine eindeutige, zum Wald hin ausgerichtete Rückströmung, wie sie für eine Rezirkulationszone hinter einem Gebäude wesentlich wäre, aufzuzeigen.

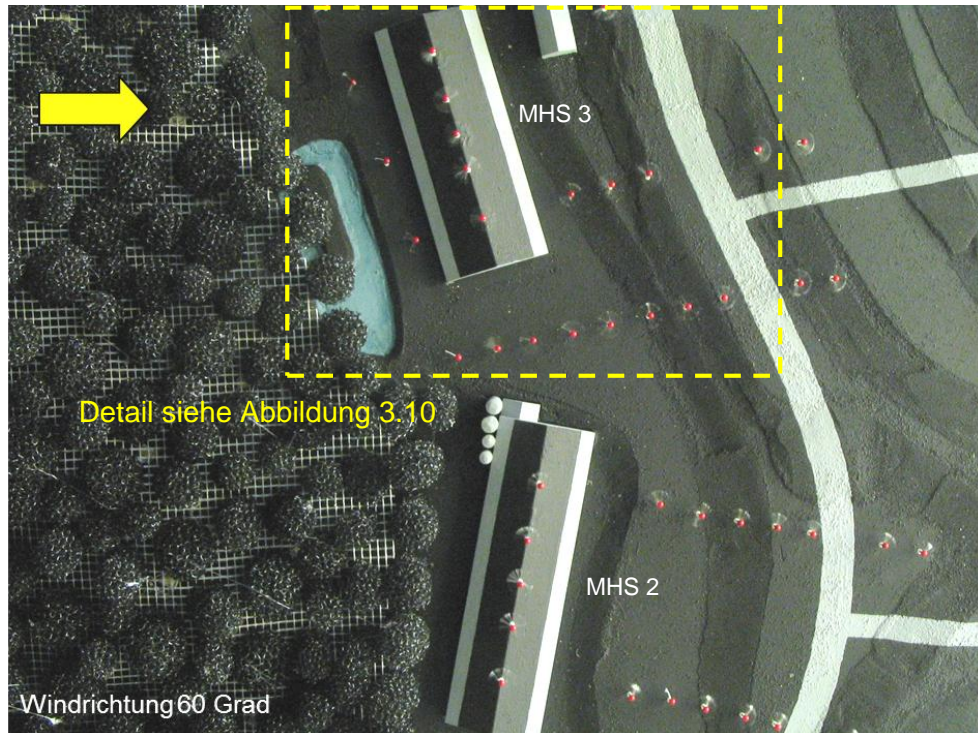


Abb. 3.9: Mit Windfähnchen dargestelltes Strömungsfeld im Bestand in ca. 3 m Höhe über First der Ställe MHS 2 und MHS 3 und über Grund in ihrer Umgebung bei der Windrichtung 60 Grad.

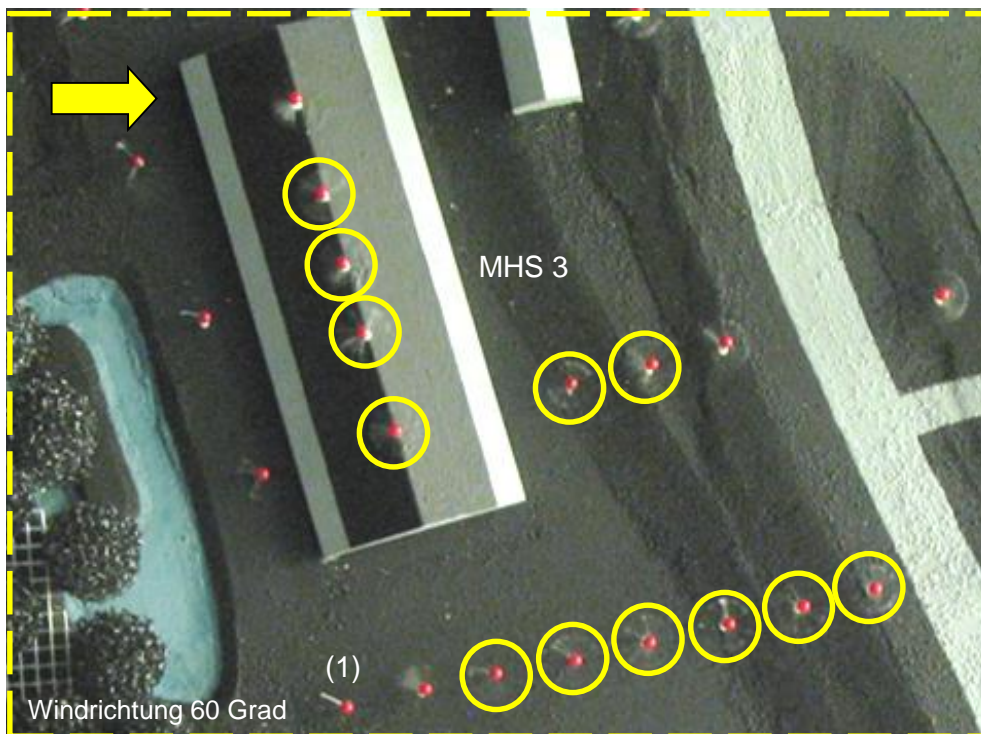


Abb. 3.10: Vergrößertes Detail aus Abbildung 3.9: Fähnchen mit undefinierten Windrichtungen sind mit Kreisen markiert. Fähnchen (1) weist auf eine bodennahe Rückströmung zum Wald hin.

Als Ergänzung zu den Aufnahmen mit den Windfähnchen wurden für den Bestand und die Windrichtungen mit dem bewaldeten Hang in Luv und Lee die Strömungsverhältnisse im Bereich der Abgaskamine mittels Rauch qualitativ sichtbar gemacht. Der Rauch wurde quer zur Anströmung oberhalb der Firstlinien der Ställe freigesetzt. Um die zeitliche Dynamik der Strömungsvorgänge exemplarisch festzuhalten, wurden bei der Windrichtung 60 Grad, bei der die Ställe in Lee des bewaldeten Hügels liegen und die im Sinne der Frage nach einer Rezirkulationszone als besonders kritisch angesehen wurde, mehrere kurze Videosequenzen der Rauchfreisetzungen aufgenommen.

3.5.2 Geschwindigkeitsmessungen

Anhand der Windgeschwindigkeiten lässt sich zum einen abschätzen, bis in welche Höhe der Einfluss der Waldvegetation auf die Strömung reicht. Zum zweiten hängt es vor allem von den horizontalen Windgeschwindigkeitskomponenten in der Umgebung eines Abgasstrahles ab, wie stark er durch das Strömungsfeld in seiner Umgebung umgelenkt wird. Höhere Geschwindigkeiten lenken den Strahl stärker um, die effektive Quellhöhe wird geringer. Die horizontalen Windgeschwindigkeitskomponenten wurden deshalb als vertikale Profile im Bestand über 4 Punkten auf dem First der Ställe MHS 2 und MHS 3 gemessen. Die Vertikalprofile reichten bis in eine Höhe von ca. 90 m über First. Für die Planung wurde zum Vergleich jeweils ein Vertikalprofil über der Mitte der Wäschergebäude aufgenommen. Auch diese Profile reichten bis ca. 90 m über die Gebäude.

Für die Messung der horizontalen Windgeschwindigkeit wurde ein Hitzdrahtanemometer der Firma Dantec eingesetzt, welches die Windgeschwindigkeitsänderungen bzw. die turbulenten Strukturen des Windes zeitlich hoch auflösen kann. Aus den Messdaten lassen sich mittlere Geschwindigkeiten ableiten, wobei als Messdauer jeweils 1 Minute je Messpunkt gewählt wurde. Umgerechnet auf die Natur bedeutet dies bei vergleichbarer Windgeschwindigkeit eine Mess- bzw. Mittelungsdauer von 5 Stunden.

Der Sensordraht der eingesetzten Hitzdrahtsonde ist vertikal zum Boden ausgerichtet, wodurch der Betrag der momentanen horizontalen Windgeschwindigkeit unabhängig von der Strömungsrichtung gemessen wird. Bei der Bestimmung der mittleren horizontalen Geschwindigkeit aus den Messdaten wird daher die Wirkung einer Umkehrung der Strömung, wie sie bei fluktuierenden, zeitweise rückwärtsgerichteten Strömungen auftritt, nicht berücksichtigt. Die aus den Messdaten der Hitzdrahtsonde bestimmte mittlere horizontale Geschwindigkeit an einem Ort ist deshalb stets größer oder gleich wie die mittlere Geschwindigkeit unter Berücksichtigung der momentanen Strömungsrichtung. Die Überschätzung ist umso größer, je stärker die Strömung vor Ort in ihrer Richtung fluktuiert. Weitere Details zur Messtechnik und Ergebnisse von Vergleichsmessungen mit einem weiteren Messsystem finden sich im Anhang A3.2.

4. Strömungssichtbarmachungen

4.1 Vorversuche mit dem Hügel ohne Wald

Vor den eigentlichen Versuchen mit dem bewaldeten Hügel wurden die Strömungsverhältnisse für den Bestand an dem Topografiemodell mit dem Hügel ohne Wald und die beiden Windrichtungen 60 Grad (Ställe in Lee) und 240 Grad (Ställe in Luv) betrachtet.

Rauch, der bei der Windrichtung 60 Grad nahe der Oberfläche des Hanges freigesetzt wurde, bewegte sich meist stromab mit der Strömung. Lediglich an einigen räumlich eng begrenzten, steileren Stellen ließen sich lokal geringe Rückströmungen hangaufwärts beobachten.

Anschließend wurden einige Windfähnchen im Bereich der Abgaskamine entlang den Firstlinien der Ställe in jeweils ca. 3 m Höhe (d. h. in 11.6 m Höhe über Grund bei MHS 2 und in 10.3 m Höhe über Grund bei MHS 3) angebracht, wie auch in der Nähe der Ställe.

Die von den Fähnchen über First überstrichenen Windrichtungssektoren wiesen bei der Windrichtung 60 Grad im Mittel eindeutig in Richtung der Anströmung (siehe Abbildung 4.1). Auf den Höhen der Mündungen der Abgaskamine konnte eine Rückströmung zum Hang des Hügels somit ausgeschlossen werden. Die bodennahen Fähnchen unterlagen dem Einfluss der Stallgebäude. Lediglich eines dieser Fähnchen in Luv von MHS 2 (markiert mit einem Kreis) überstrich einen Vollkreis (siehe auch Abschnitt 3.5.1). Hier wechselte die Strömungsrichtung so stark, dass sie nicht eindeutig definierbar war.

Bei der Gegenwindrichtung 240 Grad (Abbildung 4.2) überstrichen die Fähnchen im Bereich der Abgaskamine über den Firstlinien, wie auch die Fähnchen in Bodennähe zwischen den Ställen, erneut Windrichtungssektoren entsprechend der Anströmung ohne Hinweis auf eine Rezirkulationszone vor dem Hügel. Lediglich die weiter außen platzierten Fähnchen wurden durch die Umströmung des Hügels leicht zu den Seiten hin abgelenkt.

Dagegen befindet sich das bodennahe, in der Abbildung 4.1 mit einem Kreis markierte Fähnchen (1), wie bei dieser Windrichtung zu erwarten ist, in der Rezirkulationszone des Stallgebäudes MHS 2 und zeigt eindeutig entgegen der Anströmung in Richtung des Gebäudes. Die Rezirkulationszone reicht aber nicht bis in die Höhe der Abgaskamine 3 m über First.

Die örtlichen topografischen Verhältnisse ohne Wald führen demnach nicht zu einer großräumigen Rückströmung entgegen der Anströmrichtung auf der windabgewandten Seite des Hügels. Rezirkulationszonen im Sinne der VDI 3781 Blatt 4 (2017) bilden sich nicht aus. Bei Wind aus der Gegenrichtung wird der Hügel im Wesentlichen überströmt.



Abb. 4.1: Hügel ohne Wald, Windrichtung 60 Grad: Ausrichtung der Windfähnchen mit der Strömung in 3 m Höhe über First der Ställe MHS 2 und MHS 3 und in 3 m Höhe über Grund. Fähnchen mit Kreis ohne definierte Ausrichtung.



Abb. 4.2: Hügel ohne Wald, Windrichtung 240 Grad: Ausrichtung der Windfähnchen mit der Strömung in 3 m Höhe über First der Ställe MHS 2 und MHS 3 und in 3 m Höhe über Grund. Fähnchen (1) nun in der Rezirkulationszone von MHS 2.

4.2 Strömungssichtbarmachungen mit dem bewaldeten Hügel (Bestand)

4.2.1 Ställe auf der Leeseite des Hügels (Windrichtungen 60 und 80 Grad)

Nachdem in den Vorversuchen geklärt wurde, dass sich hinter dem Hügel ohne Wald im Bereich der Ställe bei der Windrichtung 60 Grad keine Rezirkulationszone ausbildet, wurde bei gleicher Windrichtung die Situation mit Wald zunächst für den Bestand mit den Abgaskaminen entlang der Firstlinien betrachtet.

Wie die Freisetzungen von Rauch im Bereich der Firstlinien der Ställe hinter dem bewaldeten Hügel zeigten, führt der Einfluss des Waldes zu wesentlich komplexeren Strömungsverhältnissen. Die Strömungsrichtungen wiesen eine hohe zeitliche Variabilität auf und wechselten ständig (siehe die beiden Abbildungen 4.3 und 4.4 zu verschiedenen Zeitpunkten aus Videoaufnahmen). Eine eindeutig definierte Rückströmung zu dem bewaldeten Hang hin (Rezirkulation) war nicht auszumachen.

Nach den Rauchversuchen wurde die Strömung mittels Windfähnchen entlang der Firstlinien der Ställe und in Bodennähe sichtbar gemacht, wobei eine größere Anzahl an Fähnchen als in den Vorversuchen (Abschnitt 4.1) eingesetzt wurde. Wie in den Vorversuchen waren die Windfähnchen (rot markiert) entlang der Firstlinien in ca. 3 m Höhe über First angeordnet (d.h. in 11.6 m Höhe über Grund bei MHS 2 und in 10.3 m Höhe über Grund bei MHS 3).

Abbildung 4.5 zeigt die Ausrichtung der Windfähnchen für den Bestand. Die Windfähnchen bestätigten den Eindruck komplexer Strömungsverhältnisse, insbesondere entlang der Firstlinien, aus den Rauchfreisetzungen. Alle Fähnchen über den Firstlinien der Ställe MHS 2 und MHS 3 wiesen starke zeitliche Fluktuationen der Strömungsrichtung auf. Vor allem bei MHS 3 überstrichen die Fähnchen Vollkreise, so dass eindeutig definierbare Rückströmbereiche, wie sie sich in Rezirkulationszonen hinter Gebäuden ausbilden, nicht beobachtet werden konnten (siehe die kreisförmigen Markierungen in der Abbildung 4.5). Die Strömungsrichtung wechselt vielmehr zwischen der Anström- und ihrer Gegenrichtung. Bei MHS 2 überstrichen die Fähnchen entlang der Firstlinie eher halbkreisförmige Sektoren mit einer mittleren Strömungsrichtung hin zum Stall MHS 3 und einer geringen Komponente entgegen der Anströmung hin zum Wald. Auch hier bildete sich hinter dem Wald keine stationäre Rezirkulationszone aus, die bis über den First des Stalles reichte. Lediglich einige bodennahe Fähnchen zwischen den Stallgebäuden richteten sich entgegen der Anströmung aus.

Die Wirkung der Anströmwindrichtung 80 Grad auf die Strömungsfelder über dem First der Ställe und in Bodennähe zeigt die Abbildung 4.6. Bei dieser Windrichtung befinden sich die beiden Stallgebäude ebenfalls auf der Leeseite des bewaldeten Hügels.



Abb. 4.3: Hügel mit Wald, Windrichtung 60 Grad: Strömungssichtbarmachung mittels Rauch im Bereich der Abgaskamine über dem First von Stall MHS 2 (Bestand). Zeitweise auftretender Abtransport des Abgases in Richtung der freien Strömung.



Abb. 4.4: Hügel mit Wald, Windrichtung 60 Grad: Strömungssichtbarmachung mittels Rauch im Bereich der Abgaskamine über dem First von Stall MHS 2 (Bestand). Zu einem anderen Zeitpunkt als in der Abbildung 4.3 auftretende Rückströmung hin zu dem bewaldeten Hang.

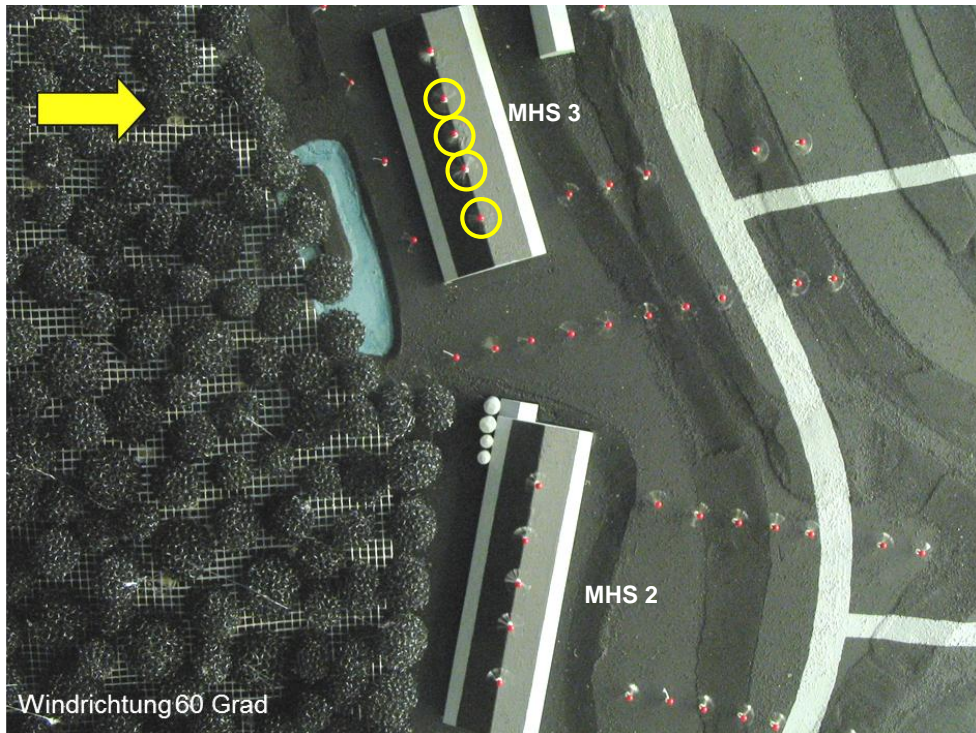


Abb. 4.5: Hügel mit Wald, Windrichtung 60 Grad: Ausrichtung der Windfähnchen mit der Strömung in 3 m Höhe über First der Ställe MHS 2 und MHS 3 und in 3 m Höhe über Grund. Fähnchen mit Kreis auf MHS 3 ohne definierte Ausrichtung.

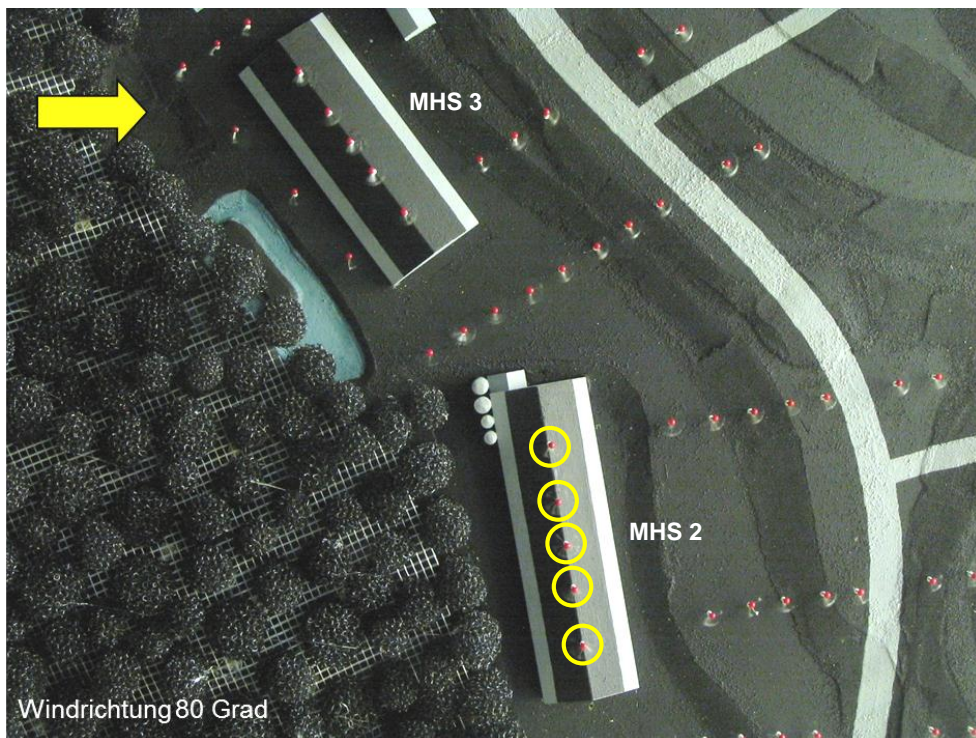


Abb. 4.6: Hügel mit Wald, Windrichtung 80 Grad: Ausrichtung der Windfähnchen mit der Strömung in 3 m Höhe über First der Ställe MHS 2 und MHS 3 und in 3 m Höhe über Grund. Fähnchen mit Kreis auf MHS 2 ohne definierte Ausrichtung.

Analog zur Windrichtung 60 Grad wiesen die Fähnchen über den Firstlinien von MHS 2 und MHS 3 starke zeitliche Schwankungen der Strömungsrichtungen auf. Während bei der Windrichtung 60 Grad vor allem die Fähnchen entlang der Firstlinie von MHS 3 Vollkreise überstrichen, so dass keine definierte Strömungsrichtung auszumachen war, trat bei der Windrichtung 80 Grad dieser Effekt bei den Fähnchen über dem First von MHS 2 auf.

Umgekehrt bewegten sich bei MHS 3 die Fähnchen entlang der Firstlinie eher innerhalb eines Halbkreises mit einer mittleren Strömungsrichtung zum Stall MHS 2 und einer geringen Komponente entgegen der Anströmung hin zum Wald.

Die Strömungsbilder der Windfähnchen zeigen, dass sowohl bei der Windrichtung 60 Grad als auch bei der Windrichtung 80 Grad zumindest phasenweise ein Abtransport der Abgase in Richtung der freien Strömung gegeben ist, auch wenn es zu anderen Zeitpunkten zu Rückströmeffekten entgegen der Anströmung hin zu dem bewaldeten Hang kommt. Dies bestätigte auch die Sichtbarmachung der Strömung mit Rauch, wie sie für die Windrichtung 60 Grad auf Video festgehalten wurde. Im vorliegenden Fall ist es daher nicht gerechtfertigt, von einer Rezirkulationszone im Sinne der VDI 3781 Blatt 4 (2017) zu sprechen.

4.2.2 Ställe auf der Luvseite des Hügels (Windrichtungen 240 und 260 Grad)

Befinden sich die beiden Ställe MHS 2 und MHS 3 in der Anströmung vor dem bewaldeten Hügel bzw. auf seiner Luvseite, wurde befürchtet, dass sich vor dem Wald ein zum Boden hin gerichteter Frontwirbel ausbildet, so dass die Abgase der Kamine weitgehend unverdünnt zum Boden hin transportiert werden.

Bei einer Höhe von 3 m über First bzw. bei Höhen von 11.6 m und 10.3 m über Grund befinden sich die Fähnchen in Front des durchlässigen Kronenraums des Waldes. Die Ausrichtung der Fähnchen auf dem Stallgebäude MHS 2 zeigt bei der Windrichtung 240 Grad (Abbildung 4.7), dass die Strömung in den Wald eindringt und nicht, wie bei einem undurchlässigen Gebäude oder Baukörper, unterhalb des Staupunktes am Gebäude zum Boden hin umgelenkt wird. Dabei richten sich die Windfähnchen auf MHS 3 stärker schräg zum bewaldeten Hang mit einer hangparallelen Komponente aus. Dies weist auf eine teilweise Umströmung des Hanges in Richtung der Lichtung im Südosten hin.

Auch die bodennah in 3 m Höhe nahe der Waldkante zwischen den beiden Stallgebäuden angeordneten Fähnchen zeigen weder eine klare Ausrichtung entgegen der Anströmung noch wiesen sie undefinierte Strömungsrichtungen auf, wie es bei einem Frontwirbel vor dem Wald ggf. zu erwarten wäre.

Bei der Windrichtung 260 Grad (Abbildung 4.8) verstärkt sich die Umströmung des Hügels. Die hangparallelen Strömungskomponenten nehmen zu und sind jetzt auch bei den Fähnchen auf dem Stall MHS 2 auszumachen. Die hinter und neben dem Stall MHS 3 platzierten bodennahen Fähnchen orientieren sich an der Umströmung des Stallgebäudes bzw. des Hanges und den Rezirkulationszonen benachbarter Wirtschaftsgebäude.

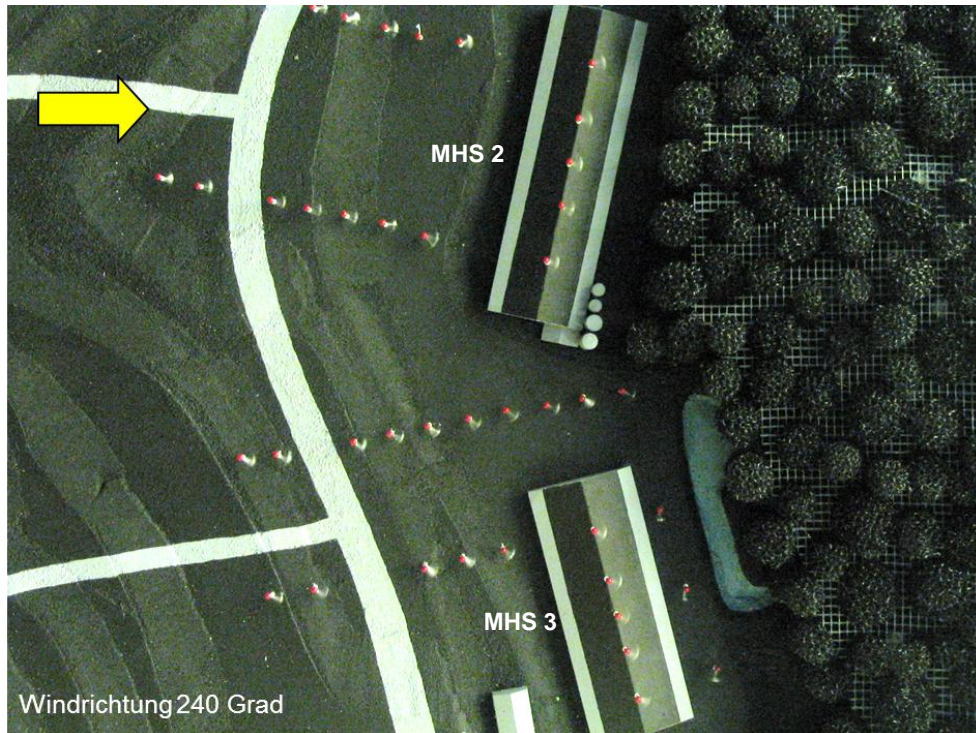


Abb. 4.7: Hügel mit Wald, Windrichtung 240 Grad: Ausrichtung der Windfähnchen mit der Strömung in 3 m Höhe über First der Ställe MHS 2 und MHS 3 und in 3 m Höhe über Grund.

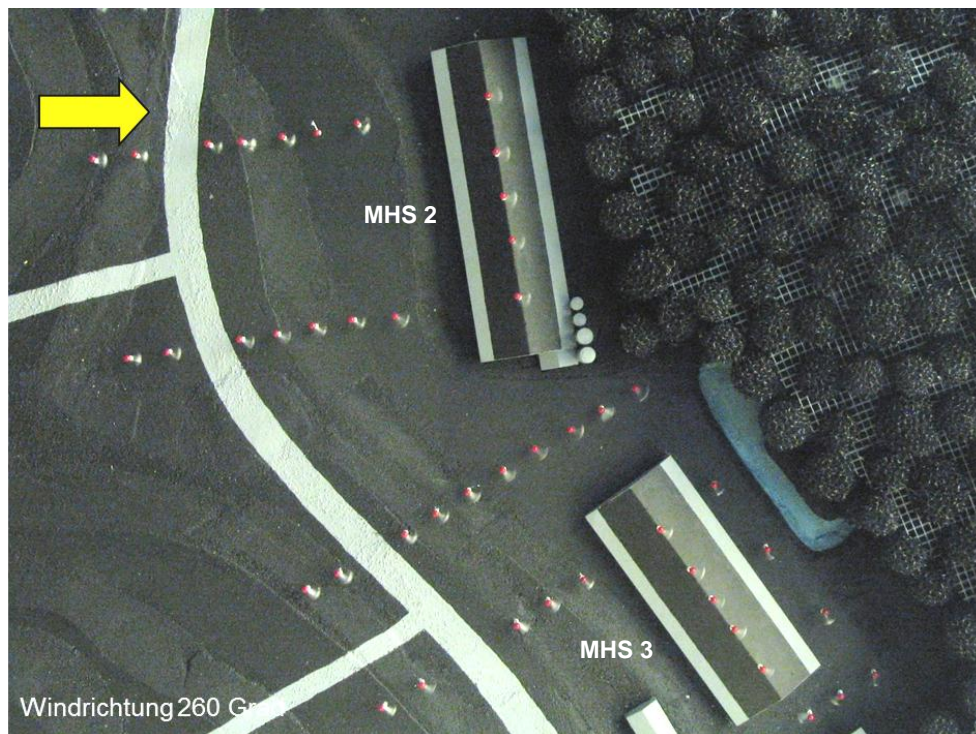


Abb. 4.8: Hügel mit Wald, Windrichtung 260 Grad: Ausrichtung der Windfähnchen mit der Strömung in 3 m Höhe über First der Ställe MHS 2 und MHS 3 und in 3 m Höhe über Grund.

Nach den Strömungsbildern der Windfähnchen ist somit, trotz des dichteren Galeriewaldes entlang der Waldkante am Fuß des Hügels, die Ausbildung eines Frontwirbels vor dem Wald bei den beiden Windrichtungen 240 Grad und 260 Grad nicht festzustellen.

4.2.3 Talparallele Strömung (Windrichtungen 160 und 180 Grad)

Strömt der Wind aus südlichen Richtungen entlang des Tales parallel zu dem bewaldeten Hügel über die Ställe hinweg in Richtung Eschelbach, richten sich die Windfähnchen am Boden, sofern sie nicht dem Einfluss von Gebäuden unterliegen, bei beiden Windrichtungen im Wesentlichen entlang der Tallinie aus, wie die Abbildungen 4.9 und 4.10 zeigen.

Dies gilt auch für die Fähnchen in 3 m Höhe über der Firstlinie des nördlicher gelegenen Stalles MHS 2. Die Fähnchen entlang der Firstlinie des südlicher gelegenen Stalles MHS 3 folgen stärker jeweils der Anströmrichtung. Vor allem bei der Windrichtung 180 Grad überstreichen sie den Bereich zwischen der Anströmrichtung und der Richtung der schräg angeströmten Waldkante.

Die Beeinflussung der Strömungsrichtungen durch den bewaldeten Hügel ist bei diesen Windrichtungen aber nur gering, Rezirkulationszonen bilden sich nicht aus.

4.3 Strömungssichtbarmachungen mit dem bewaldeten Hügel (Planung)

Für Windrichtungen aus Nordost bis Ost (60 Grad und 80 Grad) wurde bei der Immissionsprognose durch HPS (2020) keine Überhöhung der Abgasfahnen angesetzt. Deshalb war für diese Windrichtungen keine Betrachtung im Windkanal für den Fall Planung notwendig.

Die Strömungssichtbarmachungen für die Planung (Wäschergebäude mit Abgaskaminen) beschränken sich daher auftragsgemäß auf die Windrichtungen 240 Grad, 260 Grad, 160 Grad und 180 Grad, da hier bei den Ausbreitungsrechnungen eine Überhöhung der Abgasfahnen angesetzt wurde. Für diese Windrichtungen wurde überprüft, ob die für den Bestand (Abgaskamine entlang der Firstlinien) erhaltenen Ergebnisse weiterhin gelten.

Hierzu wurden auf den beiden Wäschergebäuden jeweils 4 Windfähnchen in einer Höhe von 3 m über Dach (d. h. ca. 11 m über Grund) an den Positionen der 4 äußeren Abgaskamine platziert (siehe Abbildung 4.11). Die Windfähnchen entlang der Firstlinien mit den stillzulegenden Abgaskaminen wurden zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit beibehalten (siehe auch Anhang A3.1) und sind in den folgenden Abbildungen mit roten Kreuzen markiert.

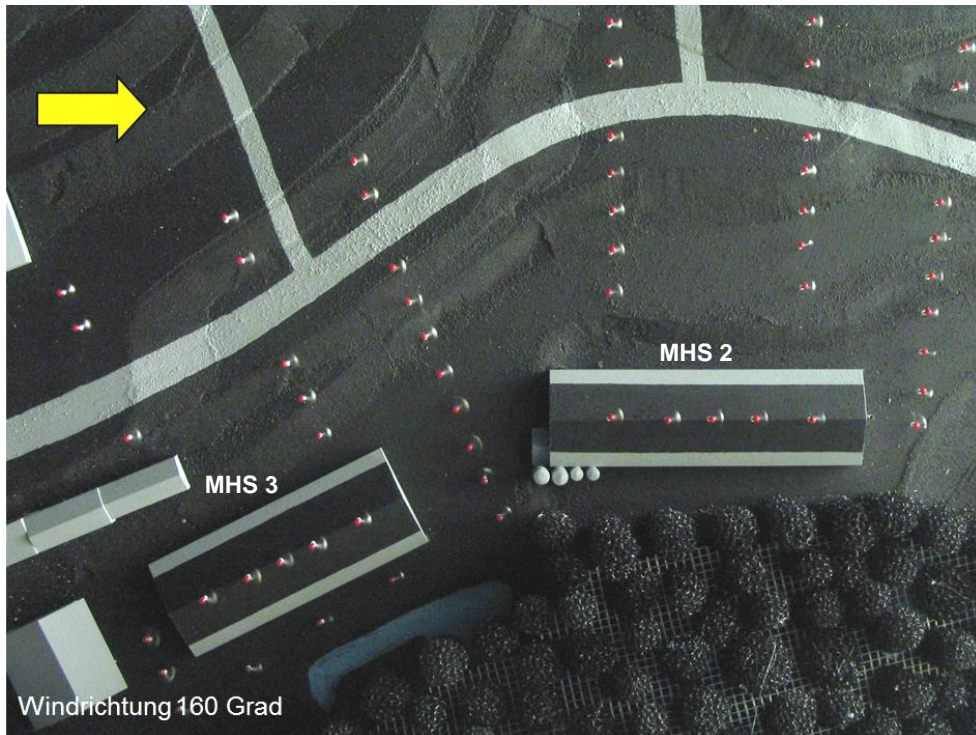


Abb. 4.9: Hügel mit Wald, Windrichtung 160 Grad: Ausrichtung der Windfähnchen mit der Strömung in 3 m Höhe über First der Ställe MHS 2 und MHS 3 und in 3 m Höhe über Grund.

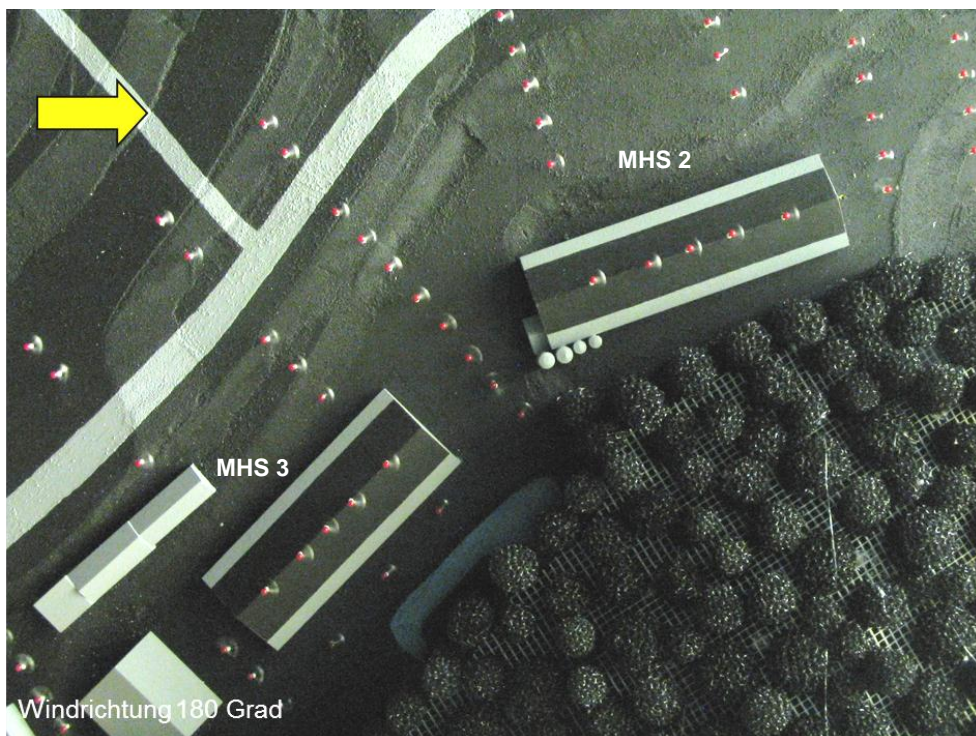


Abb. 4.10: Hügel mit Wald, Windrichtung 180 Grad: Ausrichtung der Windfähnchen mit der Strömung in 3 m Höhe über First der Ställe MHS 2 und MHS 3 und in 3 m Höhe über Grund.

4.3.1 Ställe auf der Luvseite des Hügels (Windrichtungen 240 und 260 Grad)

Bei der Windrichtung 240 Grad (Abbildung 4.11) zeigt die Ausrichtung der Fähnchen auf dem Wäscher MHS 2 analog zum Bestand, dass die Strömung in den Wald eindringt und nicht, wie bei einem undurchlässigen Gebäude oder Baukörper, unterhalb des Staupunktes zum Boden hin umgelenkt wird. Dabei weisen die Windfähnchen eine geringe hangparallele Komponente in nördlicher Richtung auf, was auf eine Umströmung des Hanges hinweist. Bei den Fähnchen auf dem Wäscher MHS 3 ist Ähnliches zu beobachten. Die hangparallele Komponente weist hier in südliche Richtung.

In der Abbildung 4.12 mit der Windrichtung 260 Grad richten sich die Fähnchen auf dem Wäscher MHS 2 parallel zu der Anströmung und senkrecht zu der Waldkante aus, d. h. die Strömung dringt auch hier in den Wald ein. Die Fähnchen auf dem Wäscher MHS 3 weisen wieder schräg zu der Waldkante mit einer hangparallelen Komponente in südliche Richtung.

Auch bei den Strömungssichtbarmachungen für die Planung mit Windfähnchen auf den zwei Wäschergebäuden ist bei den Windrichtungen 240 Grad und 260 Grad nicht erkennbar, dass sich vor dem Wald ein zum Boden hin gerichteter Frontwirbel ausbildet, der die Abgase aus den Kaminen weitgehend unverdünnt zum Boden hin transportieren würde.

4.3.2 Talparallele Strömung (Windrichtungen 160 und 180 Grad)

Strömt der Wind aus südlichen Richtungen entlang des Tales parallel zu dem bewaldeten Hügel über die Ställe hinweg in Richtung Eschelbach, richten sich die Windfähnchen am Boden, sofern sie nicht dem Einfluss von Gebäuden unterliegen, bei beiden untersuchten Windrichtungen wie im Bestand auch mit den geplanten Wäschergebäuden im Wesentlichen entlang der Tallinie aus, wie die Abbildungen 4.13 und 4.14 zeigen.

Die Fähnchen auf den beiden Wäschern weisen bei der Windrichtung 160 Grad parallel zur Anströmung, während sie sich bei der Windrichtung 180 Grad stärker nach der schräg angeströmten Waldkante ausrichten.

Bei beiden Windrichtungen gilt wie im Bestand, dass die Beeinflussung der Strömungsrichtungen durch den bewaldeten Hügel nur gering ist.

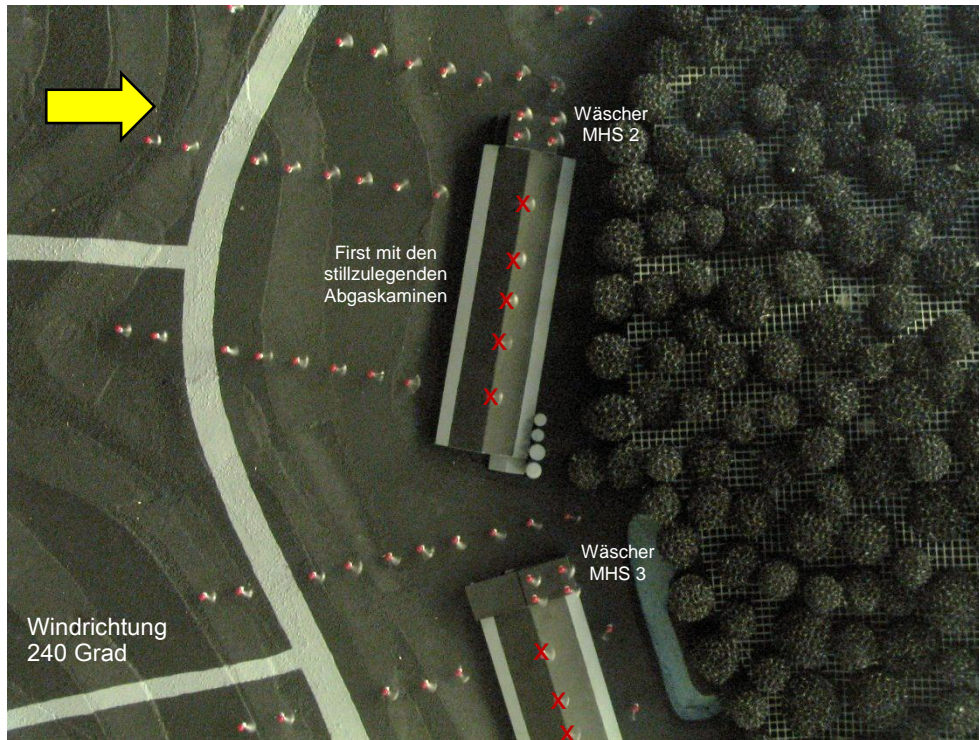


Abb. 4.11: Hügel mit Wald, Windrichtung 240 Grad: Ausrichtung der Windfähnchen mit der Strömung in 3 m Höhe über den Wäschern der Ställe MHS 2 und MHS 3 (Planung) und in 3 m Höhe über Grund. Fähnchen entlang der Firstlinien mit den stillzulegenden Abgaskaminen des Bestandes siehe rote Kreuze.

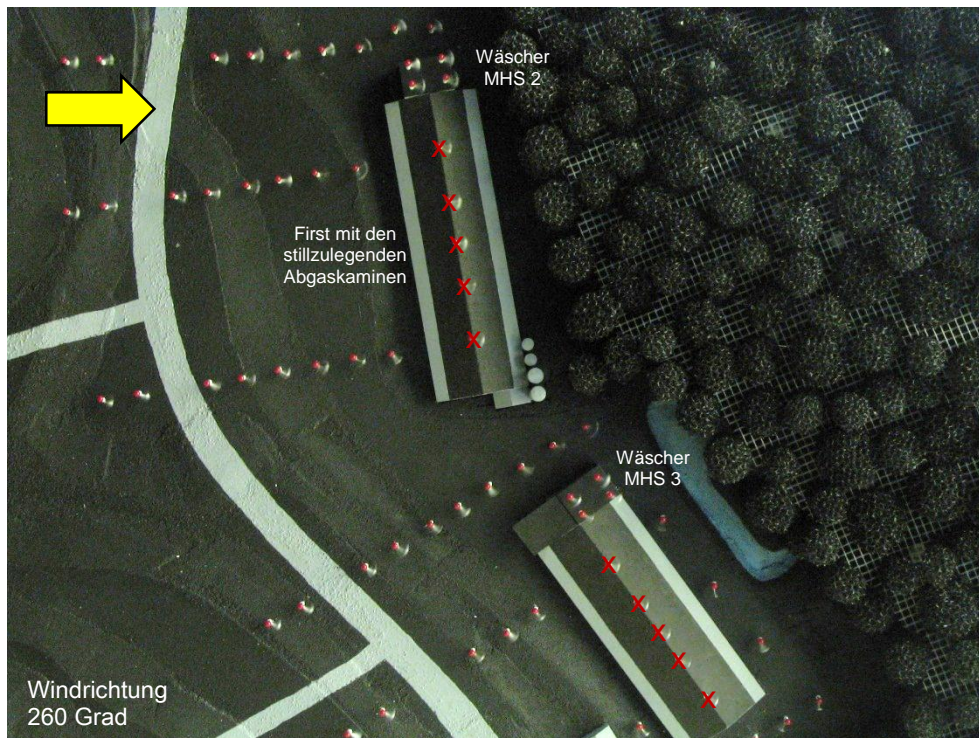


Abb. 4.12: Hügel mit Wald, Windrichtung 260 Grad: Ausrichtung der Windfähnchen mit der Strömung in 3 m Höhe über den Wäschern der Ställe MHS 2 und MHS 3 (Planung) und in 3 m Höhe über Grund. Fähnchen entlang der Firstlinien mit den stillzulegenden Abgaskaminen des Bestandes siehe rote Kreuze.

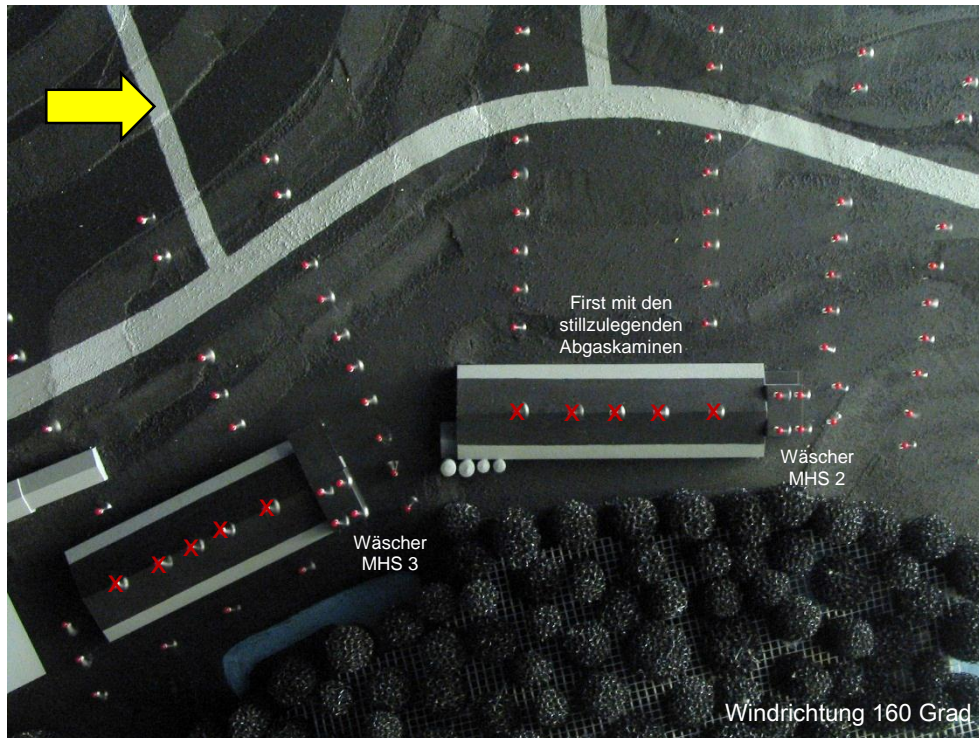


Abb. 4.13: Hügel mit Wald, Windrichtung 160 Grad: Ausrichtung der Windfähnchen mit der Strömung in 3 m Höhe über den Wäschern der Ställe MHS 2 und MHS 3 (Planung) und in 3 m Höhe über Grund. Fähnchen entlang der Firstlinien mit den stillzulegenden Abgaskaminen des Bestandes siehe rote Kreuze.

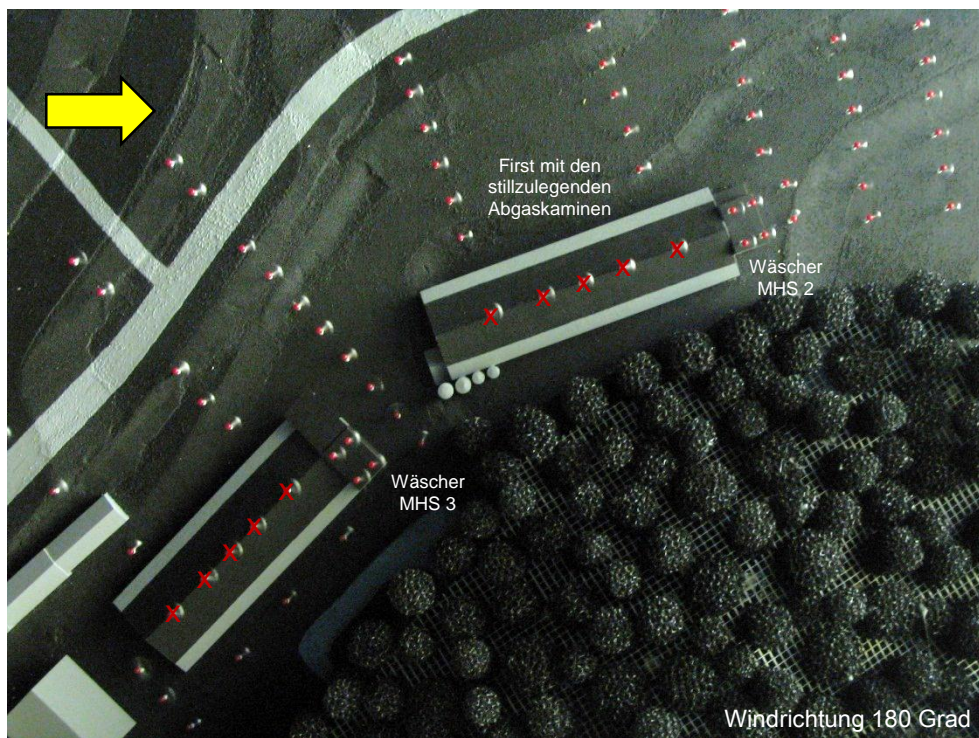


Abb. 4.14: Hügel mit Wald, Windrichtung 180 Grad: Ausrichtung der Windfähnchen mit der Strömung in 3 m Höhe über den Wäschern der Ställe MHS 2 und MHS 3 (Planung) und in 3 m Höhe über Grund. Fähnchen entlang der Firstlinien mit den stillzulegenden Abgaskaminen des Bestandes siehe rote Kreuze.

5. Geschwindigkeitsmessungen

5.1 Darstellung der Ergebnisse und Positionen der Messpunkte

5.1.1 Darstellung der Ergebnisse

Mit Bezug auf die Anforderungen an die Modellversuche (siehe Anhang A2) wurde bei den Geschwindigkeitsmessungen die Windgeschwindigkeit in der Anströmung im Windkanal zu 4.4 m/s in 90 m Höhe über dem Boden bzw. 3.3 m/s in 30 m Höhe gewählt. Unter Berücksichtigung des Exponenten $\alpha = 0.24$ und einer Versatzhöhe von $d_0 = 5$ m des Anströmprofils im Windkanal (siehe Anhang A2.2) errechnet sich hieraus in der Anströmung eine mittlere Windgeschwindigkeit von etwa 2.2 m/s in 10 m Höhe bei den Experimenten.

Grundsätzlich lassen sich die im Windkanal gemessenen Windgeschwindigkeiten auf beliebige andere Anströmwindgeschwindigkeiten in der Natur umrechnen. Im vorliegenden Fall liegt die mittlere Windgeschwindigkeit an der Messstation Ingolstadt nach HPS (2020) mit 2.5 m/s in 10 m Höhe im Bereich der Anströmgeschwindigkeit im Windkanal. Die in den folgenden Darstellungen der Vertikalprofile angegebenen Windgeschwindigkeiten entsprechen somit näherungsweise mittleren Verhältnissen in der Natur, ohne dass es hier der bei der Übertragung von Windkanalergebnissen auf die Natur sonst üblichen Skalierung der Ergebnisse bedarf.

5.1.2 Positionen der Messpunkte

Vertikale Profile der Windgeschwindigkeiten wurden für den Bestand mit den Abgaskaminen entlang der Firstlinien der Ställe an vier Messpunkten (MP) 1 – 4 über den Firstlinien der Ställe MHS 2 und MHS 3 aufgenommen (siehe Abbildung 5.1). Die lokalen Strömungsrichtungen an den Messpunkten waren bereits aus den Sichtbarmachungen mit den Windfähnchen (siehe Abschnitt 4.2) bekannt.

Der unterste Messpunkt der vier Vertikalprofile lag in einer Höhe von 3 m über First (d. h. in 11.6 m Höhe über Grund bei MHS 2 und in 10.3 m Höhe über Grund bei MHS 3) und somit in Höhe der Mündungen der Abgaskamine im Bestand nach HPS (2020). Gemessen wurde bis in eine Höhe von ca. 90 m über Dach, d. h. bis in eine Gesamthöhe von ca. 100 m über Grund. Dies entspricht dem etwa 4-fachen der Höhe der Baumkronen bzw. des Waldes und reicht über die Kuppe des Hügels hinaus.

Zur Beurteilung der Planung wurden vertikale Profile der Windgeschwindigkeiten an jeweils einem Messpunkt A (auf Wäscher MHS 2) und B (auf Wäscher MHS 3) über der Mitte der Wäschergebäude aufgenommen (siehe Abbildung 5.2).

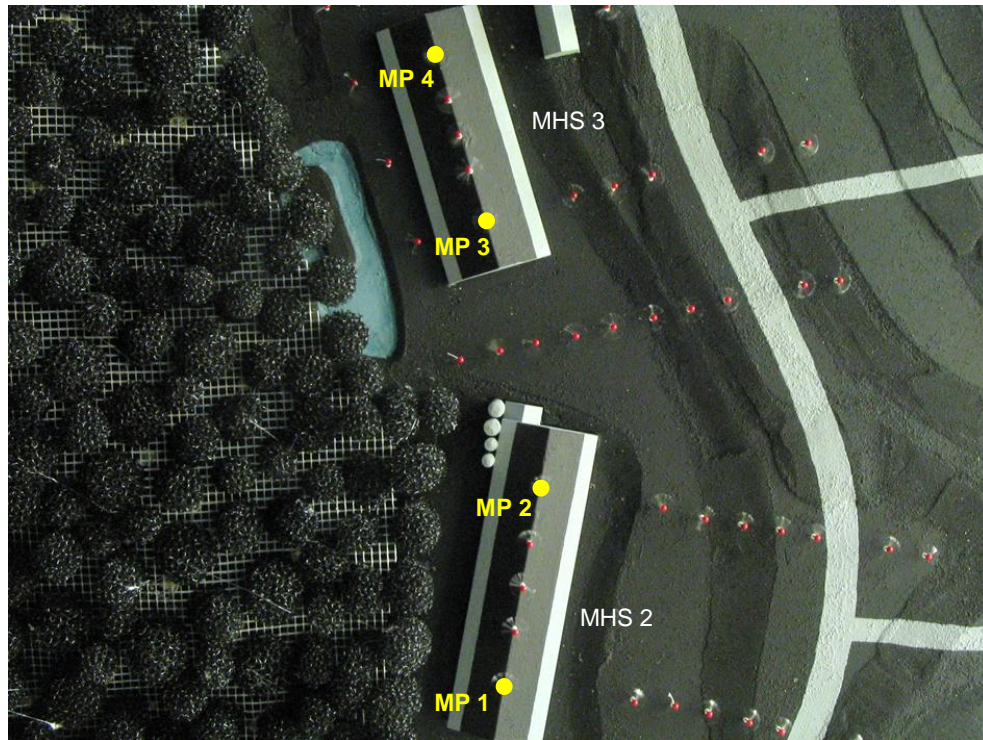


Abb. 5.1: Lagen der Messpunkte (MP) 1 – 4 auf den Firstlinien der Ställe für den Bestand.

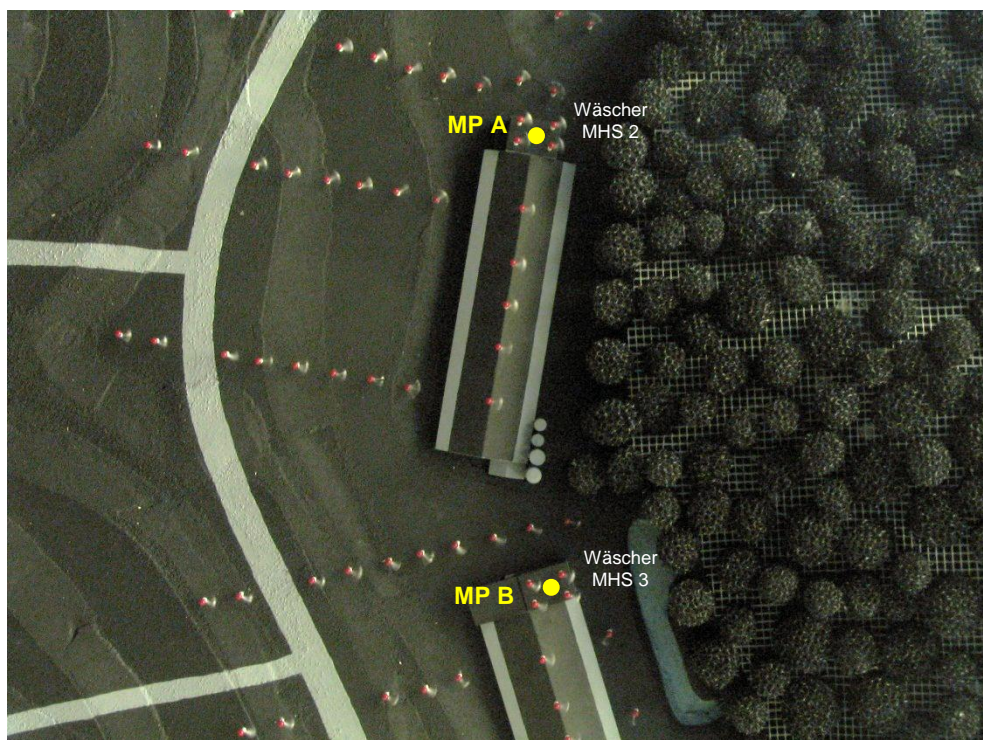


Abb. 5.2: Lagen der Messpunkte (MP) A und B auf den Wäschern MHS 2 und MHS 3 für die Planung.

Analog zu den Strömungssichtbarmachungen beschränken sich die Geschwindigkeitsmessungen für die Planung (Abgaskamine auf den Wäschergebäuden) auftragsgemäß auf die Windrichtungen 240 Grad, 260 Grad, 160 Grad und 180 Grad. Für diese Windrichtungen wurde überprüft, ob die für den Bestand (Abgaskamine entlang der Firstlinien) erhaltenen Ergebnisse auch für die Planung gelten.

5.2 Ställe auf der Leeseite des Hügels (Windrichtungen 60 und 80 Grad, nur Bestand)

In der Abbildung 5.3 sind die für die Windrichtung 60 Grad mit dem Hitzdraht gemessenen Vertikalprofile der mittleren horizontalen Windgeschwindigkeiten an den Messpunkten 1 und 2 für den Stall MHS 2 und 3 und 4 für den Stall MHS 3 und den Bestand dargestellt. Mit aufgenommen in die Abbildung wurden Symbole, die eine mittlere Höhe der Waldkrone bei 24 m und die Mündungshöhen der Abgaskamine im Bestand (3 m über First der Ställe) und nach der Planung kennzeichnen.

Im Einflussbereich des Waldes werden mit der Hitzdrahtsonde erheblich niedrigere Windgeschwindigkeiten gemessen als in entsprechender Höhe in der Anströmung. Die mittleren horizontalen Geschwindigkeiten an den Messpunkten betragen bis zu der Höhe der Baumkronen maximal ca. 0.8 – 1.1 m/s, wobei der Einflussbereich des Waldes mit den beobachteten Schwankungen der Strömungsrichtung höher hinaus bis in eine Höhe von etwa 30 – 40 m reicht.

Oberhalb des Einflussbereichs des Waldes richtet sich die Strömung wieder aus. Die horizontalen Windgeschwindigkeiten nehmen kontinuierlich mit der Höhe zu und erreichen am oberen Rand etwa die Werte der Anströmung.

Die bei der Windrichtung 80 Grad über dem Stall MHS 2 gemessenen mittleren horizontalen Windgeschwindigkeiten (siehe Abbildung 5.4) waren bis in eine Höhe von etwa 30 m, dem Einflussbereich des Waldes, weitgehend konstant. Sie betragen am Messpunkt 1 etwa 0.9 m/s und am Messpunkt 2 etwa 1.0 m/s. An den Messpunkten 3 und 4 auf Stall MHS 3 wurden mit Geschwindigkeiten von bis zu 1.4 m/s hinter dem Wald höhere Werte beobachtet, wobei bei diesen Messpunkten die Geschwindigkeit bereits ab einer Höhe von etwa 25 m bzw. 20 m zunimmt.

Vergleicht man die mittleren horizontalen Strömungsgeschwindigkeiten, die bei der Windrichtung 60 Grad auf Höhe der Kaminmündungen in der Größenordnung von 1 m/s und darunter liegen (wobei die Strömungsrichtung stark hin und her schwankt und dieser Wert somit als obere Schranke anzusehen ist), mit der Austrittsgeschwindigkeit der Abgase aus den Kaminen im Bestand von ganzjährig 7 m/s bzw. der gereinigten Abgase aus den Kaminen der geplanten Wäscher MHS 2 und MHS 3 von ganzjährig mindestens 8.7 m/s nach dem Gutachten von HPS (2020), wäre nur eine geringe horizontale Auslenkung der Abgasstrahlen zu erwarten, sofern man ähnliche Windverhältnisse auch über den Wäschergebäuden annimmt.

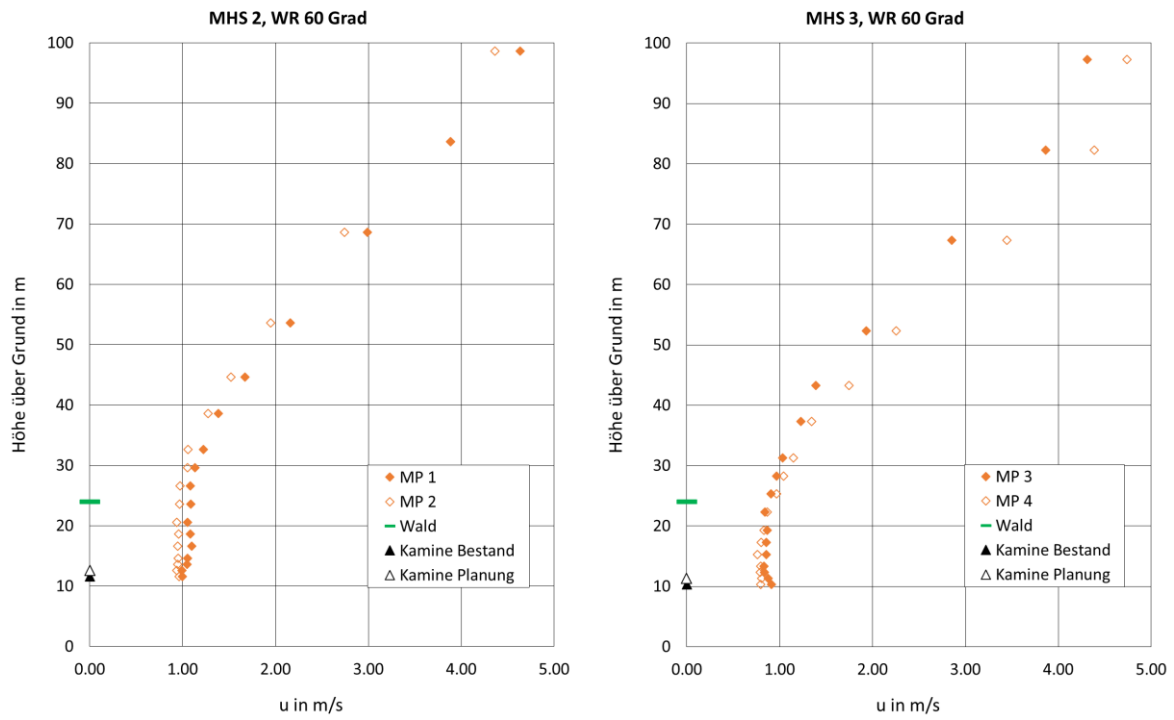


Abb. 5.3: Profile der mittleren Windgeschwindigkeiten bei der Windrichtung 60 Grad. Links MHS 2 (Messpunkte 1 und 2), rechts MHS 3 (Messpunkte 3 und 4). Zusätzlich ist die Höhe der Baumkronen („Wald“) und der Mündungen der Kamine im Bestand (3 m über First) und nach der Planung eingetragen.

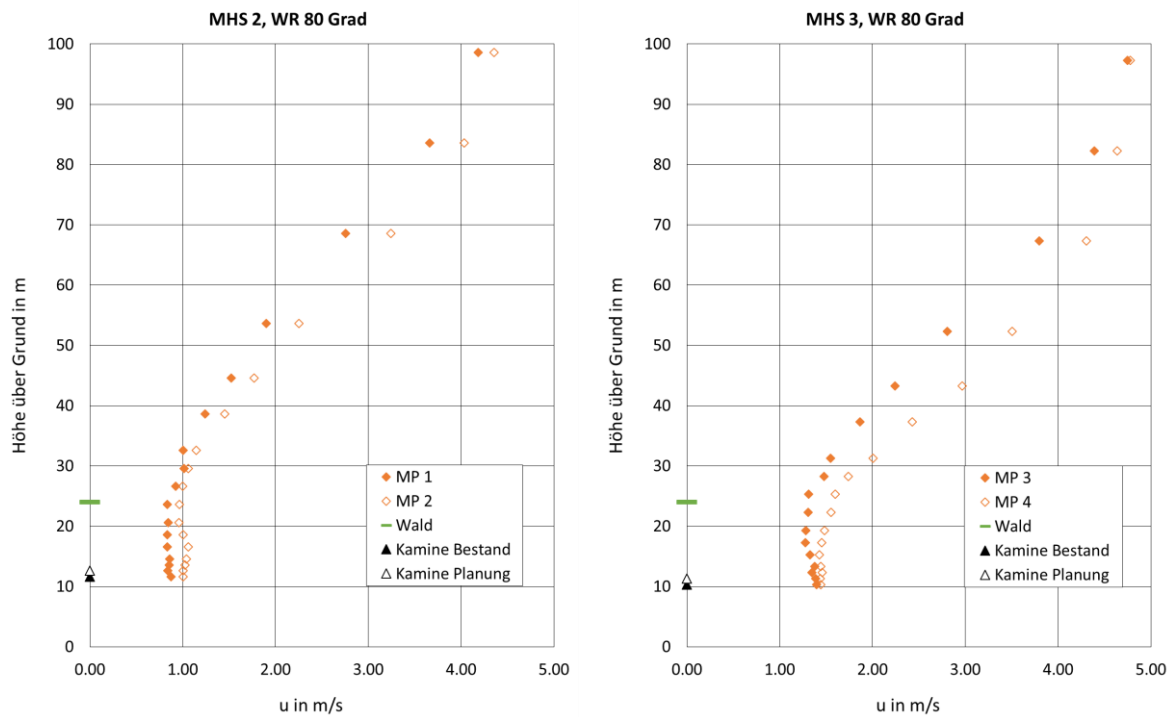


Abb. 5.4: Profile der mittleren Windgeschwindigkeiten bei der Windrichtung 80 Grad. Links MHS 2 (Messpunkte 1 und 2), rechts MHS 3 (Messpunkte 3 und 4). Zusätzlich ist die Höhe der Baumkronen („Wald“) und der Mündungen der Kamine im Bestand (3 m über First) und nach der Planung eingetragen.

Gleiches gilt für die Windrichtung 80 Grad, obwohl die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten bei dem MHS 3 auf Höhe der Kaminmündungen mit etwa ca. 1.4 m/s um 40 - 50 % höher sind als bei der Windrichtung 60 Grad. Verglichen mit der Mindestaustrittsgeschwindigkeit der Abgasstrahlen von 7 m/s aus den Kaminen im Bestandsfall bzw. von 8.7 m/s aus den Wäschern sind die Windgeschwindigkeiten weiterhin niedrig.

Bei beiden untersuchten Windrichtungen mit den Ställen in Lee des bewaldeten Hügels sind die Windgeschwindigkeiten im Bereich der Mündungen der Abgaskamine somit wesentlich niedriger als die Austrittsgeschwindigkeit der Abgasstrahlen. Da zudem keine Rezirkulationszone im Sinne der VDI 3781 Blatt 4 (2017) vorliegt, wäre der Ansatz einer, ggf. reduzierten, Überhöhung nicht generell zu verwerfen. Der in der Ausbreitungsrechnung von HPS (2020) gewählte vollständige Verzicht auf den Ansatz einer Überhöhung für den Windrichtungssektor 50 Grad – 90 Grad ist somit eher konservativ.

5.3 Ställe auf der Luvseite des Hügels (Windrichtungen 240 und 260 Grad)

Befinden sich die Ställe bei den häufig auftretenden Windrichtungen 240 Grad und 260 Grad auf der windzugewandten Seite des Hügels, bestand die Befürchtung, dass es vor dem Wald zu einer starken Verzögerung der Strömung kommt und sich ein Frontwirbel, wie bei einem undurchströmbaren Bauwerk, ausbildet. Dieser würde unverdünnte Abgase aus den Kaminen unmittelbar zum Boden hin transportieren.

Wie die Windgeschwindigkeitsprofile z. B. bei der Windrichtung 240 Grad zeigen (siehe Abbildung 5.5), tritt dieser Effekt aber aufgrund der Durchströmbarkeit des Waldes nicht auf. Bei den Profilen über dem nahe an der Waldkante gelegenen MHS 2 sind die Geschwindigkeiten in Dachnähe über den Messpunkten 1 und 2 mit ca. 2 m/s um 10 – 20 % im Bestand geringer als in vergleichbarer Höhe in der Anströmung, während das Profil über Messpunkt A auf dem Wäschergebäude um 10 – 20 % höhere Werte in Dachnähe aufweist. Die Ausrichtung der Windfähnchen in Abbildung 4.11 zeigte, dass bei der Anströmrichtung 240 Grad die dominierende Komponente der Strömung bei den Profilen über den Messpunkten 1 und 2 fast frontal in Richtung auf die Waldkante bzw. den bewaldeten Hang hin verläuft und somit stärker abgebremst wird, als die Strömung über dem Wäschergebäude, die leicht abgelenkt wird.

Die Profile am Messpunkt 3 über First des Stalls MHS 3 und Messpunkt B über dem benachbarten Wäscher sind mit Geschwindigkeiten von ca. 2.5 m/s auf den unteren 20 Metern über Grund im Rahmen der Messgenauigkeit deckungsgleich. Die beiden Punkte mit etwas höheren Geschwindigkeiten über dem Wäscher (MP B) gehen auf die Überströmung der vorgelagerten Überdachung des ASL-Tanks zurück. Das Profil über dem Messpunkt 4 zeigt im Bereich bis 20 m etwas niedrigere Strömungsgeschwindigkeiten. Die Windgeschwindigkeit im Bereich der Mündungen der Abgaskamine bei MHS 3 entspricht, vor allem bei den Messpunkten 3 und B, in etwa der bei Messpunkt A über dem Wäscher von MHS 2.

Wie dort verlaufen nach den Windfähnchen die Strömungsrichtungen leicht schräg zum bewaldeten Hang mit einer hangparallelen Komponente, was bei MHS 3 auf eine teilweise Umströmung des Hanges in Richtung der Lichtung auf dem Hügel im Südosten weist.

Bei der Windrichtung 260 Grad (Abbildung 5.6) ähneln die dachnahen Windgeschwindigkeiten über den Messpunkten 1 und 2 über MHS 2 mit ca. 2 m/s denen bei der Windrichtung 240 Grad. Die Werte über dem geplanten Wäscher MHS 2 sind mit 2.1 – 2.2 m/s nur geringfügig höher.

Dagegen sind am Messpunkt B über dem Wäscher von Stall MHS 3 die dachnahen Windgeschwindigkeiten mit bis zu 2.9 m/s deutlich höher als an den Messpunkten 3 und 4 über First. Das Wäschergebäude mitsamt der vorgelagerten Überdachung des ASL-Tanks wird über Eck angeströmt, was zu einer Verstärkung der bereits bei der Windrichtung 240 Grad beobachteten Geschwindigkeitserhöhung führt. Auch an dem Messpunkt 4 sind die dachnahen Geschwindigkeiten höher als bei der Windrichtung 240 Grad. Ein Vergleich der Abbildungen 4.11 und 4.12 zeigt, dass die Fähnchen auf dem First des Stalles etwas stärker entlang der Firstlinie ausgerichtet sind. Die Umströmung des Hanges nimmt bei dieser Windrichtung gegenüber 240 Grad zu, wodurch sich die Verzögerung der Strömung aufgrund des Waldeinflusses reduziert.

Gegenüber den Windrichtungen 60 Grad und 80 Grad mit den Ställen auf der windabgewandten Seite des Hügels sind bei den Windrichtungen 240 Grad und 260 Grad in Dachnähe höhere Windgeschwindigkeiten ähnlich zu denen in der Anströmung zu beobachten. Über allen betrachteten Messpunkten bleibt aufgrund der Durchströmbarkeit des Waldes die Form des Geschwindigkeitsprofils im wesentlichen erhalten, die Windgeschwindigkeiten nehmen tendenziell mit der Höhe stetig zu.

Mit den höheren Windgeschwindigkeiten nimmt zwar die Ablenkung der Abgasstrahlen aus den Kaminen zu. Allerdings weist die Ablenkung (mit Ausnahme der Kamine auf Stall MHS 2 bei der Windrichtung 240 Grad), vor allem bei MHS 3, eine Komponente in seitliche Richtung längs des Hanges auf. Die Ausbildung eines Frontwirbels vor dem Waldbereich ist anhand der gemessenen Vertikalprofile der horizontalen Windgeschwindigkeiten weder für den Bestand noch für die Planung mit den Wäschern nachzuweisen. Dies erlaubt den Ansatz einer Fahnenüberhöhung.

5.4 Talparallele Strömung (Windrichtungen 160 und 180 Grad)

Obwohl eine Strömung aus südlicher Richtung parallel zum Tal bzw. dem bewaldeten Hang selten auftritt, ist sie relevant, da sie die emittierten Abgase in Richtung Eschelbach transportiert. Bereits die Strömungssichtbarmachungen mit Fähnchen in den Abbildungen 4.9 und 4.10 für den Bestand und 4.13 und 4.14 für die Planung zeigten bei den Windrichtungen 160 Grad und 180 Grad eine im wesentlichen freie Anströmung der Ställe, was die Geschwindigkeitsmessungen (siehe Abbildungen 5.7 und 5.8) bestätigen.

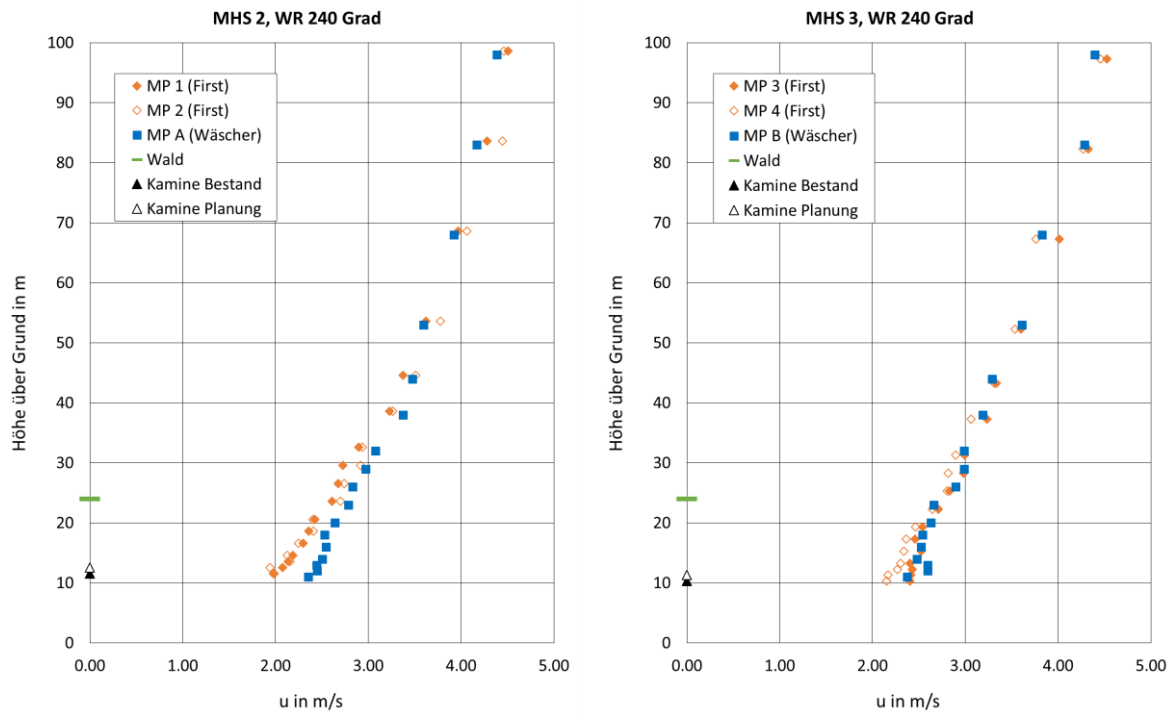


Abb. 5.5: Profile der mittleren Windgeschwindigkeiten bei der Windrichtung 240 Grad. Links MHS 2 (Messpunkte 1 und 2 über First, Messpunkt A über Wäscher), rechts MHS 3 (Messpunkte 3 und 4 über First, Messpunkt B über Wäscher). Höhe der Baumkronen („Wald“) und der Mündungen der Kamine wie zuvor.

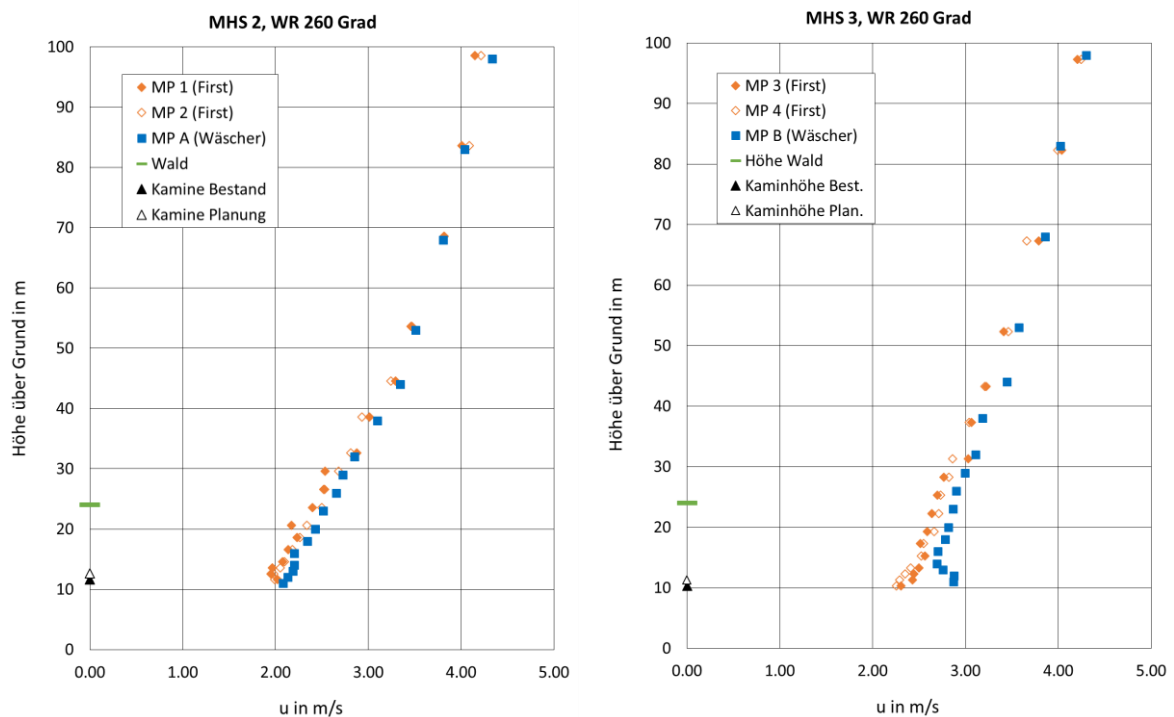


Abb. 5.6: Profile der mittleren Windgeschwindigkeiten bei der Windrichtung 260 Grad. Links MHS 2 (Messpunkte 1 und 2 über First, Messpunkt A über Wäscher), rechts MHS 3 (Messpunkte 3 und 4 über First, Messpunkt B über Wäscher). Höhe der Baumkronen („Wald“) und der Mündungen der Kamine wie zuvor.

Bei der Windrichtung 160 Grad (Abbildung 5.7) stellen sich bei MHS 2 im Bestand an den Messpunkten 1 und 2 Windgeschwindigkeiten in Dachnähe von ca. 2.8 – 2.9 m/s ein. Bei MHS 3 und den Messpunkten 3 und 4 sind die Geschwindigkeiten mit 2.5 – 2.7 m/s etwas geringer. Die über den Wäschern der beiden Ställe gemessenen Profile über den Punkten A und B sind deckungsgleich zu den Profilen über First der jeweiligen Ställe. Dies verwundert nicht, da die Strömung sowohl in Bodennähe als auch über Dach der beiden Ställe, bzw. über den beiden Wäschern, im Wesentlichen parallel zur Anströmung (siehe auch die Abbildungen 4.9 und 4.13) verläuft.

Die Drehung des Modells um 20 Grad auf die Windrichtung 180 Grad bewirkt, dass Stall MHS 3 und die Waldkante des Hügels schräg angeströmt werden. Die Windgeschwindigkeiten an den Messpunkten 3 und 4 über First von Stall MHS 3 betragen im Bereich der Abgaskamine des Bestandes ungefähr 2.3 m/s. Über dem geplanten Wäscher MHS 3, der sich weiter stromab in Richtung MHS 2 befindet, steigt die Windgeschwindigkeit auf etwa 2.5 m/s an, da die Strömung durch die Waldkante weiter umgelenkt wird.

Im weiteren Verlauf der entlang der Waldkante bzw. des Talverlaufes gelenkten Strömung stellen sich über dem Stall MHS 2 in Dachnähe Windgeschwindigkeiten von 2.9 m/s (bei Messpunkt 2) und 3.3 m/s (bei Messpunkt 1) ein. Über dem Wäscher MHS 2 wird mit ca. 3.5 m/s im Bereich der Abgaskamine die höchste Geschwindigkeit erreicht.

Da bei den talparallelen Windrichtungen die Form der Geschwindigkeitsprofile, trotz teils zunehmender Geschwindigkeiten in Bodennähe, im Wesentlichen erhalten bleibt, ist ein weitgehend ungestörter Abtransport der Abgase mit der freien Luftströmung anzunehmen. Der Ansatz einer Überhöhung ist möglich. Dabei ist aber die Erhöhung der Windgeschwindigkeiten (siehe Messpunkt 1 und Messpunkt A bei MHS 2) durch die Lenkung der Strömung entlang der Waldkante zu berücksichtigen.

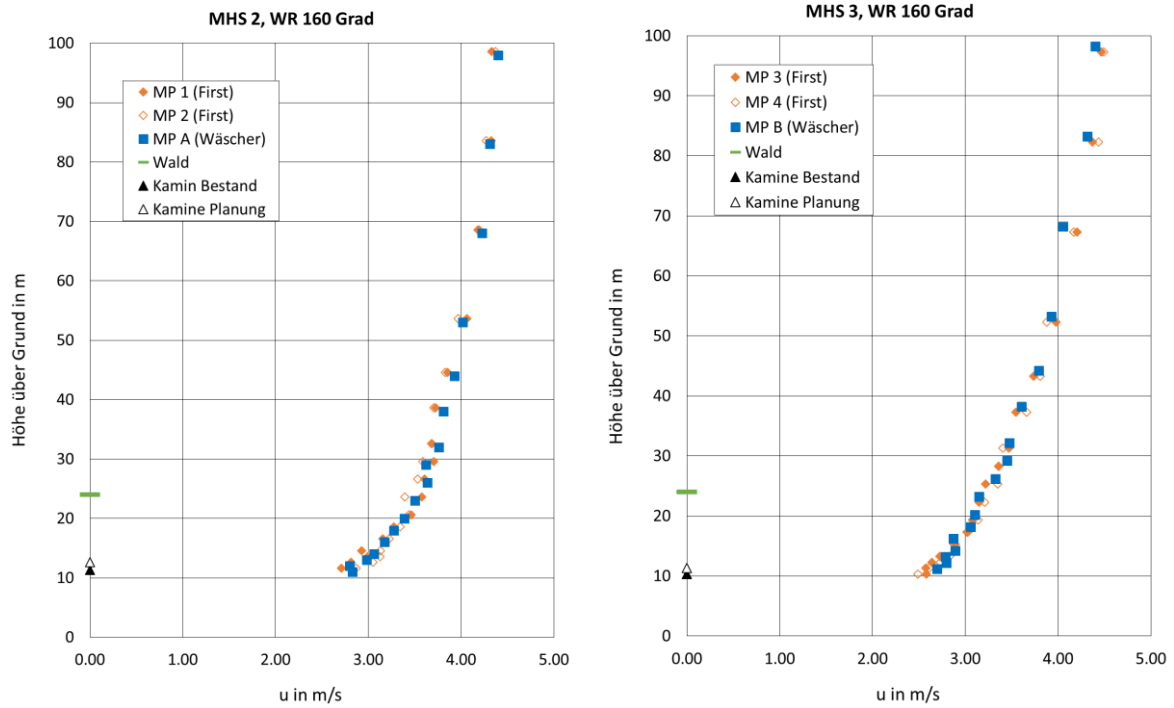


Abb. 5.7: Profile der mittleren Windgeschwindigkeiten bei der Windrichtung 160 Grad. Links MHS 2 (Messpunkte 1 und 2 über First, Messpunkt A über Wäscher), rechts MHS 3 (Messpunkte 3 und 4 über First, Messpunkt B über Wäscher). Höhe der Baumkronen („Wald“) und der Mündungen der Kamine wie zuvor.

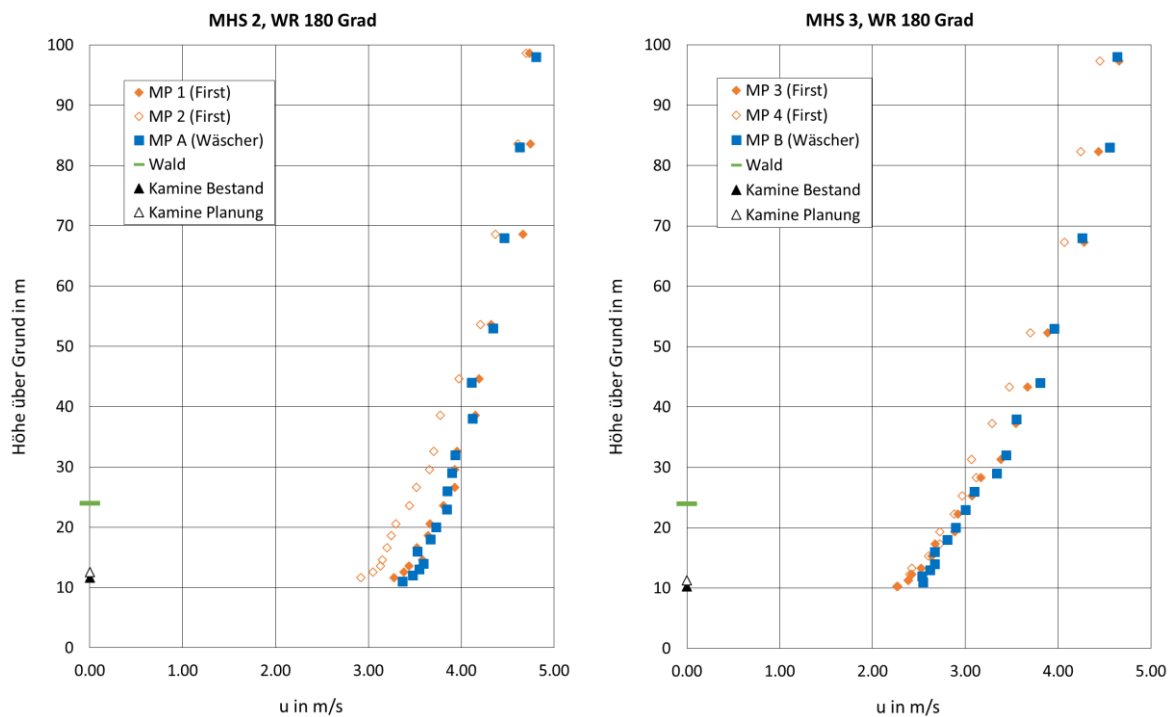


Abb. 5.8: Profile der mittleren Windgeschwindigkeiten bei der Windrichtung 180 Grad. Links MHS 2 (Messpunkte 1 und 2 über First, Messpunkt A über Wäscher), rechts MHS 3 (Messpunkte 3 und 4 über First, Messpunkt B über Wäscher). Höhe der Baumkronen („Wald“) und der Mündungen der Kamine wie zuvor.

6. Schlussfolgerungen

An dem unbewaldeten Hügel finden, von einigen lokalen, stärker geneigten Stellen abgesehen, keine Rückströmungen bzw. Strömungsablösungen statt. Daher ist die Kombination aus Hügel und Wald entscheidend für die Beurteilung der Ableitbedingungen der Abgase:

Bei den Windrichtungen 60 Grad und 80 Grad mit den Ställen auf der windabgewandten Lee-seite des Hügels zeigten die Sichtbarmachung der Strömung mit Rauch und die Windfähnchen auf Höhe der Kaminmündungen entlang der Firstlinien der Ställe (Bestand) stark instationäre Strömungen wechselnder Richtungen. Eine stabile Rückströmung, wie sie sich in der Rezirkulationszone hinter Gebäuden im Sinne der VDI 3781 Blatt 4 (2017) ausbildet, wurde nicht beobachtet. Phasenweise findet zwar eine Rückströmung in den Waldbereich am Hang des Hügels statt, kurz danach verläuft die Strömung aber wieder in Richtung der Anströmung. Damit ist die Strömungsrichtung nicht eindeutig definierbar.

Im vorliegenden Fall wurde die Anströmgeschwindigkeit im Windkanal so gewählt, dass sie näherungsweise mittleren Verhältnissen in der Natur entspricht. Die im Windkanal gemessenen Windgeschwindigkeitswerte können daher ohne Umrechnung für den Vergleich mit der Natur bei solchen Verhältnissen herangezogen werden.

Die gemessenen mittleren horizontalen Strömungsgeschwindigkeiten liegen bis in eine Höhe von etwa 30 m über Boden bei der Windrichtung 60 Grad in der Größenordnung von 1 m/s und darunter. Bei derart niedrigen Windgeschwindigkeiten liegt in der Regel keine gerichtete Strömung mehr vor. Die Windrichtung 80 Grad führt zu etwas höheren horizontalen Windgeschwindigkeiten in der Größenordnung von bis zu 1.4 m/s. Verglichen mit typischen Austrittsgeschwindigkeiten der Abgasstrahlen von 7 m/s im Bestandsfall und ca. 9 m/s und mehr mit den geplanten Wäschern sind beide Werte niedrig, so dass bei diesen Windrichtungen die horizontale Auslenkung der Abgasstrahlen gering bleibt.

Der Wald beeinflusst zwar die Strömung wie beschrieben, führt aber nicht zu einer stabilen Rezirkulationszone, wie sie hinter Gebäuden im Sinne der VDI 3781 Blatt 4 (2017) auftritt und von den Gegengutachtern ins Feld geführt wird. Vielmehr ist der Ansatz einer Überhöhung auch bei Anströmungen über den bewaldeten Hügel nicht generell zu verwerfen. Gegebenenfalls ist die Überhöhung aber aufgrund der fluktuierenden Strömungsrichtungen abzumindern.

Da aber aufgrund der derzeit vorhandenen Daten nicht quantifiziert werden kann, in welchem Umfang eine Abminderung zu geschehen hat, wurde in dem immissionsschutztechnischen Gutachten von HPS (2020) bei den Ausbreitungsrechnungen im Sinne konservativer Immissionswerte von dem Ansatz einer Überhöhung der Abgasfahnen im Windrichtungssektor zwischen 50 Grad und 90 Grad, d. h. bei einer Anströmung aus Nordost bis Ost über den bewaldeten Hügel, vollständig abgesehen.

Befinden sich die Ställe auf der dem Wind zugewandten Seite des Hügels, wie bei den Windrichtungen 240 Grad und 260 Grad, verläuft die Strömung auf Höhe der Kaminmündungen, wie bei der Windrichtung 240 Grad und MHS 2 entlang der Firstlinien (Kamine im Bestand) frontal auf den Wald zu, und oder sie wird leicht entlang der Waldkante abgelenkt. Ein Frontwirbel vor dem Wald, wie vor undurchlässigen Gebäuden, war nicht zu beobachten.

Die gemessenen horizontalen Windgeschwindigkeiten beginnen bei MHS 2 mit ca. 2 m/s auf dem Niveau der Mündungen der Kamine im Bestand und nehmen mit der Höhe zu. Bei MHS 3 sind die Geschwindigkeiten mit 2.2 – 2.4 m/s etwas höher und bleiben am MP 3 bis in eine Höhe von ca. 20 m über Grund bzw. 13 m über First konstant.

Über dem geplanten Wäscher MHS 2 (Messpunkt A) stellten sich Windgeschwindigkeiten in Dachnähe von 2.1 - 2.5 m/s ein, über dem Wäscher MHS 3 (Messpunkt B), durch den Einfluss der vorgelagerten Überdachung des ASL-Tanks, von bis zu 2.9 m/s.

Da weder aus der Strömungssichtbarmachung noch aus den Geschwindigkeitsprofilen ein Frontwirbel vor dem Wald abgeleitet werden kann, ist von einer zwar in der horizontalen Richtung beeinflussten, aber weitgehend ungestörten Strömung auszugehen. Eine Fahnenüberhöhung kann sowohl für den Bestand als auch für die Planung angesetzt werden.

Werden die Ställe aus südlichen Richtungen entlang des Tales angeströmt, folgt die bodennahe Strömung eher dem Talverlauf, die Strömung im Bereich der Mündungen der Kamine eher der Windrichtung der Anströmung.

Bei der Windrichtung 160 Grad sind die vertikalen Windprofile über den jeweiligen Ställen für die Messpunkte über First und über den Wäschern im Rahmen der Reproduzierbarkeit der Messungen deckungsgleich und weitgehend ungestört. Die Profile der Windgeschwindigkeit bei der Windrichtung 180 Grad zeigen eine Zunahme der dachnahen Werte von 2.3 – 2.5 m/s über dem Stall MHS 3 und dem zugehörigen geplanten Wäscher auf 2.9 – 3.3 m/s über der Firstlinie von Stall MHS 2 und 3.5 m/s über dem geplanten Wäscher MHS 2 auf. Letztere Werte sind die höchsten bei den untersuchten Windrichtungen.

Da sich die Windprofile auch bei den Windrichtungen 160 Grad und 180 Grad weitgehend unbeeinflusst darstellen, ist ein ungestörter Abtransport der Abgase mit der freien Luftströmung anzunehmen und der Ansatz einer Überhöhung möglich. Dabei ist aber die Erhöhung der Windgeschwindigkeiten durch die Lenkung der Strömung entlang der Waldkante zu berücksichtigen.

7. Literatur

Argusim Umwelt Consult (2019): „Dokumentation eines Wetterdatensatzes zur Verwendung in Ausbreitungsrechnungen – Ingolstadt (DWD 2410)“. Stand 19.09.2019. Berlin: Argusim Umwelt Consult Andre Förster.

ESDU (1985): “Characteristics of atmospheric turbulence near the ground. Part II: Single point data for strong winds (neutral atmosphere)”. In: ESDU International 85020.

Gromke (2018): „Wind tunnel model of the forest and its Reynolds number sensitivity“. Jour. Wind Eng. and Ind. Aerodyn, 175, pp. 53 – 64.

Grunert, Benndorf und Klingbeil (1984): „Neuere Ergebnisse zum Aufbau von Schutzpflanzungen“. Beitr. Forstwirtsch., 18, 3, S. 108 – 115.

HFI (2015): „Immissionsschutztechnisches Gutachten – Errichtung von zwei Masthähnchenställen in Eschelbach a. d. Ilm – Luftreinhaltung“. WOZ-1967-01/1967-01_E12.docx, Stand 31.08.2015. Landshut: Hock Farny Ingenieure.

HFI (2017): Berechnungsergebnisse für ein Kontrollscenario mit einer Rauigkeitslänge von $z_0 = 0.5$ m. Mitteilung vom 23.10.2017 an RAin Lindau, Kanzlei Graf von Westphalen. Landshut: Hock Farny Ingenieure.

HPS (2020): „Immissionsschutztechnisches Gutachten – Luftreinhaltung - Errichtung und Betrieb von zwei Masthähnchenställen sowie Änderung von zwei bestehenden Masthähnchenställen – Prognose und Beurteilung anlagenbezogener Geruchs-, Ammoniak- Stickstoff – und Staubimmissionen sowie Bioaerosolen“. WOZ-1967-01/1967-06_E01_Entwurf#2.docx, Stand 03.02.2020. Landshut: Hock & Partner Sachverständige PartG mbB.

Janicke, Janicke, Bächlin und Theurer (2018): „Weiterentwicklung ausgewählter methodischer Grundlagen der Schornsteinhöhenbestimmung und der Ausbreitungsrechnung nach TA Luft“. Abschlussbericht, Forschungskennzahl 3714 43 204 0. Dessau: Umweltbundesamt.

Ruck (2019): Vorlesung Umweltaerodynamik, <https://www.umweltaerodynamik.de/bilder-originale/pub1/U-PUP/thumbnails.html>, aufgerufen am 12.08.2019.

TA Luft (2002): Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft) vom 24.07.2002.

VDI 2280 (2005): „Ableitbedingungen für organische Lösemittel“. Berlin: Beuth Verlag.

VDI 3781 Blatt 4 (2017): „Umweltmeteorologie – Ableitbedingungen für Abgase; Kleine und mittlere Feuerungsanlagen sowie andere als Feuerungsanlagen“. Berlin: Beuth Verlag.

VDI 3782 Blatt 3 Entwurf (2019): „Ausbreitung von Luftverunreinigungen in der Atmosphäre – Berechnung der Abgasfahnenüberhöhung“. Berlin: Beuth Verlag.

VDI 3783 Blatt 12 (2000): „Umweltmeteorologie - Physikalische Modellierung von Strömungs- und Ausbreitungsvorgängen in der atmosphärischen Grenzschicht; Windkanalanwendungen“. Berlin: Beuth Verlag.

VDI 3783 Blatt 13 (2010): „Umweltmeteorologie - Qualitätssicherung in der Immissionsprognose; Anlagenbezogener Immissionsschutz; Ausbreitungsrechnung gemäß TA Luft“. Berlin: Beuth-Verlag.

Weitere verwendete Unterlagen:

Ausschnitte der amtlichen topografischen Karte incl. Höhenlinien (Originalmaßstab 1:5000), Stand 24.04.2019. Bayerische Vermessungsverwaltung, Landesamt für Digitalisierung Breitband und Vermessung.

Lageplan (Originalmaßstab 1:1000), Grundrisse und Ansichten der Ställe MHS 2 und MHS 3 (Originalmaßstab 1:200), übermittelt vom Auftraggeber am 04.05.2019.

Maßangaben zu den Futtersilos bei MHS 2, übermittelt vom Auftraggeber am 23.05.2019.

Grundrisse und Ansichten zu den geplanten Wäschergebäuden einschließlich Anordnung der Abgaskamine, übermittelt vom Auftraggeber am 03.01.2020, 10.01.2020 und 29.01.2020.

Anhang

A1 Beschreibung des Windkanals

Der Windkanal des Ingenieurbüros Theurer, Hanhofen, in dem die Experimente durchgeführt wurden, ist ein Grenzschichtwindkanal mit offenem Rücklauf und einer Länge von insgesamt ca. 8.5 m. Der Kanal wird im Druckbetrieb gefahren. Siebe, ein Filtervlies und wabenförmige Gleichrichter hinter dem Gebläse dienen der Vergleichmäßigung der Strömung.

Die Anlauf- und die Messstrecke des Windkanals haben eine Breite von ca. 2 m und eine Höhe von ca. 1.4 m. Der Windkanal ist mit einer verstellbaren Decke ausgestattet, um etwaige Druckgradienten am oberen Rand der modellierten Grenzschicht ausgleichen zu können. Die maximal erreichbare Strömungsgeschwindigkeit im Kanal liegt bei ca. 7 m/s.

Abbildung A1.1 zeigt das Modell mit den Ställen MHS 2 und MHS 3 (noch ohne Wäschergebäude) und dem bewaldeten Hügel im Windkanal mit Blick entgegen der Strömungsrichtung. Im Hintergrund sind das Gebläse und die dreiecksförmigen Wirbelgeneratoren, die die naturähnliche Grenzschicht vorformen, zu erkennen. Es folgen eine ca. 5 m lange Anlaufstrecke mit Bodenrauigkeiten bzw. Rauheitselementen zur weiteren Erzeugung der Grenzschicht und die ca. 2.5 m lange Messstrecke, in der sich das Modell befindet.

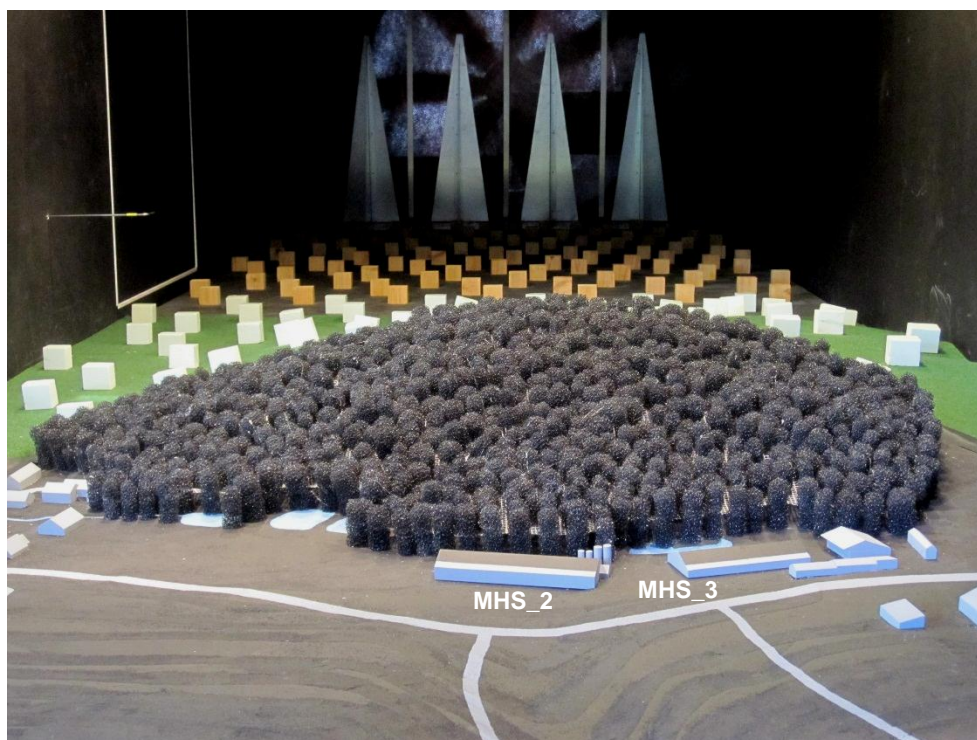


Abb. A1.1: Blick in den Windkanal entgegen der Strömung mit dem Modell bei der Windrichtung 60 Grad im Vordergrund. Im Hintergrund das Gebläse und die Anlaufstrecke mit Wirbelgeneratoren und Rauheitselementen am Boden.

Zum Nachweis der Eignung des Windkanals für die physikalische Modellierung von Strömungsvorgängen in der atmosphärischen Grenzschicht, wie in der vorliegenden Untersuchung, wurde die Grundströmung im Windkanal nach der VDI-Richtlinie 3783, Blatt 12 (2000), überprüft.

A2 Ähnlichkeitsgesetze und Anforderungen an Modellversuche

Im Windkanal gewonnene Ergebnisse lassen sich bei Einhaltung so genannter Ähnlichkeitsgesetze direkt auf die Natur übertragen. Grundlegende Ähnlichkeitsgesetze und die daraus resultierenden Anforderungen für Strömungs- und Ausbreitungsuntersuchungen im Windkanal sind in der VDI-Richtlinie 3783, Blatt 12 (2000), zusammengestellt.

In der vorliegenden Untersuchung war zusätzlich der Einfluss des Waldes auf die Strömung wesentlich. Die hierbei maßgeblichen Ähnlichkeitsgesetze finden sich in Gromke (2018).

A2.1 Geometrische Ähnlichkeit

Die Ähnlichkeitsgesetze fordern eine geometrische Ähnlichkeit der Modelle. Topografie und Gebäude sind maßstäblich verkleinert zur Natur nachzubilden. Im vorliegenden Fall geschah dies im Maßstab 1:300 innerhalb eines Umkreises mit einem Radius von ca. 300 m um das nördliche Ende von Masthähnchenstall MHS 2 (siehe den in der Abbildung 1.1 dargestellten, im Windkanal modellierten Ausschnitt).

Der modellierte Ausschnitt beinhaltet den Hügel im Osten der Ställe MHS 2 und MHS 3 sowie die übrige Topografie (siehe Abbildung A2.1). Der Verlauf der Höhenschichtlinien wurde einem vergrößerten Ausschnitt der amtlichen topografischen Karte entnommen und ggf. interpoliert. Der modellierte Höhenbereich reicht von 430 m+NN im Bereich Eschelbach – Waldweg bis etwa 480 m+NN im Bereich der Kuppe des Hügels.

Die Stallgebäude einschließlich der Futtersilos am MHS 2 wurden nach Plänen bzw. Maßangaben des Auftraggebers nachgebildet, wie auch die geplanten Gebäude der Abgaswäscher einschließlich des ASL-Tanks mit Überdachung.

Um die Versperrung des Windkanalquerschnittes durch das Modell einschließlich des Hügels zu reduzieren, wurde der tiefste Punkt des Modells im Windkanal um ca. 5 cm gegenüber der Höhe der Anlaufstrecke im Windkanal abgesenkt. Durch diese Maßnahme konnte die Versperrung des Windkanalquerschnittes durch den unbewaldeten Hügel mit ca. 4.2% auf unter 5% begrenzt werden. Sofern man den Bereich der Bäume als vollkommen undurchströmbar ansieht, steigt die Versperrung auf ca. 8.5% an. Die tatsächliche Versperrung bleibt aber geringer, da der Wald durchströmbar ist.

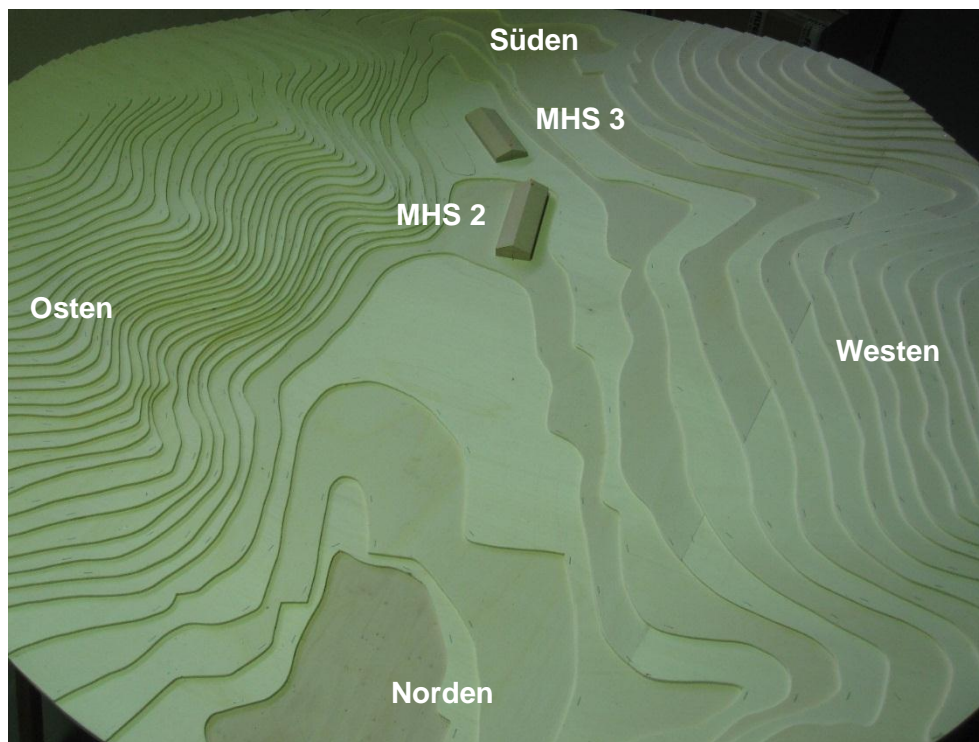


Abb. A2.1: Topographiemodell mit Höhenschichtlinien im Abstand von 1.5 m, beginnend auf einem Geländeniveau von etwa 430 m+NN. Blick aus Richtung Eschelbach nach Süden. In das Modell platziert sind die Modellgebäude der beiden Masthähnchenställe MHS 2 und MHS 3.

A2.2 Modellierung des Waldes

Für die Modellierung der Waldvegetation wurden Ähnlichkeitsbedingungen nach Gromke (2018) herangezogen. Dort wird unterschieden in den Stammraum der Bäume und ihren Kronenraum.

Bei der Modellierung des Waldes wurde aufgrund der bei dem Ortstermin bestimmten Baumhöhen, außer an der Waldkante, wo der Kronenraum der Laubbäume fast bis zum Boden reichte, von einem ca. 10 – 12 m hohen Stammraum und einem 9 – 15 m hohem Kronenraum ausgegangen. Dies führt zu Baumhöhen zwischen 19 und 27 m in der Natur. Als Besatzdichte wurden ca. 100 – 150 Bäume / ha ermittelt.

Für den Stammraum stellt sich aerodynamische Ähnlichkeit dann ein, wenn das Verhältnis zwischen der Widerstandskraft aufgrund der Stämme und der Strömungskraft durch die ungestörte Anströmung in der Natur (Index N) und im Modell (Index M) gleich ist.

Unter der Annahme, dass die Widerstandsbeiwerte c_D der als Stämme betrachteten Zylinder in Natur und Modell gleich sind, gilt

$$d_M \cdot H_M \cdot BD_M = d_N \cdot H_N \cdot BD_N \rightarrow BD_M = BD_N \cdot (d_N / d_M) \cdot (H_N / H_M) \quad (\text{A2.1})$$

mit

- d Stammdurchmesser in m,
 H Baumhöhe als charakteristische Länge in m,
 BD Besatzdichte in Bäume / ha bzw. „Ersatzstämme“ / m².

Bei der Modellierung der Stämme werden üblicherweise mehrere Einzelstämme zu einem Zylinder größeren Durchmessers als „Ersatzstamm“ zusammengefasst (siehe Gromke, 2018). Dieser „Ersatzstamm“ wurde hier durch gerillte, 30 – 40 mm hohe Holzdübel mit einem Durchmesser von 6 mm im Modell abgebildet. Die charakteristischen Größen für die Modellierung des Stammraumes bzw. zur Ermittlung der erforderlichen Besatzdichte sind in Tabelle A2.1 zusammen gestellt:

Tab. A2.1: Charakteristische Größen für die Modellierung des Stammraumes

Maßstab 1:300	Natur	Modell
Stammdurchmesser d	0.5 m	gewählt (s. oben): 0.006 m
Baumhöhe H	gewählt: 24 m	0.08 m
Besatzdichte BD	150 Bäume / ha	375 „Ersatzstämme“ / m ²

Für den Kronenraum des Waldes stellt sich aerodynamische Ähnlichkeit dann ein, wenn das Verhältnis zwischen der Widerstandskraft aufgrund der Durchströmung des Kronenraumes bzw. dem Druckverlust Δp und der Strömungskraft, beschrieben durch den dynamischen Druck p_{dyn} , in der Natur (Index N) und im Modell (Index M) gleich ist:

$$(\Delta p / p_{\text{dyn}})_N = (\Delta p / p_{\text{dyn}})_M \quad (\text{A2.2})$$

mit

- Δp Druckverlust zwischen Luv und Lee der Durchströmstrecke in N/m²,
 p_{dyn} dynamischer Druck in N/m², $p_{\text{dyn}} = (\rho_{\text{Luft}} \cdot u^2) / 2$, in N/m²,
 ρ_{Luft} Dichte der Luft in kg/m³,
 u Strömungsgeschwindigkeit in m/s.

Zur Modellierung des Kronenraumes des Waldes wird ein poröses Filtermaterial mit PPI-10 eingesetzt. Für derartiges Material hat Gromke (2018) einen Druckverlustbeiwert λ ,

$$\lambda = \Delta p / (p_{\text{dyn}} \cdot D) \quad (\text{A2.3})$$

mit

- D Länge der Durchströmstrecke in m

bei erzwungener Durchströmung von $\lambda_M = 250/\text{m}$ bestimmt.

Aus der Ähnlichkeitsgleichung

$$\lambda_N / \lambda_M = D_M / D_N \quad (\text{A2.4})$$

folgt, dass das Verhältnis der Druckverlustbeiwerte λ_N / λ_M aus Natur und Modell indirekt proportional zu dem Verhältnis der Längen bzw. dem Modellmaßstab 1:300 ist. Umgerechnet auf Naturverhältnisse entspricht somit der Wert $\lambda_M = 250/m$ für das bei der Modellierung verwendete Filtermaterial einem Druckverlustbeiwert in der Natur von $\lambda_N = 0.83/m$.

Für natürliche Bäume lassen sich aus den dimensionslosen c_W -Werten von 0.4 – 0.6 für kiefernähnliche Pinien, 0.8 für Fichten und 1.0 für Wacholder bei Ruck (2019) Druckverlustbeiwerte λ von $= 0.4/m - 1.0/m$ ableiten. Grunert, Benndorf und Klingbeil (1984) geben λ -Werte für Laubbäume zwischen 0.2/m im Zustand ohne Laub und, je nach Dichte des Blattwerks und der Zweige, 0.5/m - 4/m im belaubten Zustand (außer Feldahorn) an. Vor allem bei Laubbäumen nehmen die λ -Werte mit der Windgeschwindigkeit erheblich ab, da sich die Blätter dann stärker an die Zweige anlegen, was den Strömungswiderstand des Kronenraumes verringert und die Durchströmung erhöht. Der modellierte Druckverlustbeiwert von $\lambda = 0.83/m$ in der Natur stellt daher einen repräsentativen Wert für natürliche Bäume dar.

Da die so modellierten Kronen der Modellbäume in einer zu der Natur vergleichbaren Besatzdichte angeordnet sind, ist davon auszugehen, dass auch die Durchströmung des Kronenraumes des Waldes naturähnlich ist.

A2.3 Anström Grenzschicht

Die Ähnlichkeit der Anströmung bzw. der anströmenden Grenzschicht wird beschrieben durch ähnliche vertikale Geschwindigkeitsprofile und ähnliche Turbulenzverhältnisse in Natur und Modell.

Im vorliegenden Fall wurde im Windkanal eine Anström Grenzschicht eingerichtet, die nach der CORINE-Klasse 324 typisch ist für Wald-Strauch-Übergangsstadien bzw. nach 222 für Obst- und Beerenobstbestände, und die nach VDI 3783, Blatt 12 (2000) als „rau“ bezeichnet wird. Der Modellmaßstab dieser Grenzschicht beträgt ebenfalls 1:300.

Ein vertikales Geschwindigkeitsprofil in der Anströmung wurde vor dem eigentlichen Modellbereich aufgenommen. Das in der Achse in Windkanalmitte gemessene Profil der mittleren Windgeschwindigkeit $u(z)$, normiert mit der Windgeschwindigkeit in der Referenzhöhe z_{ref} als Referenzwindgeschwindigkeit u_{ref} , zeigt die Abbildung A2.1. Bei den später erfolgten Untersuchungen des Planungszustandes wurde das Anströmprofil bestätigt.

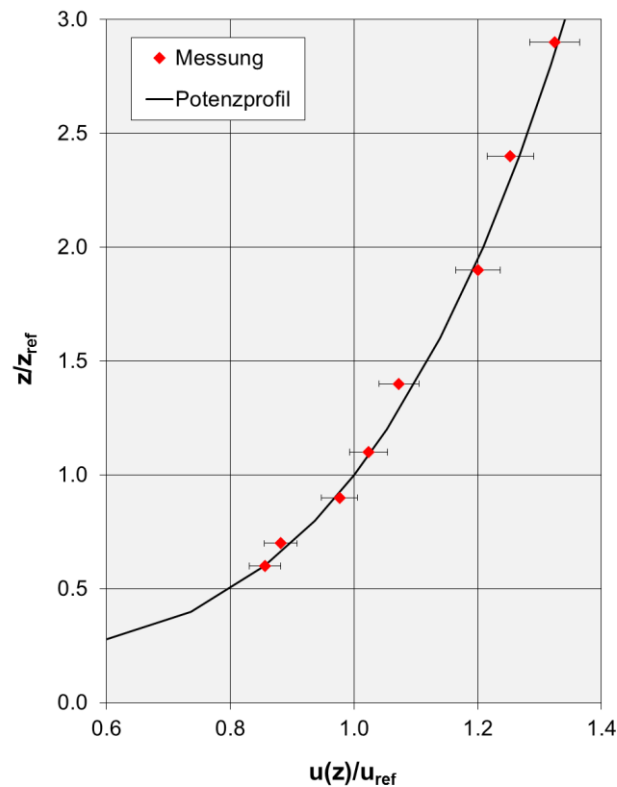


Abb. A2.1: Mittlere Anströmwindgeschwindigkeiten $u(z)$ vor dem Modellbereich in der Kanalachse, normiert mit der Geschwindigkeit $u_{ref} = 3.3$ m/s in $z_{ref} = 30$ m Höhe und verglichen mit einem Potenzprofil mit dem Exponenten $\alpha = 0.24$ und der Versatz- bzw. Verdrängungshöhe $d_0 = 5$ m. Mit dargestellt sind Messunsicherheiten von $\pm 3\%$.

Als Referenzhöhe z_{ref} wurde eine Höhe von 30 m in der Natur (bzw. 0.1 m im Modell) gewählt. Mit dargestellt sind die für derartige Geschwindigkeitsmessungen mit Hitzdrahtsonden typischen Messunsicherheiten von $\pm 3\%$.

Das gemessene Profil wird bis zu der Höhe $z = 3 z_{ref}$ (bzw. $z = 90$ m), was ungefähr der 3,5-fachen Höhe der Bäume entspricht, verglichen mit einem Potenzprofil der Form

$$u(z) / u_{ref} = [(z - d_0) / (z_{ref} - d_0)]^\alpha \quad (\text{A2.5})$$

mit $\alpha = 0.24$ als Profilexponenten und der Nullpunktverschiebung $d_0 = 5$ m als Versatz- bzw. Verdrängungshöhe. Neben der Darstellung des mittleren Windprofils über einen Potenzansatz ist in der Meteorologie der logarithmische Ansatz verbreitet

$$u(z)/u^* = 1/\kappa \ln [(z - d_0) / z_0] \quad (\text{A2.6})$$

mit u^* als Schubspannungsgeschwindigkeit, κ als Von-Karman-Konstante ($\kappa \approx 0.4$) und z_0 als Rauigkeitslänge.

In der Abbildung A2.2 werden die Messdaten aus der Abbildung A2.1, wie dort normiert mit der Windgeschwindigkeit in $z_{\text{ref}} = 30$ m Höhe als Referenzgeschwindigkeit u_{ref} , dem logarithmischen Ansatz mit $u^* = 0.34$ m/s, $z_0 = 0.5$ m und einem d_0 von 5 m gegenübergestellt. Mit dargestellt sind wieder die für derartige Messungen typischen Messunsicherheiten von $\pm 3\%$.

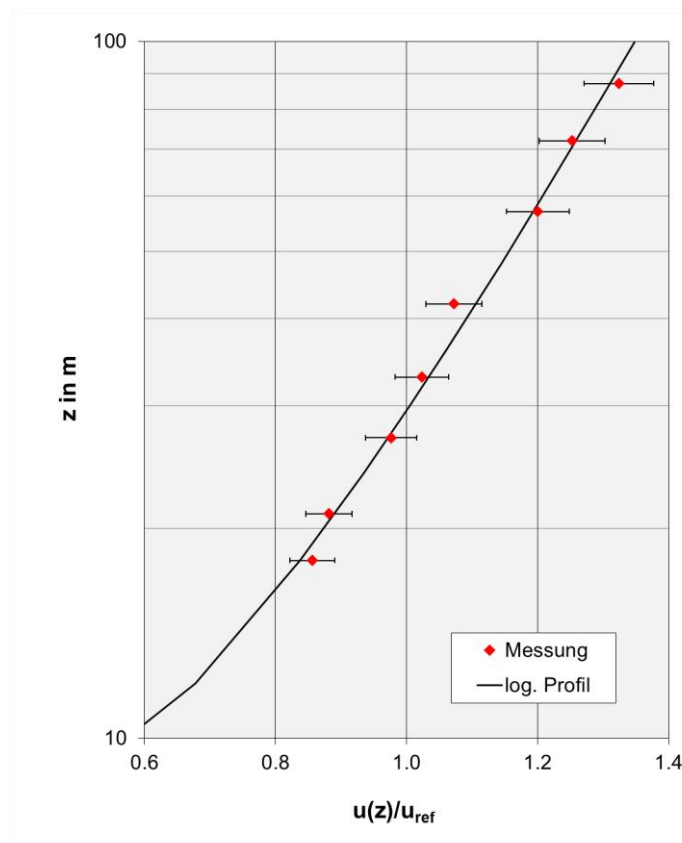


Abb. A2.2: Mittlere Anströmwindgeschwindigkeiten $u(z)$ vor dem Modellbereich in der Kanalachse, normiert mit der Geschwindigkeit $u_{\text{ref}} = 3.3$ m/s in $z_{\text{ref}} = 30$ m Höhe und verglichen mit einem logarithmischen Profilansatz mit der Rauigkeitslänge $z_0 = 0.5$ m und einer Versatz- bzw. Verdrängungshöhe $d_0 = 5$ m. Mit dargestellt sind Messunsicherheiten von $\pm 3\%$.

Aus den mittleren Windgeschwindigkeiten in longitudinaler Strömungsrichtung und ihren Standardabweichungen wurde die Turbulenzintensität $I_u(z) = \sigma_u(z)/u(z)$ über die Höhe bestimmt (siehe Abbildung A2.3). Die Turbulenzintensitäten liegen innerhalb des Wertebereiches für raues Gelände nach VDI 3783 Blatt 12 (2000) sowie im besonders interessierenden bodennahen Bereich bis zu 40 m Höhe nahe der Vorgabe für $z_0 = 0.5$ m nach ESDU (1985).

Die Anströmrenzschicht im Windkanal gibt somit eine neutrale natürliche Grenzschicht über rauem Gelände hinreichend genau wieder.

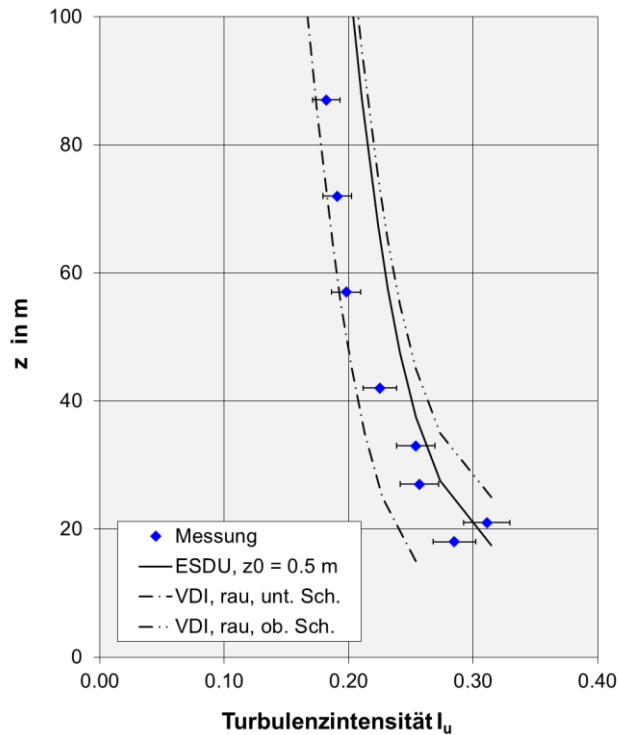


Abb. A2.3: Turbulenzintensitäten in longitudinaler Richtung $I_u(z) = \sigma_u(z)/u(z)$ für das Anströmprofil mit $z_0 = 0.5$ m und $d_0 = 5$ m (siehe Abbildung A2.2), verglichen mit einem Profil nach ESDU (1985) für $z_0 = 0.5$ m und nach der VDI-Richtlinie 3783 Blatt 12 (Dez. 2000) für raues Gelände (unt. Sch. = untere Schranke, ob. Sch. = obere Schranke). Mit dargestellt sind die Unsicherheiten bei der Bestimmung.

A2.4 Einfluss der Reynoldszahl

Reynoldszahlen kennzeichnen die Umströmung von Hindernissen. Ähnliche Reynoldszahlen in Natur und Modell können bei den üblichen Modellmaßstäben im Windkanal nicht eingehalten werden. Bei Baukörpern mit klar definierten Ablösekanten, wie Gebäuden, reicht es aus, wenn die Reynoldszahl im Modell oberhalb einer kritischen Reynoldszahl liegt. Wird diese kritische Reynoldszahl überschritten, sind die Strömungseffekte bei der Umströmung von Hindernissen, wie beispielsweise ihre Rezirkulationszone, naturähnlich und nicht mehr von einer weiteren Erhöhung der Geschwindigkeit abhängig.

Nach der VDI 3783, Blatt 12 (2000), beträgt die kritische Reynoldszahl, gebildet aus der Bauwerkshöhe H als für den Strömungsvorgang charakteristischen Referenzlänge, u als Anströmgeschwindigkeit in der Höhe H und der kinematischen Zähigkeit der Luft, ν , ohne weiteren Nachweis

$$Re = u \cdot H / \nu = 10.000 \quad (A2.7)$$

Im vorliegenden Fall weisen die Bäume als modellierte Hindernisse allerdings keine definierten Ablösekanten auf und sind zudem für die Strömung durchlässig.

Daher ist die Um- und Durchströmung des Waldes stärker abhängig von der Reynoldszahl als die Umströmung von undurchlässigen Körpern mit definierten Ablösekannten.

In der Veröffentlichung von Gromke (2018) ist die Änderung des Strömungsfeldes über einem Wald mit der Reynoldszahl dargestellt. Das mittlere Strömungsfeld über den Bäumen war weitgehend unabhängig von einer weiteren Erhöhung der Windgeschwindigkeit bzw. Reynoldszahl ab $Re = 31.000$. Hierbei wurde die Reynoldszahl mit der Höhe der Bäume H als charakteristischer Länge und der Geschwindigkeit, die in der ungestörten Anströmung in der Höhe H vorliegt, als charakteristischer Geschwindigkeit bestimmt.

In der vorliegenden Untersuchung wurde eine so definierte Reynoldszahl von mindestens 16.500 erreicht. Bei einer niedrigeren Reynoldszahl von 14.700 weichen nach Gromke (2018) die mittleren Windgeschwindigkeiten in der kritischen Zone unmittelbar über den Baumkronen in der Größenordnung von ca. 10 % gegenüber dem von der Reynoldszahl weitgehend unabhängigen Fall ab.

A3 Messtechnik

A3.1 Strömungssichtbarmachung mit Windfähnchen

Miniaturisierte, leicht drehbare Windfähnchen, die in die jeweilige lokale Strömungsrichtung weisen, stellen eine Methode zur Sichtbarmachung der Strömungsrichtungen dar.

Abbildung A3.1 zeigt dies am Beispiel einer Rezirkulationszone hinter einem quaderförmigen Gebäude. In der seitlichen Ansicht richten sich die Windfähnchen 1 – 5 innerhalb der Rezirkulationszone eindeutig nach der Rückströmung zum Gebäude hin aus. Hinter dem sogenannten Wiederanlegepunkt, in dessen Bereich (Fähnchen 6 und 7) die Strömungsrichtung nicht definiert ist, weisen sie in Richtung der Anströmung (Fähnchen 8 ff.). Langzeitbelichtungen über mehrere Sekunden Dauer mit einer Draufsicht ermöglichen, den von den Fähnchen überstrichenen Sektor und damit auch die Schwankung der Windrichtung zu erfassen.

Die Reproduzierbarkeit der Sichtbarmachung des Strömungsfeldes durch die Windfähnchen zeigen die beiden Abbildungen A3.2 und A3.3 mit Windfähnchen bei derselben Windrichtung. Die Zeitpunkte der Langzeitaufnahmen über 15 Sekunden Dauer für den Bestand mit den Kaminen bzw. Fähnchen entlang der Firstlinien ohne Wäschergebäude (Abbildung A3.2) und für die Planung mit Wäschern (Abbildung A3.3) lagen mehrere Monate auseinander und schlossen zwischenzeitliche Änderungen der Windrichtung und Umbauten des Modells bzw. Windkanals ein. Für die nicht veränderten Fähnchen in 3 m Höhe über dem Boden und entlang der Firstlinien zeigen die beiden jeweils zusammengehörigen Bilder weitgehend identische Strömungsfelder. Dies gilt sowohl für die mittlere Ausrichtung der Fähnchen wie auch für die von ihnen überstrichenen Windrichtungssektoren.

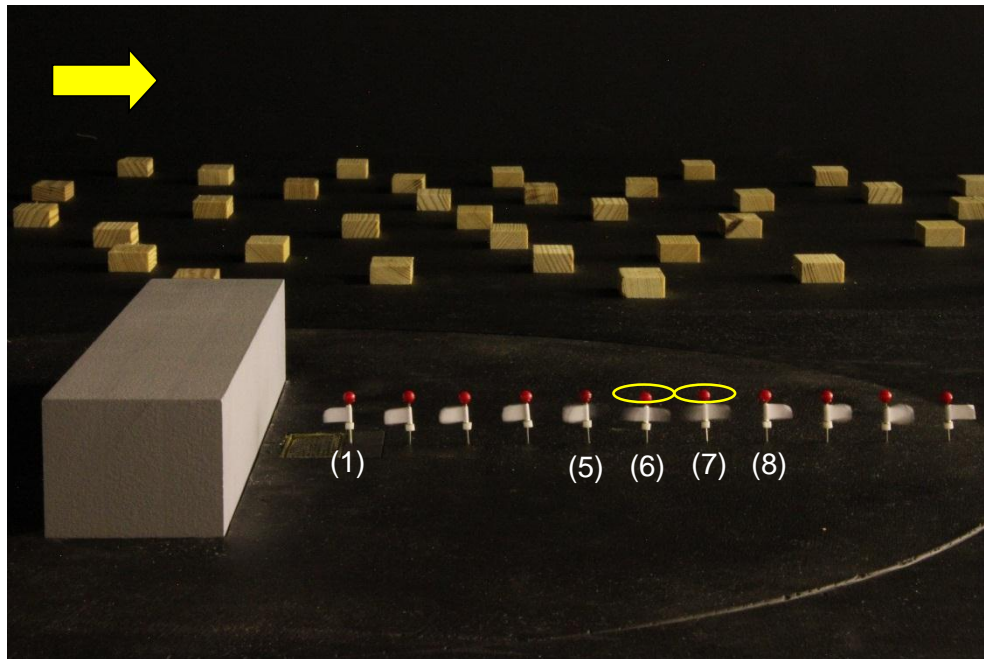


Abb. A3.1: Sichtbarmachung des bodennahen Strömungsfeldes durch Windfähnchen und Langzeitbelichtung hinter einem senkrecht angeströmten, undurchlässigen Quader in der Seitensicht:

- Die Fähnchen (1) – (5) richten sich eindeutig nach der Rückströmung in der Rezirkulationszone des Quaders entgegen der Anströmung zum Quader hin aus.
- Die Fähnchen (6) und (7) liegen im Bereich des sog. Wiederanlegepunktes der Strömung und überstreichen Vollkreise. An diesen Stellen ist die Strömungsrichtung nicht definiert. Solche Fähnchen sind z. B. auch in der Abbildung 3.7 im Abschnitt 3.4 mit Kreisen markiert.
- Die Fähnchen (8) ff. weiter stromab zeigen wieder in Richtung der Anströmung.

A3.2 Geschwindigkeitsmessungen

Zur Messung der horizontalen Windgeschwindigkeit und -turbulenz wurde ein Konstant – Temperatur - Hitzdrahtanemometer (CTA) der Baureihe 55D01 der Firma Dantec und Einzeldrahtsonden des Typs 55P13 mit einem Sensordraht parallel zur Sondenachse verwendet. Sondenachse bzw. Sensordraht waren in vertikaler Richtung in den Windkanal eingebaut.

Die Hitzdrahtsonde wurde täglich vor dem Einsatz kalibriert, in dem sie einer turbulenzarmen Luftströmung ausgesetzt wurde. Die Strömungsgeschwindigkeit wurde mit einem Prandtlrohr, angeschlossen an eine Präzisionsdruckmessdose vom Typ MKS 220, gemessen. Mit Hilfe einer an die Messpunkte aus der Kalibrierung angepassten Funktion können die an der Hitzdrahteinheit gemessenen Spannungen in Strömungsgeschwindigkeiten umgerechnet werden. Abbildung A3.4 zeigt Messpunkte einer Kalibrierung und die angepasste Kalibrierfunktion. Die Kalibrierfunktion sollte sich innerhalb eines Bereichs von ± 0.1 m/s zu den Messpunkten befinden.

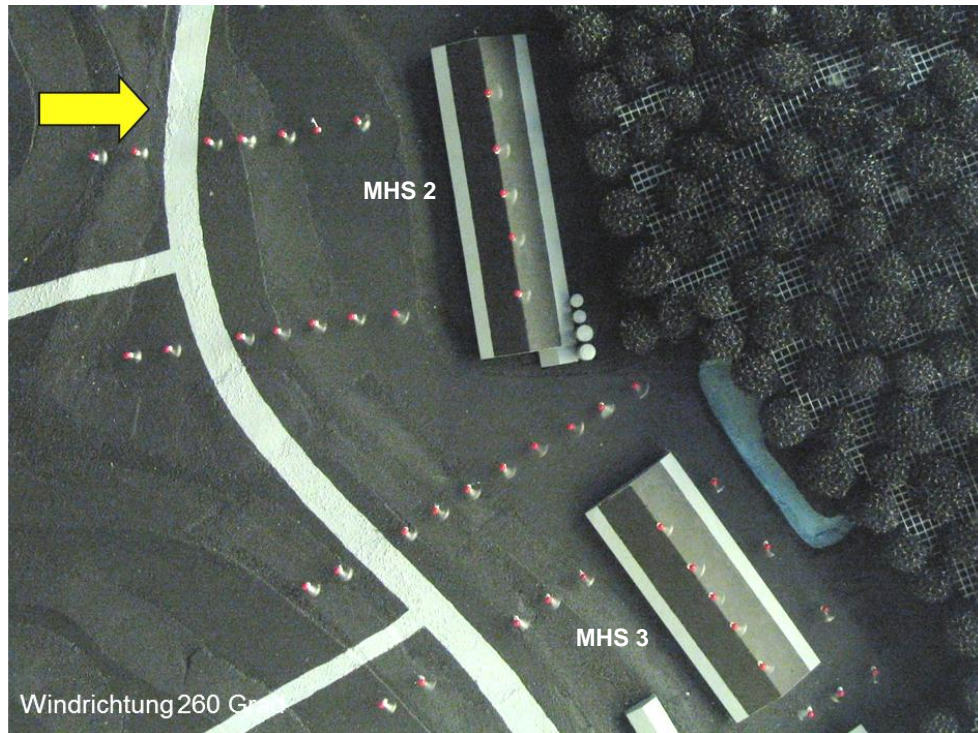


Abb. A3.2: Hügel mit Wald, Windrichtung 260 Grad: Ausrichtung der Windfähnchen mit der Strömung in 3 m Höhe über First der Ställe MHS 2 und MHS 3 und in 3 m Höhe über Grund (Bestand ohne die geplanten Wäschergebäude).

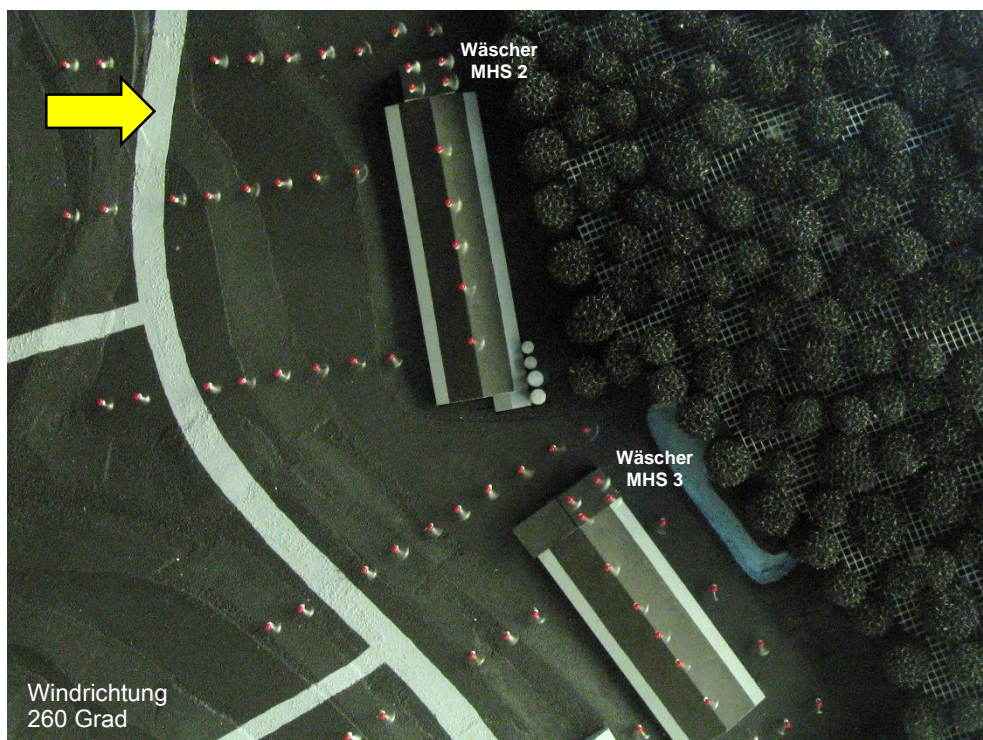


Abb. A3.3: Hügel mit Wald, Windrichtung 260 Grad: Ausrichtung der Windfähnchen mit der Strömung in 3 m Höhe über den Wäschern der Ställe MHS 2 und MHS 3, über den Firstlinien der Ställe und in 3 m Höhe über Grund (Planung).

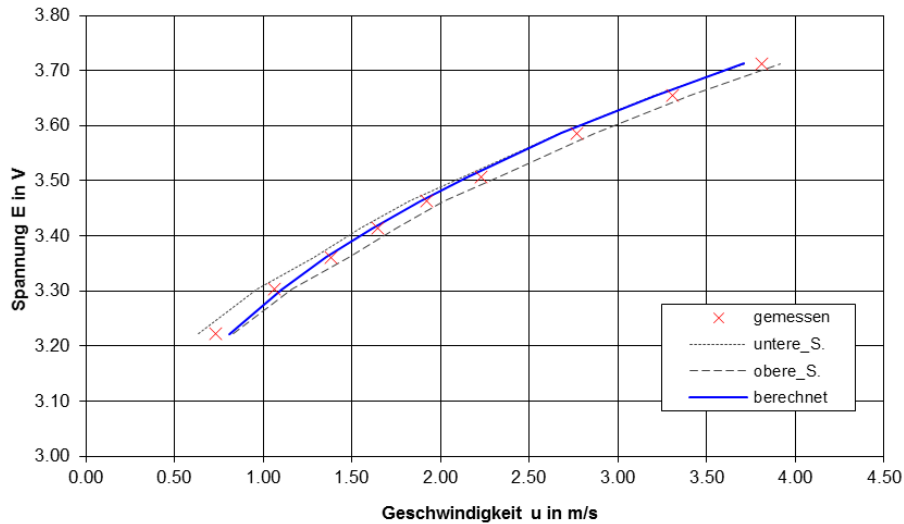


Abb. A3.4: Bei der Kalibrierung des Hitzdrahtes aufgenommene Datenpunkte und die angepasste Kalibrierfunktion einschließlich der Schranken von ± 0.1 m/s zu den Messpunkten.

Die Überprüfung der Reproduzierbarkeit der Strömungsmessungen erfolgte durch einen Vergleich von Messdaten, die an den gleichen Punkten in den Vertikalprofilen an verschiedenen Tagen bestimmt wurden (siehe Abbildung A3.5). Diese Messdaten enthalten sowohl die Unsicherheiten aufgrund der endlichen Messdauer von 1 Minute als auch die Unsicherheiten durch die erneute Positionierung der Sonde und verschiedene Kalibrierfunktionen.

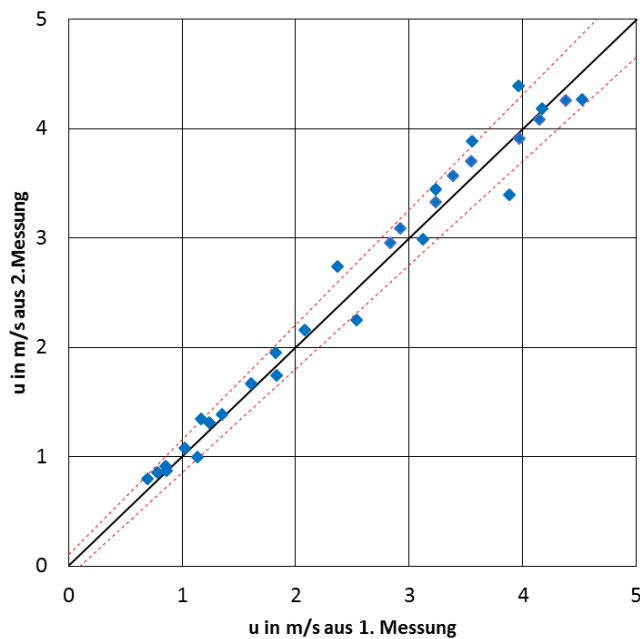


Abb. A3.5: Reproduzierbarkeit der Strömungsmessungen für identische Messpunkte bei zwei Messungen. Die unterbrochenen Linien kennzeichnen eine Abweichung von $0.1 \text{ m/s} \pm 5\%$ des Messwertes.

Bei den in der Abbildung A3.5 eingetragenen Messpunkten ist die Abweichung der gemessenen Geschwindigkeiten aus den beiden Messungen meist geringer als $0.1 \text{ m/s} \pm 5\%$ des Messwertes (entsprechend der beiden unterbrochenen roten Linien in der Abbildung). Dabei ist zu berücksichtigen, dass eine typische Messunsicherheit bei Strömungsmessungen mit Hitzdrähten, selbst bei weniger turbulenten Verhältnissen wie in der Anströmung, bereits bei $\pm 3\%$ der Messwerte liegt.

Bei dem einzelnen Hitzdraht in vertikaler Richtung tragen die Beträge aller drei horizontalen Windgeschwindigkeiten 1, 2 und 3 unabhängig von ihrer Richtung (siehe die Skizze in der Abbildung A3.6) zur Mittelwertbildung bei. Auch die absoluten Beträge von Querströmungen, wie 2, und Rückströmungen, wie 3, gehen in die mittleren Windgeschwindigkeiten aus den Hitzdrahtmessungen ein.

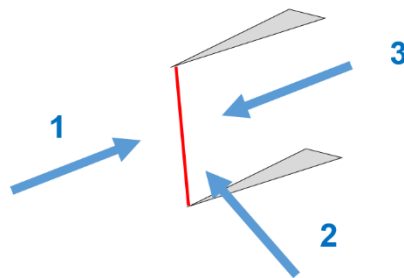


Abb. A3.6: Skizze eines vertikal angeordneten Hitzdrahtes (rote Linie) mit den horizontalen Windgeschwindigkeiten 1, 2 und 3 verschiedener Richtungen.

Bei den Windrichtungen mit den Ställen in Lee des Hügels wechselten die Strömungsrichtungen an den Messpunkten besonders stark. Daher wurde bei der Windrichtung 60 Grad exemplarisch als zweites Messsystem eine Drucksonde eingesetzt. Bei dieser Sonde wird die Strömungsgeschwindigkeit über die Druckdifferenz an einer kreisförmigen, scharfkantigen Platte mit einigen Millimetern Durchmesser und Druckanbohrungen jeweils in der Mitte auf beiden Seiten der Platte bestimmt (siehe Abbildung A3.7), die Strömungsrichtung durch die Verteilung von Über- und Unterdruck.

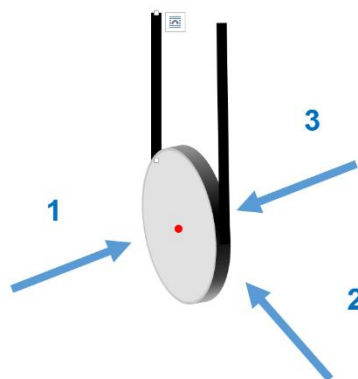


Abb. A3.7: Skizze der Drucksonde mit einer der beiden Druckanbohrungen (roter Punkt) und den horizontalen Windgeschwindigkeiten 1, 2 und 3 verschiedener Richtungen.

Der Differenzdruck wurde mit der Druckmessdose MKS 220 bestimmt. Nach Kalibrierung der Sonde lassen sich so die horizontalen Strömungsgeschwindigkeiten senkrecht zu der Platte einschließlich ihrer Richtung bestimmen und die Mittelwerte bilden.

Liefert z.B. die Windgeschwindigkeit 1 einen Differenzdruck einer bestimmten Höhe, führt die Rückströmung 3 mit gleicher Geschwindigkeit wie 1 zu dem betragsmäßig gleichen Druckwert, aber mit umgekehrten Vorzeichen. Die Querströmung 2 liefert keinen Beitrag zu der Windgeschwindigkeit senkrecht zu der Platte. Im vorliegenden Fall ist der Mittelwert der Windgeschwindigkeit somit Null.

Da bei der Bildung von Mittelwerten aus den Messdaten der Drucksonde die Strömungsrichtungen mit eingehen, sind die Werte stets kleiner als oder höchstens gleich den mittleren Geschwindigkeiten aus den Hitzdrahtmessungen. Die Abweichung zwischen den beiden Werten ist umso größer, je häufiger Rückströmungen auftreten bzw. die Strömungsrichtung wechselt. Weist die Strömung eindeutig in eine Richtung, sollten sich die Werte der beiden Verfahren im Rahmen der Messgenauigkeit entsprechen.

In der folgenden Abbildung A3.8 sind für die Windrichtung 60 Grad mit dem Hitzdraht (HD) und mit der Drucksonde (Druso) ermittelte Vertikalprofile der mittleren Windgeschwindigkeiten an den Messpunkten 1 – 4 gegenüber gestellt. In die Abbildung aufgenommen wurden die gleichen Symbole wie in Abschnitt 5, die die mittlere Höhe der Waldkrone bei ca. 24 m und die Mündungshöhen der Abgaskamine im Bestand und bei der Planung markieren.

Nach einer ersten Messung mit der Sondenplatte der Drucksonde senkrecht zur Kanalachse wurde eine zweite Messung mit um 90 Grad gedrehter Platte durchgeführt, um auch quer zur Kanalachse gerichtete Geschwindigkeitskomponenten zu erfassen. Anschließend wurde aus den Mittelwerten beider Messungen eine resultierende mittlere Windgeschwindigkeit berechnet.

Die Drucksonde liefert aus den beschriebenen Gründen an allen Messpunkten bis in eine Höhe von ca. 30 – 40 m über Grund geringere mittlere Windgeschwindigkeiten als der Hitzdraht. In diesem Bereich dominiert der Einfluss des Waldes mit den beobachteten stark wechselnden Strömungsrichtungen. Mit zunehmender Ausrichtung der Strömung in größerer Höhe liefern beide Verfahren - vertikaler Hitzdraht und Drucksonde - im Rahmen der Messgenauigkeit ähnliche mittlere horizontale Geschwindigkeiten, wobei die Werte der Drucksonde tendenziell etwas höher sind.

Der Vergleich bestätigt, dass die mit dem Hitzdraht gemessenen mittleren Windgeschwindigkeiten eine obere Schranke für die lokalen Windgeschwindigkeiten bilden, vor allem, wenn die Strömungsrichtungen stark wechseln und eine mittlere Richtung nicht definiert werden kann.

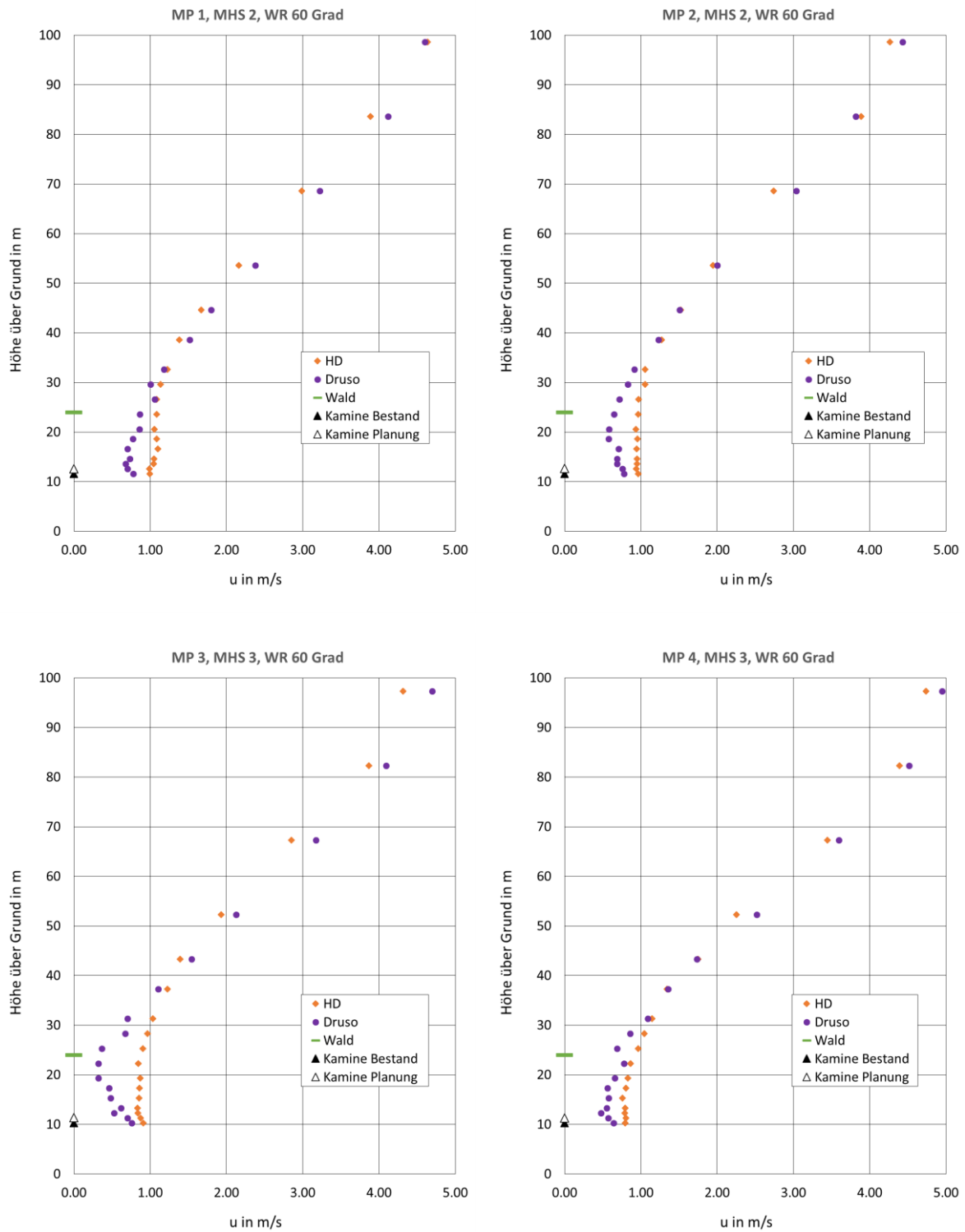


Abb. A3.8: Vergleich der Vertikalprofile der mittleren Windgeschwindigkeiten, gemessen mit dem Hitzdraht (HD) und der Drucksonde (Druso) bei der Windrichtung 60 Grad:

- Messpunkte 1 (oben links) und 2 (oben rechts) auf MHS 2
- Messpunkte 3 (unten links) und 4 (unten rechts) auf MHS 3

Zusätzlich ist die Höhe der Baumkronen („Wald“) und der Mündungen der Kamine über First im Bestand und der Planung (mit Wäschern) eingetragen.